



FACULTAD DE INGENIERÍA Y COMPUTACIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES
FOTOCATALÍTICAS DE ADOQUINES PARA
OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL
ADICIONADO CON TiO_2 (DIÓXIDO DE
TITANIO) EN LA CIUDAD DE AREQUIPA 2021**

Autor: SOFIA NICOLT NAJAR OBLITAS

Asesor: PhD. Fredy Alberto Huamán Mamani

Tesis presentada a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil como
parte de los requisitos para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

AREQUIPA- PERÚ

2021

DEDICATORIA

Con mucha gratitud y cariño dedico esta tesis a Dios por permitirme llegar tan lejos y hacer realidad cada objetivo soñado. A mis padres por invertir en mi educación y confiar en mí, por formarme con valores y principios, a mi hermana quien ha estado conmigo en las buenas y malas.

A todas las mujeres ingenieras peruanas que sigamos sumándonos a más carreras con prejuicios sociales, que nuestro capital humano sea cada vez más visible, y no descansemos hasta conseguir una igualdad de oportunidades.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor de tesis PhD. Fredy Alberto Huamán Mamani, por la constante orientación, apoyo y paciencia que me brindo durante la elaboración de la tesis. Por enseñarme que la investigación nos enseña mucho más en el camino que el resultado.

Al Mgtr. Jaime Muñoz Portugal, que hoy ya no está físicamente con nosotros, pero sé que desde el cielo este orgulloso de muchos de sus alumnos, y por ser quien siempre me motivo hacia la investigación de materiales y el cuidado al medio ambiente.

Al Mgtr. Roberto Acero Condori, por su excelente metodología de enseñanza quien siempre nos puso la valla bien alta y ser fuente de inspiración y admiración.

A todos los profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Católica San Pablo por todas sus enseñanzas, conocimientos y compartir sus experiencias durante estos años

RESUMEN

Arequipa se enfrenta a un problema silencioso de contaminación del aire debido en gran medida a las emisiones vehiculares, especialmente en las zonas urbanas en crecimiento. Esta tesis investigó el efecto fotocatalítico del dióxido de titanio (TiO_2) aplicada en la mezcla de concreto de adoquines tipo II de tránsito vehicular ligero para aplicarlos en pavimentos articulados con el objetivo de eliminar en gran porcentaje los contaminantes en el aire como NO_2 (dióxido de nitrógeno), NO (monóxido de nitrógeno) entre otros, de manera que el pavimento articulado pueda realizar este proceso en presencia de los rayos UV ultravioleta para la activación del fotocatalizador y dar como resultado la eliminación de contaminantes del aire.

Esta investigación tuvo como objetivo determinar el porcentaje más adecuado de dióxido de titanio respecto al peso de cemento HE Yura añadida a la mezcla convencional de concreto de dosificación 1:3 (cemento: arena) y relación a/c de 0.4, que permita mantener o mejorar las propiedades físico-mecánicas y propiedad autolimpiante aplicado en la fabricación de adoquines tipo II de resistencia 420 kgf/cm^2 , se realizaron adoquines a escala real de dimensiones $200 \times 100 \times 60 \text{ mm}$, para obtener 4 tratamientos de porcentaje de TiO_2 (dióxido de titanio) con respecto al peso de cemento, estas son 0, 3, 7 y 12 % . Al término de los estudios correspondientes se concluyó que el tratamiento óptimo es de 7% de TiO_2 , por mostrar un equilibrio entre las dos variables evaluadas (a) resistencia a la compresión a la edad de 3,7 y 28 días. (b) capacidad fotocatalítica con Rodamina B.

Así también se concluyó que a mayor cantidad del fotocatalizador TiO_2 (dióxido de titanio) no es directamente proporcional con la capacidad fotocatalítica como es el caso del tratamiento de 12% de TiO_2 que no tuvo el rendimiento esperado en comparación con los tratamientos de 3 y 7% ni tampoco se obtuvo la resistencia mínima requerida de 420 kg/cm^2 .

Palabras Clave: Dióxido de titanio; Fotocatalizador; Pavimento Articulado, NO_x ; Adoquín Fotocatalítico.

ABSTRACT

Arequipa faces a silent air pollution problem largely due to vehicular emissions, especially in growing urban areas. This thesis investigated the photocatalytic effect of titanium dioxide (TiO_2) applied in the concrete mix of type II paving stones for light vehicular traffic to be applied in articulated pavements with the aim of eliminating a large percentage of air pollutants such as NO_2 (nitrogen dioxide), NO (nitrogen monoxide) among others, so that the articulated pavement can carry out this process in the presence of ultraviolet UV rays to activate the photocatalyst and result in the elimination of air pollutants.

The objective of this research was to determine the most adequate percentage of titanium dioxide with respect to the weight of HE Yura cement added to the conventional mixture of concrete with a dosage of 1: 3 (cement: sand) and a w / c ratio of 0.4, which allows to maintain or to improve the physical-mechanical properties and self-cleaning property applied in the manufacture of type II paving stones of resistance $420 \text{ kgf} / \text{cm}^2$, real-scale pavers of dimensions $200 \times 100 \times 60 \text{ mm}$ were made, to obtain 4 treatments of percentage of TiO_2 (titanium dioxide) with respect to By weight of cement, these are 0, 3, 7 and 12%. At the end of the corresponding studies, it was concluded that the optimal treatment is 7% TiO_2 , as it shows a balance between the two variables evaluated (a) compressive strength at the age of 3.7 and 28 days. (b) photocatalytic capacity with Rhodamine B.

Thus, it was also concluded that the greater amount of the TiO_2 photocatalyst (titanium dioxide) is not directly proportional to the photocatalytic capacity, as is the case with the 12% TiO_2 treatment, which did not have the expected performance compared to the treatments 3 and 7. % nor was the required minimum resistance of $420 \text{ kg} / \text{cm}^2$ obtained.

Keywords: Titanium dioxide; Photocatalyst; Articulated Pavement, NO_x ; Photocatalytic Paving Stone.

ÍNDICE

	Página.
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE.....	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE GRÁFICOS.....	XI
LISTA DE FOTOS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS Y GLOSARIO.....	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática	1
1.1.1 Contextualización.....	1
1.1.2 Descripción del problema.....	3
1.1.3 Formulación del problema	9
1.2 Justificación e importancia	9
1.2.1 Justificación científica.....	9
1.2.2 Justificación técnica-práctica	9
1.2.3 Justificación personal	10
1.3. Delimitación de la Investigación	10
1.4 Limitaciones de la investigación.....	11
1.5. Objetivos.....	11
1.5.1 Objetivo general	11
1.5.2 Objetivos específicos.....	11
1.6 Hipótesis	12
1.6.1 Hipótesis general	12
1.6.2 Hipótesis específica.....	12
1.7 Variables de la investigación	12
1.7.1 Variables dependientes.....	12
1.7.2 Variables independientes.....	13

1.8 Metodología de la investigación	14
1.8.1 Diseño de la Investigación	14
1.8.2 Diseño del experimento.....	14
1.8.3 Método y tipo de la investigación	22
1.8.4 Población, muestra y la unidad	22
1.8.5 Técnicas e instrumentos para la recopilación de datos.....	23
1.8.6 Análisis de la información.....	23
1.8.7 Equipos y materiales	23
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	25
2.1 Antecedentes de la investigación.....	25
2.2 Antecedentes de concreto fotocatalítico	25
2.3 Estudios internacionales de concreto fotocatalítico en la construcción.....	29
2.4 Estudios nacionales y locales de concreto fotocatalítico en la construcción.....	29
CAPÍTULO 3. PROCESO FOTOCATALÍTICO	31
3.1 El Titanio	31
3.2 Dióxido de titanio TiO_2	31
3.3 Anatase, Rutilo y Brookita.....	31
3.4 Método de laboratorio para la obtención de Dióxido de titanio	33
3.5 Nanopartículas y Nanotubos.....	34
3.6 Semiconductores.....	34
3.7 Fotocatálisis	35
3.7.1 Fotocatálisis heterogénea	36
3.8 Aplicación del fotocatalizador TiO_2 en materiales de construcción.....	38
3.9 El sistema cemento – TiO_2	39
3.10 Materiales con capacidad fotocatalíticas	39
3.11 Durabilidad de materiales fotocatalíticos	42
3.12 Aplicaciones “in situ” de materiales fotocatalíticos	44
3.13 Contaminación del Aire	48
3.13.1 $PM_{2.5}$ y PM_{10}	50
3.14 Dióxido de Nitrógeno NO_2	51
3.15 Longitud de onda e Intensidad de la luz	51
3.16 Rodamina B	52
3.17 Prueba de Rodamina UNI 11259	54

3.18 Prueba de Autolimpieza.....	55
3.19 Normas sobre evaluación de actividad fotocatalítica	56
CAPÍTULO 4: PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS ADOQUINES.....	59
4.1 Adoquín Tipo II	59
4.2 El concreto	60
4.3 El cemento HE -Portland	61
4.4 Agua de mezcla y agua de curado	62
4.5 Los agregados para el concreto.....	63
4.5.1 Clasificación de los agregados	63
4.5.2 Funciones del agregado.....	64
4.6 Diseño de mezclas de concreto.....	64
4.7 Resistencia a la compresión.....	65
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
5.1 Análisis del ensayo resistencia a la compresión (NTP 366.611-NTP 366.604).....	66
5.1.1 Ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 3 días.....	66
5.1.2 Ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 7 días.....	68
5.1.3 Ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 28 días.....	69
5.1.4 Análisis de la resistencia promedio y edad para los distintos tratamientos.....	71
5.2 Análisis de los adoquines fotocatalítico con la prueba de Rodamina.....	73
5.2.1 Análisis de los adoquines fotocatalítico con 0, 3, 7 y 12% de TiO ₂ en los 3 días....	73
5.2.2 Análisis Final de la prueba Rodamina con los adoquines en distintos tratamientos.....	74
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÉNDICE A.....	85
ANEXOS I.....	94

LISTA DE FIGURAS

	Página
<i>Figura 1.</i> Imágenes de la Av. Independencia expuestas a contaminación ambiental por emisión del parque automotor.....	5
<i>Figura 2.</i> Superficies contaminadas por NOx (Óxidos de Nitrógeno) y Hollín.	6
<i>Figura 3.</i> Estándares de la calidad ambiental del aire en Perú.....	7
<i>Figura 4.</i> Daños que ocasionan los contaminantes más comunes del aire	8
<i>Figura 5:</i> Fases de producción de los adoquines en campo.....	16
<i>Figura 6:</i> Llenado y enrase de los moldes de adoquines.....	16
<i>Figura 7:</i> Proceso de vibro compactación de los adoquines.	17
<i>Figura 8:</i> Curado húmedo de los adoquines.....	18
<i>Figura 9:</i> Refrendados con azufre en las superficies de los adoquines fotocatalíticos.....	19
<i>Figura 10:</i> Adoquines con capping de azufre.....	20
<i>Figura 11:</i> Combinación de la rodamina con agua destilada. Fuente.	21
<i>Figura 12.</i> Adoquines antes y después de aplicación del colorante Rodamina B.....	22
<i>Figura 13.</i> Resistencia a la compresión de las muestras con nanopartículas, nanotubos y en condiciones normales.	26
<i>Figura 14.</i> Curvas de variación de concentración en tiempo real de eliminación de NO sobre las muestras preparadas antes y después del pulido.....	26
<i>Figura 15.</i> Estructuras Cristalinas de las fases del TiO ₂	33
<i>Figura 16.</i> Ecuaciones de la degradación del NOx.	38
<i>Figura 17.</i> Imágenes del ángulo de contacto del agua en film de TiO ₂ antes y después de la irradiación de los rayos UV. Extraída de CONAMA.....	41
<i>Figura 18.</i> Cámara euphone-ciam-Valencia.	46
<i>Figura 19.</i> Tamaño del material particulado en el aire	50
<i>Figura 20:</i> Estructura química de la Rodamina B (C ₂₈ H ₃₁ ClN ₂ O ₃)	54
<i>Figura 21.</i> Proyecto PICADA – Países Conformantes.....	58
<i>Figura 22.</i> Flujoograma de producción de los adoquines.....	87

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Variable dependiente: Resistencia a la compresión.....	12
Tabla 2. Variable dependiente: Capacidad Fotocatalítica	13
Tabla 3. Variable independiente: % de Dióxido de titanio.....	13
Tabla 4. Cantidad de probetas elaboradas para cada variable de análisis	14
Tabla 5. Criterios y tipo de Investigación.....	22
Tabla 6. Tipo de Recubrimiento, Reducción de NO y costo de material	28
Tabla 7. Propiedades físicas de TiO ₂	32
Tabla 8: Factores que afectan a la capacidad fotocatalítica.....	40
Tabla 9. Requerimientos minimos de los adoquines según la NTO 399.611.....	60
Tabla 10. Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 3 días para los distintos tratamientos.	66
Tabla 11. Promedios resumen de la resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 3 días para los distintos tratamientos.	66
Tabla 12. Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 7 días para los distintos tratamientos.	68
Tabla 13. Promedios resumen de las resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 7 días para los distintos tratamientos.	68
Tabla 14. Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 28 días para los distintos tratamientos.	69
Tabla 15. Promedios resumen de los promedios de la resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 28 días para los distintos tratamientos.	70
Tabla 16. Registro fotográfico de adoquines de concreto fotocatalítico a los diferentes tratamientos de 0, 3, 7 y 12% de TiO ₂	73
Tabla 17. Dosificación de los adoquines fotocatalíticos tipo II	85
Tabla 18. Análisis económico de costo de fabricación por unidad de adoquín fotocatalítico .	86
Tabla 19. Histórico de datos de concentración de PM _{2.5} en Arequipa.....	94

LISTA DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 1. Concentraciones de PM _{2.5} durante los años 2019, 2020 y 2021.....	3
Gráfico 2. Concentraciones de NO ₂ durante 2009 hasta 2014.....	5
Gráfico 3. Tasas de mortalidad de enfermedades más comunes en Arequipa.....	9
Gráfico 4. Compuestos semiconductores con sus bandas de conducción y de valencia porbables de actuar como fotocatalizadores con la radiación UV.....	52
Gráfico 5. Resistencia a la Compresion (kg/cm ²) vs Porcentaje (TiO ₂)- 3 dias.....	67
Gráfico 6. Resistencia a la compresión promedio a los 7 días vs % TiO ₂	68
Gráfico 7. Resistencia a la compresión promedio a los 28 días vs % TiO ₂	70
Gráfico 8. Resistencia promedio y edad para los distintos tratamientos de TiO ₂	71

LISTA DE FOTOS

	Página
Foto 1. Máquina de compresión universal marca: ELE	88
Foto 2. Colocación del refrentado previo a la rotura de los adoquines	88
Foto 3. Agua Destilada	88
Foto 4. Colorante Rodamina B	88
Foto 5. Vaso medidor de pírex	89
Foto 6. Dióxido de titanio Fase Anatase.....	89
Foto 7. Proceso de producción de los adoquines.....	89
Foto 8. Llenado de moldes de adoquín.....	90
Foto 9. Transporte de adoquines a la zona de curado.....	90
Foto 10. Colocación y eliminación de adoquines ensayados en la maquina a compresión.....	91
Foto 11. Transporte de las muestras para el refrentado de Azufre.....	91
Foto 12. Colocación de los adoquines en la Av. Independencia para la prueba de Rodamina B.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS Y GLOSARIO

- **Catalizador:** Es una sustancia capaz de acelerar una reacción química sin consumirse como el reactivo.
- **Colorímetro.** - Instrumento que mide el color del pigmento.
- **Fotocatálisis.** - Es la aceleración de una foto-reacción por la presencia de un catalizador. Reacción que utiliza la luz para activar un catalizador en presencia de oxígeno
- **Fotocatalizador.** - Se podría definir como aquella especie involucrada en la ecuación de la eficiencia fotónica de una reacción fotoquímica sin que esté presente en la estequiometría.
- **Hidrofilicidad.** - Afinidad que tiene una superficie con las moléculas de agua.
- **Nanomaterial.** - Materiales con propiedades morfológicas más pequeñas que un micrómetro.
- **Nanopartículas.** - Partículas microscópicas con una dimensión menos o igual a 100 nm.
- **NO.** - Monóxido de nitrógeno
- **NO₂.** - Dióxido de nitrógeno
- **NO_x.** - Óxidos de nitrógeno
- **PM.** - Material particulado
- **Propiedad Fotocatalítica.** - Propiedad autolimpiante
- **TiO₂.** - Dióxido de titanio, aditivo fotocatalítico.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

1.1.1 Contextualización

El sector de la construcción es en términos generales una de las principales responsables en generar un alto impacto ambiental en la naturaleza por efecto de la polución; la fabricación de diversos materiales que producen contaminantes ambientales que traen como consecuencia la mala calidad del aire, calentamiento global, lluvia ácida y el smog entre otros contaminantes.

Es importante mencionar que gran porcentaje de esta contaminación también es generada no solo por la fabricación de materiales de construcción sino también por el transporte de materiales durante las etapas de construcción y en demás fases que se ejecutan, se puede abordar señalando el inicio del proceso, como es la extracción de la materia prima quien conduce con el tiempo al agotamiento de los recursos naturales, por otro lado durante la ejecución se observa también una contaminación del aire interior debido a labores propias de la construcción que conllevarían a disminuir la productividad de los trabajadores y afectar su salud negativamente; durante todas las etapas de la construcción existe un tipo de contaminación que deben de ser analizadas para aportar soluciones. (Lippiatt B. C., 1999)

Debido al incremento demográfico natural como parte del desarrollo de las ciudades existe la necesidad de ejecutar obras civiles que cuenten con un alto desempeño en la calidad del concreto, ya que este es un material versátil debido a su consistencia, además también tiene que cumplir con las demandas del mercado sustentable (Meng, Dong, Hao, & Ting, 2020), es por ello que el TiO_2 (dióxido de titanio), es una propuesta atractiva debido a sus propiedades autolimpiantes y a su fácil disponibilidad y bajo costo en comparación con otros materiales fotocatalítico.

En cuanto a los aditivos, estos producen una modificación en alguna de las propiedades del concreto, el uso correcto de ellos podría ser la solución a la problemática que se generan durante la construcción; en particular estos aditivos fotocatalíticos se introdujeron finalizando el año 2014 en nuestro país, en un mercado de poca accesibilidad para todo el mercado, en la actualidad es un material que tiene muchas aplicaciones debido a su capacidad autolimpiante y su ayuda con el medio ambiente además el precio es accesible y durable a lo largo del tiempo (Vasquez Espinoza, 2016).

En la actualidad el dióxido de titanio (TiO_2), es aplicado como aditivo fotocatalítico en diversas formas en los materiales de construcción, entre las aplicaciones se puede observar que se puede emplear sobre superficies horizontales como podrían ser pavimentos rígidos, veredas, losas, adoquines, etc., como también en superficies verticales entre ellas se tiene la aplicación a pintura tanto en exteriores como en interiores, en revestimiento de acabados como yeso u otro material a base de cemento, bloques de concreto, elementos de división de tráfico como perfiles y mobiliarios urbanos entre otras aplicaciones. (Ohama & Van Gemert, 2011).

El TiO_2 cuando se aplica sobre materiales hechos a base de cemento, tiene la característica de “autolimpieza” (Cassar & Carinne, 2003). Otra de las aplicaciones del TiO_2 es la de purificar el aire degradando las toxinas en nitratos, que no son nocivos a la respiración humana, de esta manera se disminuye considerablemente la polución que es emitida por el parque automotor (Boonen & Beelndes, 2014).

Aún en la actualidad después de diversas investigaciones todavía no se conoce con suma certeza cual es el efecto real de la adición de TiO_2 en el comportamiento mecánico del concreto de cemento Portland, debido a variables como: humedad, temperatura, fase del fotocatalizador, etc. En países como España se tiene mayores planes de ejecución de aplicación industrial sobre el material fotocatalítico estas son llamadas islas fotocatalíticas, este proyecto se encuentra en la Península Ibérica como lo menciona el Dr. David Almazán, quien es el presidente de la Asociación Ibérica de Fotocatálisis y dio una entrevista sobre esta nueva tecnología a Agorá News (Almazan, 2013).

Dentro de un contexto latinoamericano podemos destacar que México es el país con más investigación en materiales fotocatalíticos, sin embargo, es un mercado comercial aún desconocido para el continente Sudamericano; esto se debe a tres causas: primero el desconocimiento de la influencia de TiO_2 en las propiedades del concreto entre ellas su propiedad autolimpiante, segundo debido a que no se conocen los porcentajes exactos a utilizar en la mezcla de la cantidad de TiO_2 y por último que no se tiene aún la confianza de usar este aditivo debido a que es una tecnología relativamente nueva para nuestro país y ello genera desconfianza por parte de los constructores de no utilizarla.

En consecuencia, con la presente propuesta de investigación se busca aprovechar la propiedad autolimpiante del TiO_2 , para incorporarlo en cantidades adecuadas a la mezcla del concreto para adoquines. Además, se evaluará la cantidad con respecto al peso de cemento

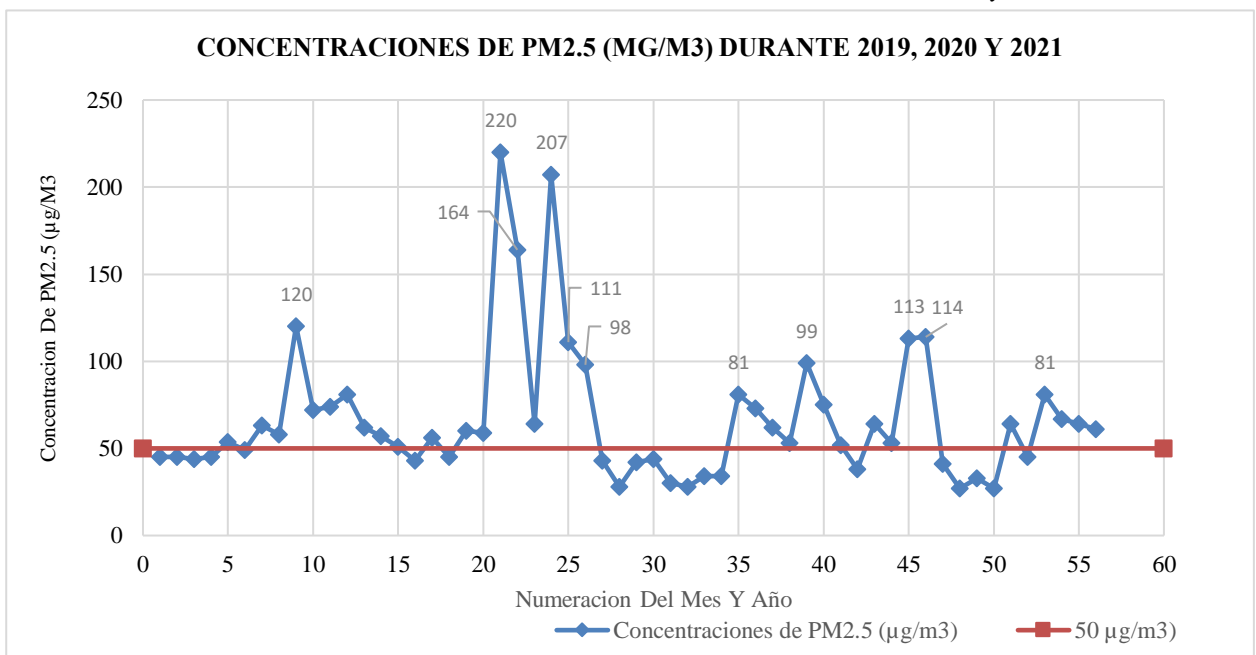
más idónea determinado en porcentaje de TiO_2 , que no perjudique la resistencia mecánica en compresión del adoquín fabricado.

1.1.2 Descripción del problema

Durante los últimos años la construcción sostenible está siendo de gran importancia, debido a que los proyectos actualmente se ejecutan ya sea con un ahorro de consumo de energía o que obtienen instalaciones de energías renovables; inclusive algunos que cuentan con sistemas de manejo de residuos, estos resultan para los clientes un producto totalmente atractivo y rentable (Casanova, 2009), parte de la responsabilidad de los constructores, hoy en día, es utilizar los recurso de manera responsable, es por ello que utilizar materiales de construcción ecoamigables podría resultar como una de las tantas soluciones para ayudar a cuidar el medio ambiente, teniendo en cuenta que la calidad del aire genera problemas de salud pública.

La ciudad de Arequipa tiene una estación fija en la Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental en la Av. Los Incas donde durante los años 2019. 2020 y 2021 reportó valores de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ muy por encima de la concentración que recomienda la OMS de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas, además menciona no exceder en más de 7 veces al año, lo cual en la ciudad de Arequipa se reportaron casos de exposiciones mayores a $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ y más de 7 veces al año, estos valores se muestran en el gráfico 1. donde sobrepasan los parámetros.

Gráfico 1. Concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ durante los años 2019, 2020 y 2021

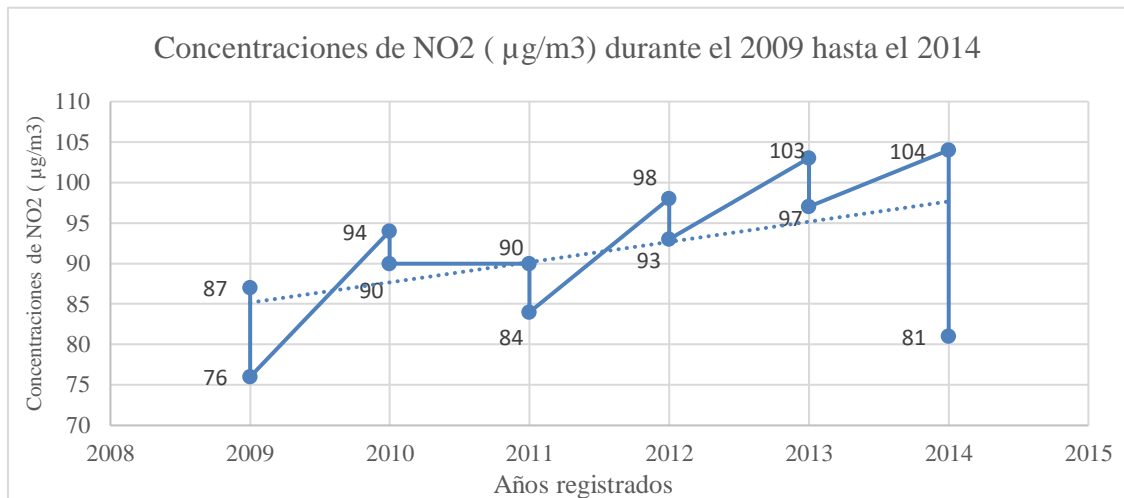


Fuente: Elaboración propia

En diciembre del 2019 se reportó $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en enero del 2020 se reportó hasta $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el 2021 se llegó hasta $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en marzo, estos valores han ido en decadencia debido a la cuarentena debido al COVID-19, sin embargo, aún cuando las personas permanecieron en sus casas, hubieron reportes que superaban el límite recomendado, los datos históricos del gráfico 1 se encuentran en el Anexo I.1, donde se visualiza el mes y año que corresponde al eje x.

Estas partículas (PM2.5) que contienen diversos componentes entre ellos los óxidos de nitrógeno NOx quienes son provocadas por el exceso de autos, taxis, la falta de gestión en la ejecución de un sistema de transporte integral además de la pésima organización de las rutas que son las que provocan entre otras al menos que 15,000 personas sufran de enfermedades respiratorias y cardiovasculares como consecuencia de la contaminación ambiental en la capital (Diario Gestion, 2019), y lamentablemente, la realidad ambiental de Arequipa, es similar, en septiembre del 2014 se reportó $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración de NO₂ en el aire reportada por la estación de medición de San Lázaro Anexo I.2, este dato se encuentra por encima del promedio anual según los estándares peruanos de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según el DS N° 003-2017 MINAM que se muestra en la figura 3, si bien este valor no excede en más de 4% podría ser debido a que la data es del 2014 y según la línea de tendencia del gráfico es ascendente entonces se puede concluir que efectivamente para el 2019, 2020 inclusive el presente año se tenga valores que superen en mayor porcentaje, sin embargo si este valor se compara con los estándares internacionales como la que recomienda la OMS de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual y de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 1h que debido a ser un gas tóxico ocasiona una infección en las vías respiratorias (Organizacion Mundial de la Salud, 2018), se registra valores más del doble para el 2014, por lo tanto los estándares internacionales son más riguroso, si se rige en base a estándares internacionales entonces Arequipa sobrepasa en más del doble estos parámetros, en el gráfico 2 se muestra la calidad del aire en la ciudad de Arequipa evidenciando su línea de tendencia ascendente como también valores que superaron los límites de calidad del aire.

Gráfico 2. Concentraciones de NO₂ durante 2009 hasta 2014 en Arequipa-Estacion San Lazaro



Fuente: Elaboración propia

El problema de la calidad del aire dentro de sus fuentes de emisión se encuentran las fuentes fugitivas a las calles pavimentadas, construcción, demolición y en fuentes móviles a los de carros, de este modo la industria de la construcción está vinculada directamente con la calidad del aire, como se puede observar en calles del cercado de Arequipa en la figura 1, se evidencia su contaminación en las principales avenidas de Arequipa, además estos gases nocivos no solo llegan a contaminar superficies que están en contacto directo, sino también otras estructuras como se observa en la figura 2, separadores de vía con hollín de la misma manera los adoquines de tránsito, paredes de sillar notoriamente manchadas, inclusive las plantas muestran que en sus superficies albergan hollín.

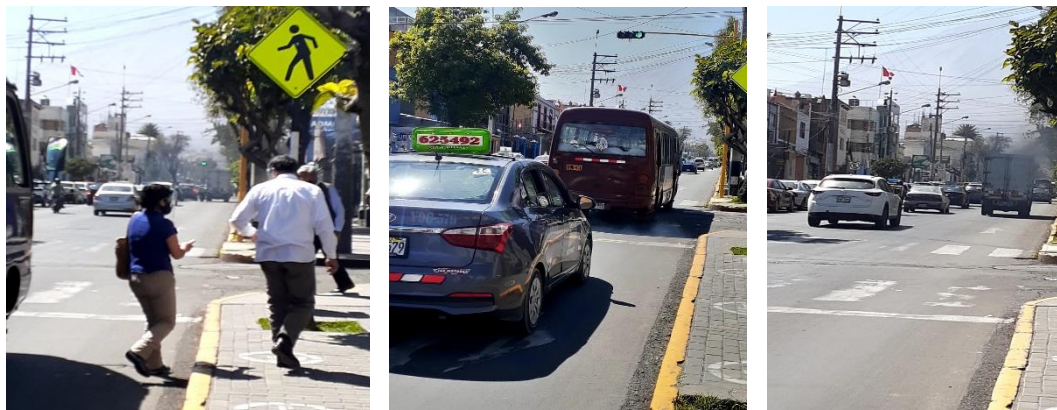


Figura 1. Imágenes de la Av. Independencia expuestas a contaminación ambiental por emisión del parque automotor. Fuente: Elaboración propia



Figura 2. Superficies contaminadas por NO_x (Óxidos de Nitrógeno) y Hollín. Fuente: Elaboración propia

Además conforme las ciudades van desarrollándose también aumenta su tasa de crecimiento poblacional, al 2020 el Perú es el 7mo país más poblado en América con una tasa de 1.7% (INEI, Estado de la Poblacion Peruana 2020, 2020); la ciudad de Arequipa alberga al menos 1 millón y medio de habitantes y es considerada como la segunda ciudad con mayor población del país, además de tener un aspecto muy particular, parecido a la forma de un "plato hundido", característica que imposibilita la dispersión vertical y horizontal de los agentes contaminantes, a consecuencia de tal característica las partículas quedan suspendidas en la atmósfera, en vista de ello existe la necesidad de investigar en nuevas soluciones para resolver el problema de contaminantes, en especial de los óxidos de nitrógeno (NO_x), que afectan a la salud de muchas personas que están en circulación en medio de la contaminación ambiental, que genera irritación de ojos, nariz, garganta por mencionar algunos, el Perú cuenta con estándares de calidad del aire según el DS N° 003-2017-MINAM, el cual consta de criterios y periodos de exposición, como se observa en la figura 3.

ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AIRE
DECRETO SUPREMO N° 003-2017-MINAM

PARÁMETROS	PERÍODO	VALOR [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	CRITERIOS DE EVALUACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS [1]
Benceno (C_6H_6)	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO_2)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras ($\text{PM}_{2.5}$)	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM_{10})	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual	
Mercurio Gaseoso Total(Hg) [2]	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman. (Métodos automáticos)
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O_3)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM_{10}	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM_{10} (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	
Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

NE: No Exceder.

[1] μ método equivalente aprobado.

[2] El estándar de calidad ambiental para Mercurio Gaseoso Total entrará en vigencia al día siguiente de la publicación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, de conformidad con lo establecido en la Séptima Disposición Complementaria Final del presente Decreto Supremo.

Figura 3. Estándares de la calidad ambiental del aire en Perú.

Tomado de: “El peruano, E. (7 de junio de 2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental. pág. 4”

Diversos estudios epidemiológicos, han podido demostrar en niños que sufren de asma que los síntomas de bronquitis aumentan su enfermedad en relación directa con la exposición dilatada frente NO_2 . La disminución de las funciones pulmonares también se relaciona con la exposición a las concentraciones de NO_2 estas se registran actualmente en ciudades europeas y norteamericanas (OMS, 2018), las personas que están expuestas diariamente a más altas concentraciones que las permitidas podrían mostrar consecuencias como se muestran a continuación en la figura 4.

Cabe mencionar que la Organización Mundial de la Salud (OMS) en las “Guías de calidad de aire” indican que cuatro de los contaminantes que causan más daño a la salud

publica son: material particulado (PM), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) (Rojas, Pacsi, Sanchez-Ccoyllo, & Perales , 2019).

Daños que produce a la salud la contaminación del aire:		
Contaminante	Origen	Efectos sobre la salud
Monóxido de Carbono (CO)	Combustión Incompleta	Disminuye la absorción del oxígeno en las células rojas, afecta la percepción y la capacidad de pensar, disminuye los reflejos y puede causar inconciencia. Afecta el crecimiento fetal en mujeres embarazadas. Genera enfermedades en personas con problemas respiratorios, circulatorios y el agravamiento de los problemas cardiovasculares.
Benceno y otros hidrocarburos (C6H6)	Combustión Incompleta o Evaporación	Irritación de los ojos, cansancio y tendencia a toser. Puede tener efecto carcinogénico, así como causar enfermedades pulmonares.
Material Particulado (PTS)	Combustión incompleta	Puede iniciar enfermedades respiratorias (afectando más a niños y ancianos) afecta a los pulmones
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	Altas temperaturas de combustión	Irrita los ojos, nariz, garganta y causa dolores de cabeza.
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Contenido de azufre en el diesel y fundición de minerales	Irrita las membranas del sistema respiratorio y causa inflamación en la garganta y alergias sobre el sistema inmunológico.
Ozono (O ₃)	Reacción de gases NOx y HC con la luz solar	Produce alergias del sistema inmunológico, efectos irritantes y además sobre a piel y los tejidos mucosos de los ojos, nariz y garganta.

Figura 4. Daños que ocasionan los contaminantes más comunes del aire

Tomado de: “Gerencia Regional de Salud Arequipa”,

<http://www.saludarequipa.gob.pe/unidades-organicas-3/dir-ejec-de-salud-ambiental/ecologia-proteccion-del-ambiente-y-salud-ocupacional/vigilancia-de-la-calidad-del-aire/>

En la ciudad de Arequipa dentro de las tasas de mortalidad que informa el MINSA para el 2018 se encontró que las 3 principales causas de las muertes en la región son a causa de neumonía, enfermedades pulmonares y cirrosis del hígado entre otras no especificadas, para el 2019 las 3 primeras causas se mantienen como se muestra en la gráfica siguiente, estas enfermedades guardan relación con la calidad del aire, ya que estas partícula menores a 2,5 micrómetros de diámetro viajan por las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones alojándose dentro de los alveolos donde causan enfermedades respiratorias, rinitis alérgica entre otras. Es por ello que es de suma importancia la calidad del aire ya que como seres

humanos la continuidad de nuestra existencia es en parte gracias al oxígeno que respiramos y su preservación es responsabilidad de todos.

Gráfico 3. *Tasas de mortalidad de enfermedades más comunes en Arequipa*

CÓDIGO-Enfermedad	2018	2019
J189 Neumonía	10.9%	11.7%
J841 Enfermedades pulmonares	6.4%	6.9%
K746 Cirrosis del Hígado y las no especificadas	4.5%	3.9%

Fuente: Elaboración propia

1.1.3 Formulación del problema

¿Cuál es el porcentaje más adecuado de dióxido de titanio respecto al peso de cemento HE Yura añadida a la mezcla convencional de concreto, que permita mantener o mejorar las propiedades físico-mecánicas y propiedad autolimpiante aplicado en la fabricación de adoquines tipo II?

1.2 Justificación e importancia

1.2.1 Justificación científica

El dióxido de titanio al aplicarse como material aditivo directamente en la mezcla del concreto de cemento Portland ayuda a aminorar las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NOx) que se encuentran en el aire que respiramos, mediante un proceso fotocatalítico. Según investigaciones y papers científicos se verifica la validez de sus resultados, es importante mencionar, que existen diversas variables que podrían modificar la capacidad fotocatalítica del concreto autolimpiante, como la calidad del aire, humedad, temperatura, etc.

Con la presente investigación se espera obtener recientes y nuevos conocimientos acerca de la influencia del dióxido de titanio como agente fotocatalizador, sobre la mezcla de concreto para adoquines tipo II, y se verificará si existe alguna variación en la resistencia máxima a la compresión uniaxial, el cual es la propiedad primordial y parámetro de calidad para el diseño del concreto.

1.2.2 Justificación técnica-práctica

En Arequipa, estadísticas muestran que durante 2019 la venta anual de cemento fue de 764 694 ton/año, siendo el tercer departamento con mayor número de ventas después de

Lima y la Libertad (INEI, 2019) con un aumento del 2.66% respecto al 2018 de 744 891 ton/año. Es evidente que existe una demanda y necesidad de este material para la elaboración de concreto el cual preste un buen desempeño y que además pueda abarcar la propiedad autolimpiante con la adición de TiO_2 y en consecuencia los costos de mantenimiento serían mucho menores debido a su propiedad autolimpiante que impide tener la cara expuesta manchada, además el concreto obtendría una funcionalidad novedosa el ser fotocatalítica debido a la degradación de compuestos como NO_2 , con ello es sostenible para el medio ambiente; de esta manera se utiliza de manera eficiente los recursos que se tiene en la construcción, lo cual en la actualidad no ocurre debido al desconocimiento de como el TiO_2 influye en la aplicación de pavimentos que está en contacto directo con las emisiones de gases de NO_x emitidos por el parque automotor (Vásquez, 2016).

1.2.3 Justificación personal

Estas investigaciones permitirán el desarrollo sostenible en la construcción, no solo de nuestra ciudad, sino del Perú así mismo se podrán obtener nuevos conocimientos acerca de la influencia del TiO_2 en adoquines tipo II de concreto a escala real, analizando su capacidad autolimpiante, y si esta adición modifica sus propiedades tal como la resistencia a la compresión.

La construcción sostenible es responsabilidad no solo del cliente, gobierno y otros actores, es también responsabilidad de los constructores de proponer nuevos procesos y de las universidades impulsar a sus alumnos de resolver problemas sociales mediante la investigación.

1.3. Delimitación de la Investigación

La presente investigación se realizó con los agregados de la cantera “El Ángel” y “San Miguel”, ubicada en la Vía Interoceánica- La Joya Arequipa, por tanto, los resultados se pueden aplicar a estas canteras. En cuanto al recurso agua se utilizó agua potable de la ciudad de Arequipa sector Rio Seco, siguiendo la norma NTP 339.088, el curado utilizado será el curado húmedo.

Durante el 2021 se realizó la presente investigación, la información obtenida de las Normas Técnicas Peruanas, Normas Internacionales, ASTM, UNI o recomendaciones ACI, son las actuales y vigentes para ese año. Asimismo, como proceso natural las tipologías de los agregados pueden ir variando a través del tiempo.

La investigación se limitó a determinar la resistencia a la compresión y la propiedad autolimpiante de los adoquines de concreto con adición del fotocatalizador dióxido de titanio para pavimento articulado específicamente el adoquín Tipo II.

No se realizaron ensayos para determinar la resistencia a la tracción por flexión debido a que la norma actual NTP 399.611 (2017) UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS, no considera este ensayo en los requisitos físicos; sin embargo, dentro de la gestión de la calidad en las empresas de fabricación de adoquines si realizan el ensayo de resistencia a la tracción por flexión basándose en la normativa ITINTEC 339.124 (1988) ADOQUINES DE CONCRETO REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO, este ensayo no ha sido actualizado hace más de 30 años y su procedimiento del ensayo no es de carácter comercial. Así mismo, según la experiencia de las empresas fabricantes de adoquines menciona que existe una alta probabilidad de cumplir con este parámetro posterior al ensayo de resistencia de compresión.

1.4 Limitaciones de la investigación

Durante la investigación, no se tuvo limitaciones.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar el porcentaje más adecuado de dióxido de titanio respecto al peso de cemento HE Yura añadida a la mezcla convencional de concreto, que permita mantener o mejorar las propiedades físico-mecánicas y propiedad autolimpiante aplicado en la fabricación de adoquines tipo II de resistencia 420 kgf/cm².

1.5.2 Objetivos específicos

Determinar la influencia de adicionar TiO₂ en porcentajes de 0, 3, 7 y 12%, respecto al peso de cemento, a la mezcla de concreto para evaluar su resistencia mecánica a la compresión uniaxial.

Determinar la influencia de adicionar TiO₂ en porcentajes de 0, 3, 7 y 12%, respecto al peso de cemento, a la mezcla de concreto para evaluar su propiedad autolimpiante, mediante la prueba de Rodamina B – coloración del concreto.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Al utilizar el dióxido de titanio de 0, 3, 7 y 12% respecto al peso de cemento HE Yura añadida a la mezcla convencional de concreto, permitirá optimizar las propiedades físico-mecánicas y propiedad autolimpiante aplicado en la fabricación de adoquines tipo II de resistencia 420 kgf/cm².

1.6.2 Hipótesis específica

Al utilizar el TiO₂ en porcentajes de 0, 3, 7 y 12% respecto al peso de cemento, la mezcla de concreto no será perjudicada en el ensayo a la resistencia mecánica a la compresión uniaxial.

Al utilizar el TiO₂ en porcentajes de 0, 3, 7 y 12%, respecto al peso de cemento, la mezcla de concreto se optimizará la propiedad autolimpiante con respecto a las demás, mediante la prueba de Rodamina B – coloración del concreto.

1.7 Variables de la investigación

1.7.1 Variables dependientes

Tabla 1. *Variable dependiente: Resistencia a la compresión*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	Se puede precisar como la máxima capacidad de carga que puede resistir un material previo a alcanzar su límite de ruptura.	Se elabora adoquines de concreto con adición e dióxido de titanio (TiO ₂) en proporciones de 0, 3, 7 y 12% del peso de cemento.	Ensayo a la Resistencia a la compresión NTP 399 604 y NTP 399 611	Carga máxima de rotura	kgf
				Longitud (L)	cm
				Ancho (A)	cm
				Altura (H)	cm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Variable dependiente: Capacidad Fotocatalítica

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS
CAPACIDAD FOTOCATALÍTICA	La capacidad fotocatalítica se puede precisar como la reacción catalítica que comprende la absorción de luz por parte del catalizador.	Se elabora adoquines de concreto con adición e dióxido de titanio (TiO ₂) en proporciones de 0, 3, 7 y 12% del peso de cemento.	Ensayo de decoloración Rodamina B referencia UNI 11259	Observación de Decoloración de 3 días en presencia de gases contaminantes de la Av. Independencia.	Fotografías

Fuente: Elaboración propia

1.7.2 Variables independientes

Tabla 3. Variable independiente: % de dióxido de titanio

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS
% DIÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂)	Es una molécula que contiene Titanio el cuál es el agente catalítico y Oxígeno, estos están en forma de cristales pigmentados, cuya presentación es en forma de polvo blanco.	Se elabora adoquines de concreto con adición e dióxido de titanio (TiO ₂) en proporciones de 0, 3, 7 y 12% del peso de cemento.	Optimización del % de dióxido de titanio TiO ₂	Porcentaje.	%

Fuente: Elaboración propia

1.8 Metodología de la investigación

1.8.1 Diseño de la Investigación

De acuerdo al propósito de la investigación es de carácter experimental cuantitativa para la variable dependiente resistencia a la compresión y cualitativa para la variable dependiente capacidad fotocatalítica con rodamina B.

1.8.2 Diseño del experimento

Para la elaboración de los adoquines de concreto se elaboraron en las instalaciones del laboratorio CEDIICON ubicado detrás de la concretera ECOCRET en la ciudad de Arequipa sector Rio Seco, los agregados se obtuvieron de la cantera “El Ángel” para el confitillo que está ubicada en la carretera Cerro Verde a 0.50 km de la intersección con la carretera Interoceánica Sur 34° por otro lado la cantera” San Miguel” para la obtención de la Arena Gruesa ubicada en Vía Interoceánica Sur 34° en el kilómetro Km 7+300 en la Joya, por lo que los resultados se limitan a ser aplicables para tales canteras.

La elaboración del diseño de mezcla es mediante el método empírico de prueba y error para el diseño patrón tratamiento 0% de TiO_2 , a partir de esta dosificación se halla los % de TiO_2 en 3, 7 y 12% en relación al peso de cemento; el diseño base es por parte de la concretera ECOCRET de prefabricados y previas investigaciones detalladas en el apéndice A, tomando en cuenta los datos de las hojas técnicas en el caso de cemento HE-Yura, dióxido de titanio-Anatase y EUCOLITH.

Para la variable resistencia a la compresión se emplearon 3 muestras para cada ensayo a las edades de 3,7 y 28 días haciendo un total de 36 muestras y 12 muestras para el ensayo de decoloración de rodamina propiedad autolimpiante, entonces se procedió a elaborar las 48 muestras para analizar las variables como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 4. Cantidad de probetas elaboradas para cada variable de análisis

Ensayos	Tratamiento con % de TiO_2				Total
	0%	3%	7%	12%	
Resistencia a la compresión (3,7 y 28 días)	9	9	9	9	36
Propiedad Autolimpiante (capacidad fotocatalítica)	3	3	3	3	12
				Total	48

Fuente: Elaboración propia

Antecedentes a la investigación tomaron porcentajes que van desde un 3% hasta un 7% donde obtuvieron óptimos resultados de la propiedad autolimpiante por lo que estos porcentajes fueron la base sin embargo se tomó un porcentaje mayor para poder demostrar si el aumento en la cantidad del fotocatalizador es proporcional a la propiedad autolimpiante.

Cabe aclarar que, el diseño de mezcla base empleado como punto de inicio forma parte de la base de datos de la empresa por lo que son protegidos como secreto empresarial bajo reserva y no forman parte de la publicación de esta investigación.

1.8.2.1 Elaboración de los adoquines de concreto

La elaboración de los adoquines de concreto para pruebas de compresión de dimensiones de 200mm x 100mm x 60mm, se realizó los procedimientos indicados siguiendo la Norma NTP 399.611 y NTP 399.604, esta indica que la resistencia a la compresión debe ser ejecutado sobre todo el adoquín con una carga perpendicular, es necesario que la base sea uniforme por lo que se le adicionó capping de azufre siguiendo la norma ASTM C 617 para lograr la uniformidad de la cara en contacto.

1.8.2.2 Dosificación y Mezcla de los Materiales

Para la elaboración de los adoquines, el primer proceso es dosificar los materiales de acuerdo al diseño de mezcla planteado para los diferentes tratamientos, esto se hizo en dos partes, primero se mezcló manualmente el cemento con los agregados y el dióxido de titanio con la respectiva dosificación, para posteriormente ir agregando el agua de manera progresiva hasta usar el 85% de agua ya que el otro 15% se disolvió el aditivo EUCOLITH en la proporción de 0.2% del peso del cemento (W_c) como se muestra en la parte superior izquierda de la figura 5, finalmente se sigue con la mezcla por unos minutos para depositar la mezcla en los moldes de la máquina productora de Adoquines.



Figura 5: Fases de producción de los adoquines en campo. Fuente: Elaboración propia.

Se espera a que el operador habilite la máquina para llenar la mezcla en los moldes como se muestra en la figura 6. seguido de ello se enrasó los moldes con una paleta plana para no tener excesos en los moldes.



Figura 6: Llenado y enrase de los moldes de adoquines. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, por proceso de vibro compactación se obtienen los adoquines en tandas de 14 unidades como se observa en figura siguiente, este proceso se repitió para cada uno de los 4 tratamientos de 0, 3, 7 y 12% de TiO_2 .



Figura 7: Proceso de vibro compactación de los adoquines. Fuente: Elaboración propia.

Después de terminar la labor de fabricación de adoquines se trasladaron las unidades a un lugar amplio donde durante 7 días recibió el curado húmedo rociando agua tipo lluvia sobre la muestra y tapándolas con una cubierta plástica para mantener la humedad interior y con ello lograr la resistencia requerida.

1.8.2.3 Curado de las muestras de concreto.

El curado es el proceso de mantener un contenido de humedad y temperatura adecuados en el concreto durante un período de tiempo inmediatamente después de la colocación para que se desarrollen las propiedades deseadas. El curado tiene una gran influencia en las propiedades del concreto endurecido; un curado adecuado aumentará la durabilidad, la resistencia a la compresión, la resistencia a la abrasión etc.

Cuando el cemento Portland se mezcla con agua, tiene lugar una reacción química llamada hidratación. La medida en que se completa esta reacción influye en la resistencia y durabilidad del concreto, este mezclado normalmente contiene más agua de la necesaria para la hidratación del cemento; sin embargo, la pérdida excesiva de agua por evaporación puede retrasar o impedir una hidratación adecuada. La superficie es particularmente susceptible a

una hidratación insuficiente porque se seca primero. Si las temperaturas son favorables, la hidratación es relativamente rápida los primeros días después de la colocación del concreto; sin embargo, es importante que el agua quede retenida en el concreto durante este período, es decir, que se evite o se reduzca sustancialmente la evaporación. Con un curado adecuado, el concreto se vuelve más fuerte, más impermeable y más resistente. Sin embargo, la falta de curado podría causar la pérdida de la resistencia del adoquín, a pesar de usar cementos de altas resistencias.

Este proceso se inicia con el tendido de los adoquines para hacer el curado húmedo de las unidades ya que si se realiza de manera directa con manguera podrían desmoronarse y ello debilitaría la unidad y no sería aceptado por el control de calidad.

El curado de los 48 adoquines de concreto se realizó bajo la aplicación de agua tipo lluvia llamado curado húmedo, previamente apilados de 4, este es el procedimiento más común, se esparció agua durante 7 días y 2 veces por día rociando el agua sobre los adoquines para posteriormente cubrirlos con manta para mantenerlos húmedos y el agua no se evapore, este curado se hizo por ser tradicional del concreto como se observa en la figura 8.

Existe otras metodologías donde el curado es después de las 24 horas aplicando agua tipo lluvia y cubriéndolo con polietileno estos adoquines previamente apilados, en el caso de otras empresas fabricantes estiban los adoquines a andamios metálicos de 08 pisos donde los llevan por 24 horas a cuartos de curado donde se les inyecta agua pulverizada, para posteriormente llevarlas a parihuelas y su almacenaje para la venta.



Figura 8: Curado húmedo de los adoquines. Fuente: Elaboración propia.

1.8.2.4 Almacenamiento

La zona de almacenamiento debe ser suficiente para no tener a los adoquines apilados unos sobre otros y de esta manera no serían curados uniformemente, además debe de estar cubierta para mantener la humedad correcta y no perjudicar a la resistencia.

1.8.2.5 Ensayo de la resistencia a compresión.

La resistencia a la compresión de la muestra se calculó de la división entre la máxima carga obtenida del ensayo y el área de la cara del adoquín en contacto con la carga, el parámetro área se corrigió debido a que las medidas de los lados del adoquín no son totalmente regulares es por ello que se tomó medidas del largo, ancho y altura de las muestras, estos datos se encuentran en el anexo D, donde se procesó los datos, calculados en promedio para hallar el área promedio el cual es el divisor para hallar la resistencia de las muestras de adoquín. Los resultados al ensayo a la compresión que resulten pueden depender de la pasta de cemento, los procedimientos de mezcla, la elaboración, la forma y tamaño del espécimen, la edad, homogenización de la superficie y el parámetro de humedad durante el proceso de curado entre otros.

El proceso para determinar la resistencia a compresión de los 36 adoquines de concreto, se obtuvo siguiendo las consideraciones del ensayo de resistencia a compresión que se describen en la norma NTP 399.611 y NTP 399.604.

Para la uniformización de la superficie de los adoquines se usó capping o refrentado de Azufre para que este en contacto con los cabezales metálicos del equipo, con el fin de evitar fallas locales por concentración de esfuerzos, figura 9. se aprecia los refrentados de azufre.



Figura 9: Refrentados con azufre en las superficies de los adoquines fotocatalíticos. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se tienen los adoquines listos para ensayar, se procede a colocar el capping de azufre por lo menos 3 horas antes, esta servirá para la uniformización de la superficie en contacto con la máquina como se observa en la figura 10. Al término del ensayo se procede a retirar el adoquín y la limpieza de la máquina para reiterar el ensayo hasta ensayar los 36 especímenes, en la figura 9 se muestra el antes de ensayarlo como el después para su eliminación.



Figura 10: Adoquines con capping de azufre. Fuente: Elaboración propia.

1.8.2.6 Capacidad Fotocatalítica- Degradación de colorante Rodamina

Pasados los 28 días, los adoquines son aptos para el ensayo de decoloración de la rodamina, para ello se utilizaron 3 adoquines de muestra para cada uno de los 4 tratamiento de 0, 3, 7 y 12% de TiO_2 con dimensiones de (20x10x6) cm cada adoquín, un total de 12 muestras.

En la superficie de los adoquines se agregó la concentración de 0.3 gr de rodamina disuelta en 120 gr de agua destilada, esta solución como se muestra en la figura 11 fue combinada en un vaso medidor.



Figura 11: Combinación de la rodamina con agua destilada. Fuente: Elaboración propia.

El ensayo comenzó a las 11:20 am con la acomodación de los adoquines como se observa en la figura 11 lado izquierdo, que fueron extendidos en la Av. Independencia a 2m de la vía asfaltada con el fin de ser expuestos a los gases contaminantes propios del lugar, se procedió a rociar en 2 manos de 10 toques sobre los adoquines en el centro de la superficie un área circular de 22 cm², se aplicó el pigmento de rodamina B para exponer los adoquines a los rayos UV in situ en la Av. Independencia a diferentes temperaturas por 3 días este lugar fue elegido debido a la alta cantidad de contaminantes ambientales que en el ensayo es fuente de los gases contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) a temperaturas ambiente de 21°C y 22°C. Además de contar con la luz solar sin interrupción y estar cerca a la vía pavimentada, seguidamente se tomó fotografías una vez al día a la misma hora para observar la decoloración mediante análisis cualitativo y así comprobar su capacidad autolimpiante en referencia a la norma internacional UNI 11259 y la investigación de la universidad Piloto de Colombia, que en la tesis titulada “Evaluación de las propiedades fotocatalíticas de prefabricados para obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio (TiO₂)”, la cual plantea la metodología de degradación de colorante Rodamina B in situ, como fue aplicada en la presente investigación .



Figura 12. Adoquines antes y después de aplicación del colorante Rodamina B. Fuente: Elaboración propia.

1.8.3 Método y tipo de la investigación

Según su método es hipotético-deductivo ya que por medio de las observaciones realizadas de un modelo en particular se plantea un problema, se tiene cuatro criterios los cuales se define el tipo de investigación ejecutada como se describe en la tabla siguiente.

Tabla 5. Criterios y tipo de Investigación

Criterio	Tipo de Investigación
Finalidad	Aplicada
Objetivo	Descriptiva
Diseño	Experimental
Contexto	Campo y Laboratorio

Fuente: Elaboración propia

1.8.4 Población, muestra y la unidad

- Población: Adoquines de concretos fabricados en la ciudad de Arequipa con el uso de agregados de la cantera El Ángel y San Miguel de la ciudad de Arequipa.
- Muestra: 36 adoquines adicionados con dióxido de titanio para ensayos de Resistencia a la compresión y 12 adoquines adicionados con dióxido de titanio para el ensayo de capacidad fotocatalítica, con agregados de la cantera El Ángel y San Miguel de la ciudad de Arequipa.
- Unidad de Análisis: Son cada uno 36 adoquines adicionados con dióxido de titanio para ensayos de Resistencia a la compresión y cada uno de los 12 adoquines adicionados con dióxido de titanio para el ensayo de capacidad fotocatalítica de la cantera El Ángel y San Miguel de la ciudad de Arequipa.

1.8.5 Técnicas e instrumentos para la recopilación de datos

- Revisión del material bibliográfico
- Revisión de artículos científicos
- Análisis documental
- Observación experimental

El método cualitativo se utilizó para medir la capacidad fotocatalítica mediante la observación experimental, según bibliografía encontrada se realizó dicha determinación.

1.8.6 Análisis de la información

La toma y recopilación de los datos se agruparon por medio del uso de cuadros y gráficos, tablas de doble entrada por su necesidad, formatos de laboratorio, panel fotográfico etc. La información de la variable cuantitativa fue procesada y analizada, en el caso de la información de la variable cualitativa se analizó de acuerdo a la observación experimental la degradación del colorante rodamina B.

1.8.7 Equipos y materiales

Equipos

- Balanza de capacidad de 22 kg y precisión 0,1g.
- Balanza de capacidad de 4100 gr y precisión 0,01g.
- Máquina de ensayo universal a la compresión marca ELE.
- Máquina a motor Eléctrico para fabricar bloques y adoquines.
- Carretilla
- Vaso medidor Pírex

Materiales:

- Agregado fino de la cantera “San Miguel”. - El agregado cumple con la norma NTP 400.037.
- Agregado grueso de la cantera “El Ángel”. - El agregado cumple con la norma NTP 400.037
- Dióxido de titanio TiO₂ (bolsa de 25 kg): Fase Anatase
- Agua potable del Sector Rio Seco.

- Cemento HE- Yura (bolsa de 42.5 kg)
- Rodamina B (bolsa de 500gr)
- EUCOLITH (4 Litros).- El aditivo químico usado es el TiO_2 (dióxido de titanio) y el aditivo líquido EUCOLITH R plastificante para los bloques de concreto.
- Agua destilada (1 galón).- Necesaria para disolver la Rodamina B

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes de la investigación

La aparición por vez primera del dióxido de titanio se remonta a los años de 1997, este se inició como aditivo fotocatalítico a los hormigones, años después se patentó en el año 2000; durante el mismo año debido al gran auge de este material se comenzaron los ensayos con la incorporación de diversos fotocatalizadores para investigar una nueva propiedad, la autolimpiable del dióxido de titanio. En ese momento, se agregó en poca cantidad el dióxido de titanio con el objetivo de lograr el mismo efecto que las gafas fotocatalíticas actúan frente las nieblas (propiedades humectantes), se quería poder simular este mismo efecto en materiales de construcción.

Andrea Folli, en su tesis doctoral titulada: “Fotocatálisis TiO_2 en sistemas de cemento Portland: Fundamentos de los efectos autolimpiable y mitigación de la polución del aire” concluyó: “El concreto autolimpiable proporciona una estrategia eficiente para obtener de manera simultánea: la autolimpieza de las fachadas de los edificios, el retraso de la superficie natural de envejecimiento, así como la mitigación de la contaminación del aire. Las mediciones en el laboratorio dieron buenos resultados para la purificación del aire, como la reducción de NO_x ” (Folli, 2010, pág. 169)

María Christina Burton en su tesis magistral titulada: “El concreto permeable con dióxido de titanio como fotocatalizador compuesto en carreteras sostenibles con el medio ambiente” concluyó: “Debido a que el pavimento tiene un área de gran superficie que está en contacto con el aire contaminado, el tratamiento de pavimentos con TiO_2 redujeron las emisiones nocivas a nivel de calle y beneficiaron a una vida más limpia medio ambiental para el público” (Burton, 2011: 125).

2.2 Antecedentes de concreto fotocatalítico

En Arequipa, Perú el concreto fotocatalítico no es un tema muy común el realizar estudios de investigación que contribuyan a la construcción sostenible, se ha encontrado investigaciones en la región de Cajamarca, Lima y Arequipa. En el sur del país la Universidad Nacional de San Agustín realizó investigaciones con TiO_2 con aplicación en limpieza de aguas de temas ambientales.

Países como Colombia, Brasil y México han desarrollado diversos estudios en los últimos años de concreto fotocatalítico que se detallarán a continuación.

En primer lugar, se citará una investigación realizado en la República Popular de China por Chengai Meng (2020) que se titula “Photocatalytic concrete paving block reinforced by TiO₂ nanotubes for NO removal”, el mismo que se centra en la comparación de adoquines con nanotubos y nanopartículas de dióxido de titanio, aplicada como una lechada en la superficie de las muestras, evaluando sus propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y abrasión así como su capacidad fotocatalítica, obteniendo los siguientes resultados:

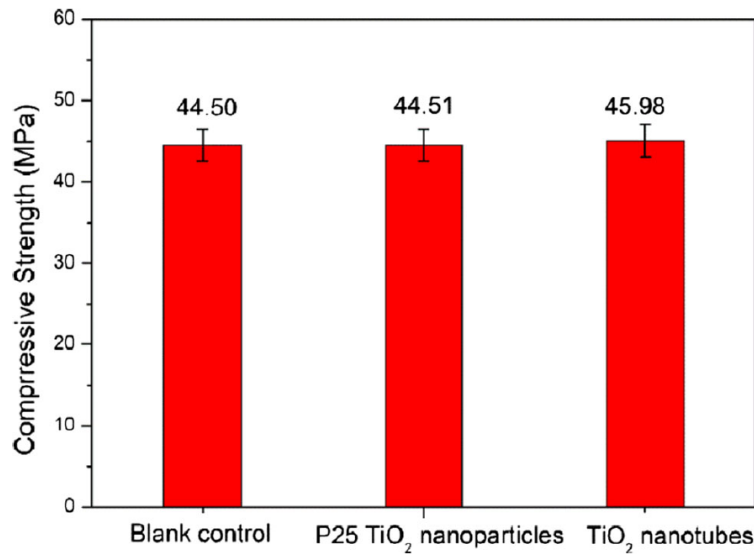


Figura 13. Resistencia a la compresión de las muestras con nanopartículas, nanotubos y en condiciones normales. Tomado de “Photocatalytic concrete paving block reinforced by TiO₂ nanotubes for NO removal, (Meng, Dong, Hao, & Ting, 2020)”

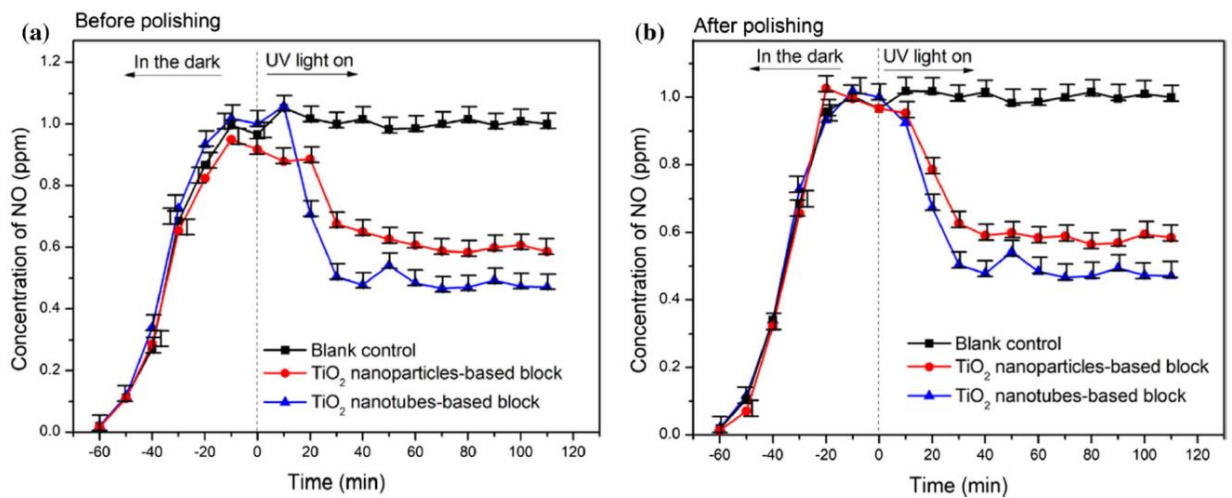


Figura 14. Curvas de variación de concentración en tiempo real de eliminación de NO sobre las muestras preparadas antes y después del pulido. Tomado de “Photocatalytic concrete paving block reinforced by TiO₂ nanotubes for NO removal, (Meng, Dong, Hao, & Ting, 2020)”

De esta investigación se obtuvieron relevantes conclusiones que los nanotubos de TiO_2 no solo contribuyen al refuerzo de las propiedades mecánicas del bloque de hormigón, sino también a la mejora del rendimiento fotocatalítico para NO_x auto purificación, además se puede observar estadísticamente que en comparación de los nanotubos y las nanopartículas existe una variación mínima entre ambos por lo que las nanopartículas también funcionan de manera eficiente tanto en resistencia como en capacidad fotocatalítica.

En Brasil también realizaron investigaciones en la Universidad Federal de Santa Catarina publicado por Lucas Torres de Rosso (2020), con título “Impact of incorporating recycled glass on the photocatalytic capacity of paving concrete blocks”, este se enfoca en mejorar la capacidad fotocatalítica de los adoquines adicionando vidrio reciclado, después de la incorporación de vidrio en el mortero se reduce la resistencia a la compresión de la matriz cementosa para los tamaños de partículas estudiados en las pruebas de eficiencia fotocatalítica, hubo un aumento de contaminante degradado con incorporación de vidrio de 46.2%, en el mortero superficie esta variación pudo alcanzar un 17.9%. Con estas conclusiones no se vio viable adicionar vidrio reciclado.

En Hong Kong, China en la Universidad Politécnica de Hong Kong por Guo, Tung-Chai Ling, Sun Poon (2015), la investigación titulada “Photocatalytic NO_x degradation of concrete surface layers intermixed and spray-coated with nano- TiO_2 : Influence of experimental factors”, en donde tiene como objetivo comparar la degradación del concreto de dos muestras con diferente tipo de adición del TiO_2 , la primera muestra tiene el TiO_2 es un porcentaje de la mezcla de concreto y en la segunda muestra el fotocatalizador es usado como un recubrimiento en spray, se concluye que aparentemente, el método de recubrimiento por pulverización es más eficiente en capacidad fotocatalítica que el primero, este podría explicarse por otorgar más partículas de TiO_2 en la superficie de las muestras preparadas por lo tanto, la mayoría de las partículas de TiO_2 tienen fácil acceso a la luz ultravioleta por estar en la superficie. A pesar de aumentar la capacidad fotocatalítica y tener una resistencia a la abrasión similar en ambas muestras comparadas, no se tiene investigaciones sobre la comparación en términos de resistencia a la compresión.

En Brasil en el 2015 se realizaron investigaciones en la Universidad de Sao Paulo, donde A.P Werle, M.L de Souza y R. Ando en su investigación titulada “The performance of a self- cleaning cool cementitious Surface” tuvo como objetivo demostrar la eficiencia fotocatalítica de tres tipos de TiO_2 del tipo de estructura: nanopartículas, las cuales son TiO_2

Anatasa P25 de Degussa, TiO₂ Anatase TiONA de Millennium, TiO₂ anatase IV de USNANO y estas están embebidas en la mezcla cemento, agua y dióxido de titanio en porcentajes de 0%, 5% (se tomó referencia de investigaciones previas) y 30% (se tomó el valor para contrastar el alto contenido de este fotocatalizador) de la cual se pudo concluir que es mayor la eficacia de fotodegradación en muestras que contenían TiO₂ que en la muestra de referencia. En este aspecto, se observaron mejores rendimientos fotocatalíticos para tintes de muestra con 30% de TiO₂ que es el más alto contenido, también es importante mencionar que el tipo P25 tuvo la mejor eficiencia fotocatalítica en la degradación del tinte rojo Congo.

En los Estados Unidos en la Universidad Estado de Washington los investigadores Shihui Shen, Maria Burton y Bertram Jobson realizaron estudios en el 2012 con título “Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment”, cuyo objetivo fue la comparación de diferentes métodos de aplicación de TiO₂ en la superficie de pavimento permeable, en los adoquines se evaluó la medida de la actividad fotocatalítica, la infiltración del concreto y la capacidad de resistir factores ambientales además es interesante que también hizo una evaluación del costo de (\$/ft²), finalmente en las conclusiones se observaron que las mayores reducciones de contaminantes se observaron con la mezcla protectora de entrada (DPM), el comercial a base de agua TiO₂ (CWB), el TiO₂ en agua (TIW), la lechada baja en cemento-agua (CWSL) y el recubrimiento PURETI (PUR), cada uno mostrando más del 95% de estática en la reducción de NO como se logra observar en la tabla siguiente.

Tabla 6. *Tipo de Recubrimiento, Reducción de NO y costo de material*

Table 4
Material cost for each coating type.

Coating type	Material cost		Observed pollutant reduction			
	Total material cost (\$/ft ²)	Total material cost (\$/m ²)	Static chamber (120 min)		Converted Static chamber (29.83 min) total% NO reduction	Decrease in infiltration rate (%)
			Total% toluene reduction	Total% TMB reduction		
Commercial water-based TiO ₂ (CWB)	0.9955	10.70	61.86 ± 14.06	94.64 ± 1.85	97.59	20.60
Cement-water slurry (CWSH)	0.1860	2.00	13.23 ± 1.62	81.65 ± 1.50	85.04	58.29
Driveway protector mix (DPM)	0.3876	4.17	61.65 ± 10.77	93.87 ± 1.09	97.92	30.49
Pureti (PUR)	0.1000	1.08	43.42 ± 1.79	89.50 ± 4.05	95.79	11.92
Cement-water slurry low (CWSL)	0.1655	1.78	78.82 ± 9.22	97.26 ± 0.63	96.94	51.50
Cement/aggregate mix (CAM)	0.3045	3.27	21.62 ± 4.30	68.28 ± 5.99	55.35	3.85
Cement/aggregate mix high (CAMH)	0.3030	3.26	-	-	81.03	-3.49

Fuente: Tomado de la investigación “Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for agreener urban road environment”, (Shen & Burtron, 2012)

En Hong Kong, durante el 2003 en The Chinese University of Hong Kong el profesor Jimmy Chai-Mei Yu hizo una investigación donde expusieron adoquines de hormigón revestidos con TiO_2 en condiciones ambientales durante 4 y 12 meses diferentes vías peatonales. La actividad fotocatalítica de los adoquines revestidos de TiO_2 disminuyeron en el tráfico peatonal intenso ya que los contaminantes se acumulan en la superficie, en cambio en las áreas no peatonales no afectaron significativamente la eliminación de NO_x actividad de los adoquines, además se concluye también que lavar los adoquines con agua no recupera completamente la actividad fotocatalítica ya que la superficie reactiva ya se perdió por la acumulación de polvo, suciedad, aceite, grasa e incluso se encontraron chicles desechados. Esta investigación es interesante ya que da una recomendación importante “Para utilizar plenamente su poder de eliminación de NO_x , se deben utilizar materiales fotocatalíticos en lugares con tráfico pesado de automóviles, pero lejos de la intrusión humana.” (Yu, 2004)

2.3 Estudios internacionales de concreto fotocatalítico en la construcción

En Colombia en la tesis de Carolina Hernández desarrollado en la Universidad Piloto de Colombia durante el 2019, su investigación titulada “Evaluación de las propiedades fotocatalíticas de prefabricados para las obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio TiO_2 ”, tuvo como objetivo evaluar las propiedades fotocatalíticas adicionando este fotocatalizador tales como resistencia y capacidad fotocatalítica, llegó a la conclusión que la adición de 5% en fase rutilo cumple la resistencia y muestra resultados óptimos en la capacidad fotocatalítica.

2.4 Estudios nacionales y locales de concreto fotocatalítico en la construcción

En Perú, en la ciudad de Cajamarca también se desarrollaron investigaciones con el TiO_2 , en la tesis de maestría de Manuel Vásquez Espinoza de la Universidad Nacional de Cajamarca en la investigación titulada “Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiante de concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$ ” en el 2016, esta investigación tiene como objetivo determinar la capacidad fotocatalítica en los porcentajes de 0%, 3%, 6%, 9%, 12% y 15% de dióxido de titanio del peso de cemento, a los ensayos de resistencia a la compresión, prueba de Rodamina y propiedad autolimpiante, se concluye de la investigación que dentro del rango de 3% y 6% - TiO_2 , está el tratamiento óptimo que cumple con los estándares de la resistencia de concreto, también recomienda usar el cemento blanco ya que este dejaría pasar la luz por lo cual se aprovecharía mejor el fotocatalizador.

En Cajamarca en la tesis de maestría de Carol Medina Salazar de la Universidad Nacional de Cajamarca en la investigación titulada “Optimización de las propiedades físico mecánicas del mortero autolimpiante C:A:A con dióxido de titanio” en el 2019, la cual tuvo como objetivo específico hallar el porcentaje más adecuado de dióxido de titanio y de la cantidad de agua para la optimización de las propiedades mecánicas y físicas como son la permeabilidad, absorción y resistencia a la compresión del mortero autolimpiante con una relación cemento-agua de C:A 1:5 con dióxido de titanio, finalmente concluye que el 3% es el tratamiento óptimo de TiO_2 con un 90% de agua efectiva por mostrar un equilibrio de las propiedades físico-mecánicas del mortero.

CAPÍTULO 3. PROCESO FOTOCATALÍTICO

3.1 El Titanio

El cuarto material más abundante del mundo es el titanio; los materiales que llevan la delantera son el aluminio, hierro y magnesio; además de ser el noveno elemento más abundante con un 0.63% de presencia en la corteza terrestre, este metal descubierto en Inglaterra en el siglo XVIII durante el año 1791 por William Gregor, años más tarde fue nombrado como titanio en honor a los titanes griegos por Martin Klaproth en 1795, ha sido desde entonces investigado para ser aprovechado en diversas aplicaciones.

La producción de titanio es obtenida mediante depósitos primarios y secundarios, raramente el rutilo es encontrado en depósitos primarios en cantidades aprovechables es mayormente encontrado en depósitos secundarios como playas que son áreas extensas o cerca de ellas (Mentado Almeida, 2010) . El titanio se encuentra como óxido en más de 45 minerales entre ellos destacan la ilmenita (fuente principal para obtener el titanio), rutilo, anatasa, leucoxeno y titania por tener viabilidad económica y comercial.

3.2 Dióxido de titanio TiO₂

El dióxido de titanio (TiO₂), entre varios catalizadores semiconductores, es el fotocatalizador más usado en virtud de su fotoactividad favorable, estabilidad química, no tóxico y bajo costo, además de sus excelentes características que la hacen aptas para las aplicaciones de fotocatalisis. La aplicación principal del dióxido de titanio es destinada en un 98% como pigmento blanco (agente blanqueador, recubrimientos etc.) y solo un 2% se utiliza para obtenerlo como metal, revestimiento de electrodos para soldadura entre otros.

3.3 Anatase, Rutilo y Brookita

Su fórmula molecular es TiO₂ y cuenta con 3 modificaciones cristalinas: rutilo, anatasa y brookita las cuales tienen propiedades físicas muy parecidas como se muestra en la siguiente tabla 6, por otro lado, conduce la electricidad y también es un buen conductor de calor , además de ser mucho más liviano con respecto a otros metales como hierro, níquel, el dióxido de titanio es también resistente a la corrosión.

Tabla 7. *Propiedades físicas de TiO₂*

PROPIEDAD	RUTILO (b)	ANATASE (a)	BROOKITA
Peso Molecular (g/mol)	79.89	79.89	79.89
Sistema Cristalino	Tetragonal	Tetragonal- Octaédrica	Ortorrómico
Volumen	62.07	136.25	257.38
Volumen molar (m ³ /mol)	18,693	20,156	19,377
Densidad (kg/m ³)	4,274	3,895	4,123

Fuente: Adaptado de la Tesis: Morteros fotocatalíticos: análisis de su autolimpieza en función del tipo de cemento y rugosidad superficial en Madrid (Rodríguez García, 2012)

El rutilo es el principal mineral del titanio y es la forma más estable debido a tanto la fase de anatase como la brookita se transforman en rutilo bajo condiciones de calentamiento, como reversible. La fase rutilo fue descubierta por Werner en España, llamada, así como derivada de la palabra rutilus que significa rojo en referencia a su color rojo oscuro, se muestran su estructura tetragonal cristalina en la figura 15 (b).

La brookita fue descubierta en 1825 por A. Levy en Inglaterra, llamada así en honor al geólogo inglés H.J. Brooke, la fase cristalina brookita tiene una escala de color desde marrón oscuro hasta negro verdoso en su estructura de forma ortorrómica como se muestra en la figura 15 (c).

La anatasa o anatase fue llamada así por R.J Hauy en 1801 el cual deriva de: *anataxis* palabra griega que significa extensión, el cual describe la formación de sus átomos siendo su eje vertical más largo en comparación con el rutilo, la fase anatasa es un material muy usado para la fotocatalisis (Katzman, 2006), por otro lado, la fase anatase antes llamada octaedrita tiene la siguiente estructura cristalina como se muestra en la figura 15 (a).

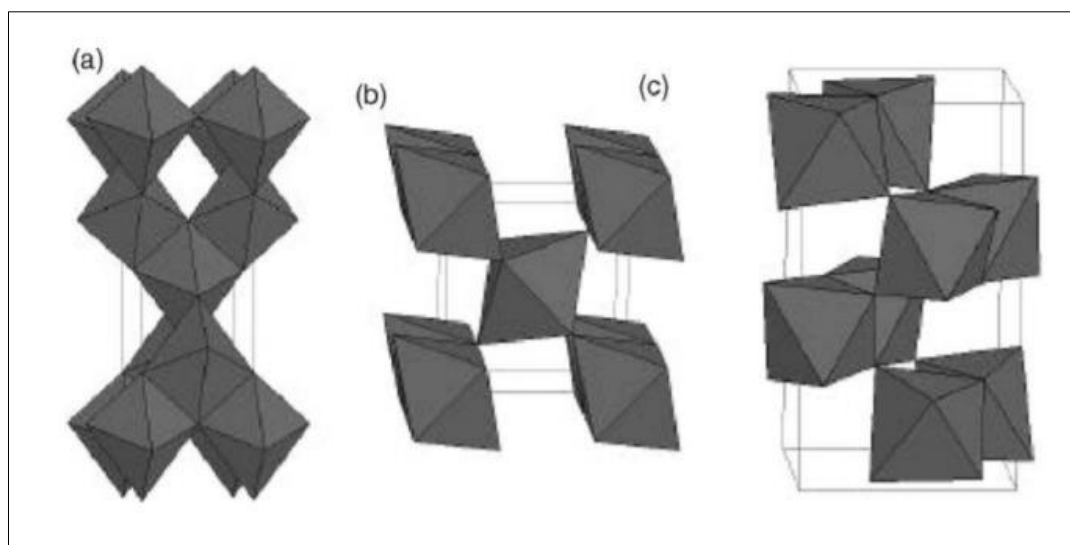


Figura 15. Estructuras Cristalinas de las fases del TiO_2 . Tomado del artículo “Building Toward a Cleaner Environment: A New Role for an Existing Product, TiO_2 ” (Katzman, 2006)

En su mayoría de los catalizadores comerciales de dióxido de titanio son compuestos de mezcla entre rutilo y anatase, como también se vende productos específicos de una fase, China produce de manera industrial productos como Degussa P-25, Anatase grado-A200, Anatase grado-A100 entre otros. Por otro lado se tiene evidencia experimental que prueba que la fase anatase muestra un comportamiento más activo para la fotooxidación de O_2 que el rutilo pero ello no es completamente absoluto sino relativo, estas fases de anatase y rutilo difieren en el tamaño de la partícula siendo la anatase más fina es por ello que podría poseer propiedades químicas más favorables. Esta mayor eficiencia por parte de la fase anatase es debido a que presenta un nivel fermi levemente más alto, con poca capacidad para absorber oxígeno y un mayor grado de hidroxilación; cabe resaltar que algunos estudios indican que con la mezcla de ambas fases anatase (70-75%) y rutilo (30-35%) es más activa que con solo la presencia de anatase (Garrida Cabo, 2007).

3.4 Método de laboratorio para la obtención de dióxido de titanio

El uso de estos métodos es empleado principalmente para elaborar productos con características específicas partiendo de soluciones acuosas o alcohólicas que dentro de su estructura este presente el dióxido de titanio (TiO_2). Los precursores más usuales son:

Proceso sulfatado: Este proceso se lleva a cabo con la digestión de las fuentes con ácido sulfúrico concentrado a temperaturas altas de 150 y 220 °C, como resultado los sulfatos de titanio el cual es precipitado de manera húmeda, ese resultado es purificado para generar TiO_2 , es importante mencionar que este tipo de proceso es más atrayente desde el punto de

vista fotocatalítico debido a presentar una mejor porosidad del sólido y de la concentración de dopantes incorporados.

Proceso clorado: Las materias primas dentro del procesos deben ser transformadas en TiCl_4 por cloración a 700 hasta 1200°C y purificadas con destilación para ser luego oxidadas con O_2 en fase vapor a 900 a 1400°C, cabe resaltar que este proceso es el más común. (Gautier Salazar, 2011, pág. 16)

Los materiales que son obtenidos en llama tienen en su estructura cristalina el rutilo en cambio las que serán en un medio húmedo será la fase anatase.

3.5 Nanopartículas y Nanotubos

Las nanopartículas son aquellas partículas cuya medida son menores o igual a 100 nm, en cambio los nanotubos o nanofilamentos son aquellas en donde solo 2 de sus medidas están dentro de la nanoescala. Esta diferencia en sus dimensiones resulta de los nanomateriales, según últimas investigaciones en China concluye que los nanotubos de TiO_2 en comparación con las nanopartículas del mismo material presentan mejor performance tanto en resistencia a la compresión como en eliminación de NO_2 debido a que los nanotubos al ser más largos atraviesan varias capas ingresando al interior de concreto lo cual es beneficioso para el adoquín de concreto fotocatalítico.

Por otro lado, para la obtención de nanotubos existen diversos procesos químicos para obtenerlo siendo una de ellas la sinterización mediante tratamiento hidrotermal con 15ml de solución de NaOH a una concentración de (10 mol/L) es la utilizada en la investigación de Meng. (Meng, Dong, Hao, & Ting, 2020)

3.6 Semiconductores

Los semiconductores forman parte de un gran grupo de materiales; que tienen una conductividad eléctrica proporcional a la temperatura y significativamente más baja que la de los metales, estos semiconductores, en concreto los sólidos son generalmente óxidos, son sustancias fotocatalíticas de interés, en las que los átomos forman una red tridimensional. Hay muchos fotocatalizadores diferentes, como arseniuro de galio (GaAs), fosfuro de galio (GaP), seleniuro de cadmio (CdSe), sulfuro de cadmio (CdS), óxido de zinc (ZnO), óxido de tungsteno (WO_3), óxido de titanio (TiO_2) o carburo de silicio (SiC) (Rodríguez Perez, 2012), baratos y de fácil acceso, estos materiales pueden excitarse con luz de baja energía, absorbiendo gran parte de la radiación solar que incide en la superficie terrestre a una longitud de onda mayor ($> 310 \text{ nm}$), lo cual aumenta el interés en las investigaciones de estos

conductores ya que es posible el aprovechamiento de la luz solar que no depende directamente de la temperatura sino de los rayos de la luz solar.

Actualmente los fotocatalizadores más investigados son los óxidos metálicos semiconductores de banda ancha y de manera particular el TiO_2 el cual es el más aplicado durante los últimos años. Las características de los semiconductores fotocatalíticos deben ser química y biológicamente inertes, fotocatalíticamente estables, de fácil acceso para producir, que sea eficiente para su activación mediante la radiación solar, económico y que además no genere riesgos ambientales o humanos.

3.7 Fotocatálisis

Para definir este concepto es importante definir en principio que es una reacción catalítica el cual es un proceso que acelera, en presencia de un componente llamado catalizador, esta reacción química no es consumida a lo largo del proceso lo que implica que no puede ser desactivado o destruido es este punto que lo diferencia del reactivo. Si para la activación del catalizador se involucra la absorción de la luz solar entonces se tiene una reacción llamada fotocatalisis (Sugrñez, 2016).

A través de la fotosíntesis, las plantas eliminan CO_2 bajo las condiciones de luz solar para producir materia orgánica, al igual que la fotocatalisis quien también elimina otros contaminantes cotidianos de la atmósfera, como se menciona en el informe del Ministerio de Ambiente de Chile son "NOx (óxido de nitrógeno), SOx (óxido de azufre), COV (compuestos orgánicos volátiles), mediante un proceso de oxidación activado por energía solar. La fotocatalisis se define entonces como la reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato, que está hecho de un material semiconductor que acelera la reacción, propia de un catalizador, en este proceso se producen reacciones de oxidación y reducción" (Ministerio del medio Ambiente, 2016) .

Para la eliminación de los contaminantes NOx primero el agente contaminador se debe de absorber en la parte superficial del material, y segundo ya que está absorbido deber ser oxidado en 2 etapas hasta llegar a compuestos inertes y nitratos, finalmente el compuesto inorgánico será removido de la superficie del material fotocatalítico por efecto de la lluvia por arrastre. La fotocatalisis con semiconductores ha tenido una popularidad de investigación y se ha usado enormemente en el tratamiento de contaminación del agua y aire, desde años atrás se remonta al siglo XX donde los autores Hoffmann et al. (1995) y Fujishima et al. (1999) fueron los primeros es estudiar estas aplicaciones.

Se puede sintetizar que la fotocatalisis es la aceleración de un foto-reactor por la presencia de un catalizador como es el TiO_2 .

3.7.1 Fotocatálisis heterogénea

La fotocatalisis heterogénea cada vez es más popular entre los investigadores, junto al dióxido de titanio como catalizador de la reacción, esta popularidad es ventajosa ya que cada vez más se tiene mayor información acerca de cómo este tipo de fotocatalisis puede ayudar a llegar a una ingeniería sostenible en consideración del medio ambiente. El primer paso con la adición de TiO_2 dióxido de titanio como fotocatalizador lo presentaron Fujishima y Honda en el año de 1972, fueron los que manifestaron por vez primera la hidrólisis del agua en hidrógeno y oxígeno en presencia de luz que por medio de un óxido como es el dióxido de titanio (TiO_2)- ánodo en una célula fotoquímica, donde aseveraron que la fotocatalisis era efectiva tanto para descontaminar el agua como el aire. (Costa, Chiarello, Sello, & Guarino , 2011)

La fotocatalisis heterogénea forma parte de los POA's (Proceso de Oxidación Avanzada), el cual se basa específicamente en utilizar un semiconductor activo fotoquímicamente (fotocatalizador). Los fotocatalizadores son caracterizados por su capacidad de adsorber de manera simultánea dos reactantes, quienes son reducidos y oxidados por activación fotónica. La eficiencia de los semiconductores (fotocatalizadores) están definidas por la diferencia de la banda de conducción y la banda de valencia. La velocidad es un parámetro muy importante ya que el catalizador es directamente proporcional de este que mide su efectividad que depende de la intensidad de la luz en estas reacciones, las condiciones ambientales como temperatura, humedad relativa, entre otros; la cantidad presente de TiO_2 en la superficie aquí es importante precisar que se han hecho investigaciones donde colocan una capa solo en la superficie y otras que se encuentran en su mezcla homogénea de la pasta de concreto es por ello que también es una variable la cantidad de dióxido de titanio en la superficie de contacto con los agentes contaminantes y finalmente la adherencia de los contaminadores a la superficie.

Las reacciones heterogéneas cuentan con dos fases las cuales son la líquida y sólida; los reactivos están en una fase gaseosa o líquida y el catalizador en fase sólida. Se divide en 5 etapas el proceso fotocatalítico como lo menciona Salazar en su tesis (Salazar, 2019);

1. Tránsito de los reactivos en fase líquida a la superficie del catalizador
2. La adsorción de uno de los reactivos como mínimo

3. Reacción en la fase adsorbida
4. Desorción del producto
5. La eliminación de los productos de la interfaz del material

Cabe resaltar a los componentes necesarios para que la reacción de fotocátalisis tenga lugar los cuales son:

- Compuesto oxidante: Oxígeno del Aire, el fotocatalizador se oxida y recibe electrones en fase gaseosa.
- Medio: Aire
- Fotocatalizador: TiO_2 , material semiconductor capaz de acelerar las reacciones de oxidación
- Radiación: La fuente es la Luz UV natural o artificial, con una longitud de onda mayor a 310 nm,

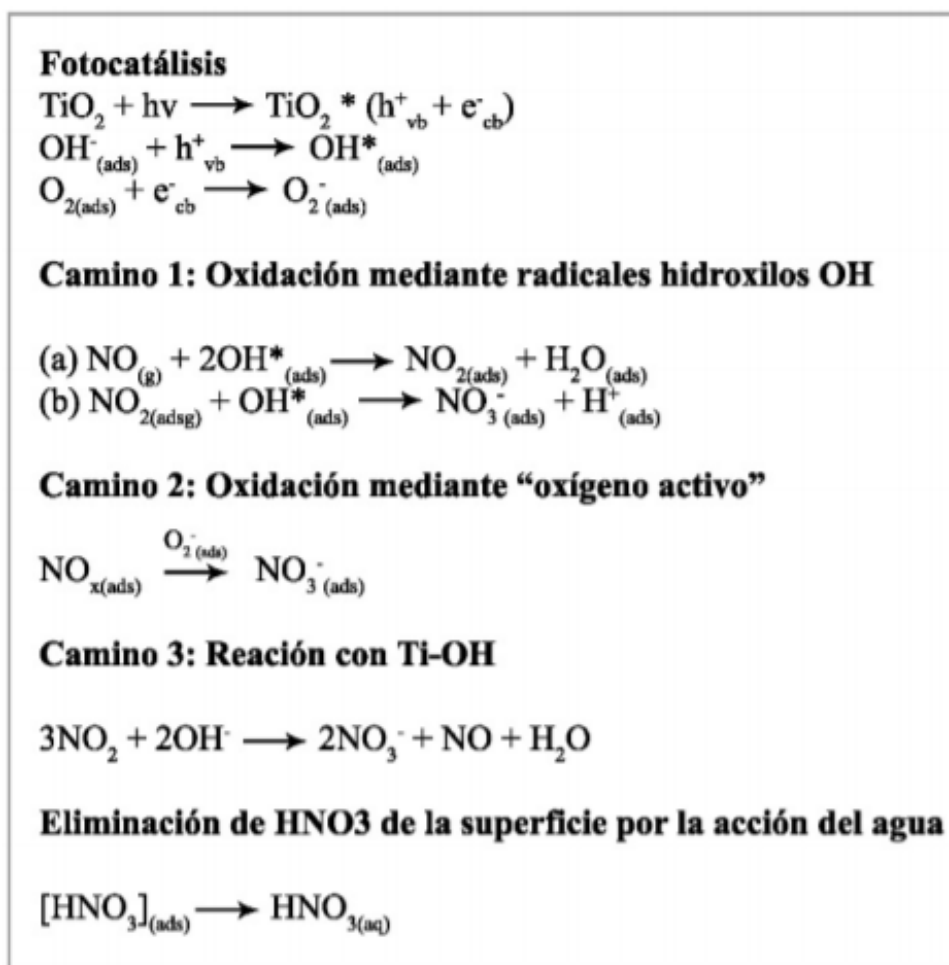


Figura 16. Ecuaciones de la degradación del NOx. Fuente: obtenido de la tesis "Fotocatálisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en Gran Vía "Tesis de (Bermejo Fernandez, 2018, pág. 9)

3.8 Aplicación del fotocatalizador TiO2 en materiales de construcción

Durante los últimos años ha tomado relevancia el hecho de que la industria de la construcción tenga un producción responsable y amigable con el medio ambiente de esta manera diversos estudios han ido mejorando estas nuevas creaciones, en el caso del TiO2 como aditivo en la mezcla del concreto recientes investigaciones dieron como conclusiones que es posible adicionarlo como un capa delgada en la superficie que este directamente con la luz solar son muy convenientes, pero aún faltan aplicarlas a escala real ya que el desgaste de rodadura podrían afectar. (Hashimoto, 2005), durante el 2015 en Hong Kong, China en la Universidad Politécnica de Hong Kong por Guo, Tung- Chai Ling, Sun Poon la investigación titulada “Photocatalytic NOx degradation of concrete surface layers intermixed and spray-coated with nano-TiO2: Influence of experimental factors”, utiliza al TiO2-fotocatalizador como un recubrimiento en spray, se concluye que aparentemente, el método de recubrimiento

por pulverización es más eficiente en capacidad fotocatalítica pero aún no se tiene investigaciones en términos de resistencia a la compresión.

Para el concreto arquitectónico es aplicable en los cementos blancos usados en la superficie de edificios y construcciones, este cemento añadido con TiO_2 se convierte en un cemento autolimpiante que no solo ayuda a mantener su superficie blanca sino también este será durable mejorando el exterior del edificio. Como resultado de una acción fotocatalítica, la blancura de la edificación y la suciedad ocasionado por factores externos será removida más fácil con un lavado, estas propiedades son propias del fotocatalizador. (Folli, 2010)

3.9 El sistema cemento – TiO_2

El sistema entre el cemento y el dióxido de titanio (TiO_2), guardan características físicas de tamaño similares, es por ello que ambos materiales en un proceso de elaboración de materiales fotocatalíticos sean previamente mezclados es decir el polvo de cemento en seco antes de añadir el agua para la hidratación, así el polvo de cemento más el polvo de dióxido de titanio forman un solo cuerpo de polvo de coloración plomo clara que es visualmente diferente a la mezcla convencional que se asume en su totalidad por el cemento. Se ha visto tanto en investigaciones como en teórica que efectivamente el dióxido de titanio no afecta al cemento en cuanto a su reacción con el agua en la pasta de concreto.

Cuando el concreto endurece, el dióxido de titanio (TiO_2), está embebido en todas partes de la estructura de concreto debido a la mezcla homogénea en la pasta de cemento. El dióxido de titanio (TiO_2) es un óxido muy estable como también inerte. Una ventaja de este óxido es que no causa reacción con ninguna fase del cemento como tampoco se afecta a ninguna reacción de la hidratación. (Guangfna, Huang, & Chenq, 2011)

3.10 Materiales con capacidad fotocatalíticas

El uso de dióxido de titanio (TiO_2) en materiales de construcción (“Self-Cleaning materials”) permiten a las estructuras e infraestructuras mantenerse limpias. Para estas aplicaciones en la construcción es necesaria que el fotocatalizador TiO_2 sea activado por efectos de la luz UV del sol, y que con la ayuda de las lluvias que es un fenómeno natural como también la humedad ambos permitan oxidar los compuestos orgánicos, eliminando los componentes que se encuentran en la superficie los cuales son visualmente indeseables por estética arquitectónica. Además, como menciona Rejinders en su investigación que “la presencia de materia inorgánica que se encuentra oxidadas -nitratos en su totalidad, sulfatos, carbonatos- en la superficie de los materiales podría aminorar gracias a la eliminación de la

materia orgánica debido a que actúa como un medio “adherente” para estas especies inorgánicas” (Rejinders, 2009), los nitratos que van a ser el resultado del proceso fotocatalítico podrán ser transportados mediante el agua de la lluvia a sedimentos orgánicos como la tierra donde es verdadero decir que al ser inorgánico no será descompuesto pero si disminuirá su cantidad y será no nocivos para la vida humana. La radiación solar, temperatura, humedad, superficie tratada, dirección y velocidad del viento son factores relevantes para el aprovechamiento de la capacidad descontaminante del proceso fotocatalítico; para detallar cada uno se tiene la siguiente tabla 7 (Bermejo, 2018).

Tabla 8: *Factores que afectan a la capacidad fotocatalítica*

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Radiación Solar W/m ²	La velocidad de la reacción aumentara a cuanto mayor sea la radiación solar, debido a que la reacción es foto-inducida
Temperatura °C	Para que el fotocatalizador sea activado va a depender de los fotones mas no de la temperatura, ya que la energía termina no es la que excita a los electrones del catalizador
Humedad %	La cantidad de agua en el aire aumenta la formación de radicales OH*, grupo imprescindible para llevar a cabo la reacción.
Dirección y velocidad del viento (m/s)	Si el viento tiene mucha velocidad, el aire contaminado se moverá muy rápido por lo que las partículas no estarán en contacto con la superficie, sin embargo, en lugares donde el aire queda atrapado por edificaciones contiguas pueden funcionar.
Superficie tratada	Es la superficie del material catalizador que está en contacto directo con los gases y no necesariamente la cantidad de material en sí.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el incremento del carácter hidrófilo del material que se precisa como la mayor afinidad al agua, es gracias al dióxido de titanio (TiO₂) (Sakai, Fujishima, Watanabe, & Hashimoto) , de esta manera las gotas de agua se extienden en la cara en contacto del material se forme como una película de agua, impidiendo la penetración en la superficie, si es así este material podría ser de fácil lavado ya que se encuentra en la superficie sin haber penetrado en el interior del material. (Pichat., 2012)

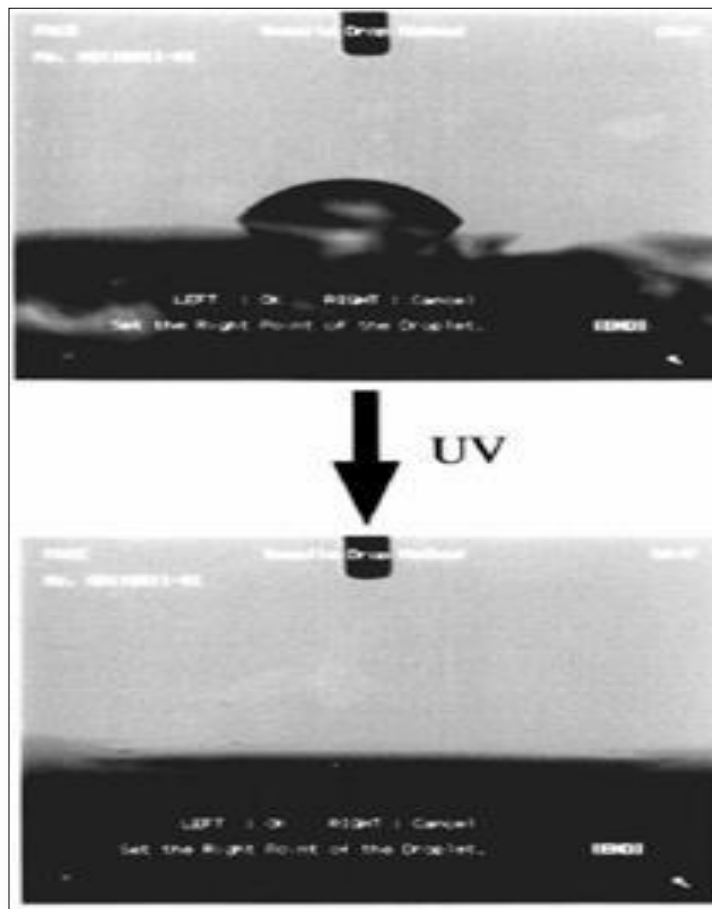


Figura 17. Imágenes del ángulo de contacto del agua en film de TiO_2 antes y después de la irradiación de los rayos UV. Extraída de (CONAMA, 2012).

Se observa en la figura 17, la extensión de la hidrofiliicidad en presencia de TiO_2 del material, en estas imágenes se presenta una lámina o film de TiO_2 sobre vidrio en el que al contacto de la gota de agua con la superficie pasa de 54° a 0° como medida del ángulo.

De este modo, durante la irradiación se produce cambios en la superficie del TiO_2 , dentro de estos procesos las moléculas de agua de formula química H_2O tienden a formar enlaces de hidrógeno con los grupos (-OH) responsable de formar una película de agua para favorecer el lavado del material.

La ciudad de Arequipa cuenta con una humedad promedio anual de 54% para el 2019, tiene precipitaciones 27.59 mm /mes durante enero, febrero y marzo según datos del INEI, además de tener precipitaciones bajas en abril, julio, agosto, noviembre y diciembre. Esta información es necesaria para saber cómo podría afectar al resultado de la investigación. A la fecha no se tiene datos sobre la cantidad de agua ni la frecuencia de lavado de la superficie, sin embargo si se compara con las precipitaciones anuales de 35.2 mm / mes promedio de ciudades como Madrid, dato obtenido por weather-atlas.com, donde se están realizando

investigaciones in situ, que prometen obtener óptimos resultados se podría evaluar su viabilidad y motivo de una investigación.

3.11 Durabilidad de materiales fotocatalíticos

La aplicación en zonas urbanas o patios industriales con concretos, morteros o materiales fotocatalíticos adicionados con dióxido de titanio son una tecnología que a diario están evolucionando porque tiene como valor y fortaleza la descontaminación del aire logrando una mejor calidad del aire a través de la reducción de contaminantes en espacios con una mala calidad del aire según sean los estándares permisibles para la salud, debido a la emisión de óxidos de nitrógeno, ejemplo de ello son las avenidas, calles principales de alto tránsito vehicular. La aplicación de esta tecnología permite eliminar o disminuir una gran cantidad de contaminantes atmosféricos, principalmente los óxidos de nitrógeno como NO y NO₂ que son emitidos por los automóviles problema principal de la emisión de contaminación y que además es un tipo de contaminación silenciosa porque no son visibles al ojo humano (Bermejo, 2018). La formación de nitratos se da como producto final del proceso fotocatalítico y el efecto es la descontaminación del aire, esta contaminación es debido a los óxidos de nitrógeno NO_x concentrado en el aire tanto en materiales como los recubrimientos y concretos fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, dan acumulaciones de nitrato poco significativas debido a que no se encuentran en grandes concentraciones, además que el destino final de estas serán materias orgánicas que podrán reducir su contaminación. “Estos valores representan concentraciones de nitratos en aguas prácticamente despreciables o apenas cuantificables a la hora de tratar los residuos acuosos de zonas urbanas en estaciones depuradoras de aguas residuales”, así lo menciona el informe del congreso nacional del medio ambiente. (CONAMA, 2012)

No obstante, en el informe último mencionado indica que los materiales fotocatalíticos que son aplicados a estructuras urbanas donde está el foco de la contaminación por emisión del parque automotor, estos materiales adicionados con dióxido de titanio como catalizador, llegan a absorber de manera superficial los nitratos que son el resultado final de la reacción por la eliminación de los NO_x, de esta manera las estructuras estarían superficialmente bloqueadas, en el caso de exposiciones a largos lapsos de tiempos, daría lugar a un grado de nitrificación severo en la cara de contacto del material por consiguiente trae como consecuencia la pérdida parcial o total de su actividad fotocatalítica ya que es la superficie con dióxido de titanio la que debe estar en contacto directo y al estar saturadas deja de cumplir su activación. Por consecuencia este fenómeno es llamado como desactivación del

catalizador por la pérdida de la actividad de un catalizador heterogéneo, por otro lado, si se requiere la recuperación de sus propiedades catalíticas o su regeneración de este material, depende en relación directa a la causa que originó esta pérdida de actividad. Existen mecanismos que podrían revertir el daño causado, primero se debe saber si la desactivación del catalizador ha sido causada por una superficie sucia parcial o totalmente es comúnmente llamado como “fouling”, éste podría ser regenerado “in situ” en el lugar mismo del material mediante la remoción por agua como lavados periódicos, con el fin de recuperar sus propiedades fotocatalíticas. En cambio, cuando este material fotocatalítico esta durante largos periodos de tiempo bajo elevadas concentraciones de óxidos de nitrógeno NOx en ausencia de lluvias que es necesario para el lavado de su superficie, podría ser un fenómeno químico irreversible dando cabida a una pérdida total de las propiedades fotocatalíticas sin posibilidad de retomar sus (CONAMA, 2012).

Por otro lado, diversos estudios bibliográfico científico e investigaciones realizadas en laboratorios, lograron diferenciar el rendimiento fotocatalítico de la eliminación de NOx óxidos de nitrato, entre un recubrimiento fotocatalítico con un concreto fotocatalítico. En el caso del recubrimiento del material será solo una cara de este que estará expuesta a los contaminantes en el caso de un concreto fotocatalítico para infraestructuras urbanas donde el material fotocatalítico queda embebido dentro de la mezcla; se propuso el recubrimiento fotocatalítico debido al costo ya que aminora el precio en comparación con el materia base sin ningún tipo de adición; en ambos casos tuvieron rendimientos favorables sin embargo el concreto fotocatalítico presta una mejor performance en investigaciones in situ debido a su comportamiento frente al desgaste de rodadura por parte de los neumáticos de los vehículos.

Además, Rejinder en su investigación menciona que “con la mezcla de concreto que no presentó finos en su composición se obtuvieron los mejores resultados del rendimiento fotocatalítico de eliminación de óxidos de nitrógeno”, esto podría ser debido a que gran parte de los finos lo ocupo el polvo de cemento como el dióxido de titanio teniendo una superficie mayor en contacto. También menciona que “al aumentar el porcentaje de humedad relativa se observó una disminución del rendimiento fotocatalítico de la eliminación de NOx.”, se entiende ya que el agua evita la absorción de los óxidos de nitrógeno sobre el concreto fotocatalítico, el cual afecta negativamente a la velocidad de reducción de NOx. (Rejinders, 2009)

Esta tecnología en vanguardia de los concretos fotocatalíticos “autolimpiables”, podrían llegar a ser tan comerciales como los concreto actuales y tradicionales, con la adición

de TiO_2 obtienen ventajas importantes en relación directa con el medio ambiente con la calidad del aire. Aunque esta reciente tecnología de concretos fotocatalíticos tienen como fortaleza la preservación del medio ambiente en términos de calidad del aire, para el control de la contaminación atmosférica que empeora encarecidamente al pasar de los años, sufre modificaciones debido a una serie de medidas de operación y de diseño en su elaboración que llegan a alterar su fotoeficiencia final, tal como se vio anteriormente se observan diferentes resultados debido a que dependen de variables como temperatura, velocidad etc. que lo hacen impredecible. Por lo que es recomendable continuar con investigaciones dentro de sus medios, parámetros y factores que puedan afectar a un correcto desenvolvimiento de estos concretos fotocatalíticos.

Además, existen estudios a escala real como proyectos de investigación realizados in situ son de absoluta necesidad para poder validar la eficiencia de esta tecnología, donde se incluyan parámetros como durabilidad, estabilidad en tiempos muy extensos de exposición donde estén concentrados todos los contaminantes atmosféricos, cambiando factores como lapsos de tiempo con lavados cortos y lavados largos con el fin de conocer los periodos máximos que necesitan ser removidos los contaminantes de la superficie de estos concretos fotocatalíticos. (Snare, Treloar, Ghiggino, & Thislethwaite, 2012).

3.12 Aplicaciones “in situ” de materiales fotocatalíticos

Los concreto que son adicionados con TiO_2 son analizados principalmente por su capacidad de descontaminación del aire por medio de la oxidación fotocatalítica de NO_x que se encuentra presente en la atmosfera como óxidos de Nitrógeno. Es indudable que las extensiones de tramos viales ya sean por pavimentos, aceras, caminos, adoquinados etc. están presentes en cualquier ciudad desarrollada, entonces la adición de TiO_2 en concretos, y diversos materiales de construcción son una solución tentativa para mejorar cuantiosamente la calidad del aire de las ciudades y zonas industriales con su aplicación.

En Perú existen legislaciones de control ambiental como los ECA's estándares de la calidad del aire que contienen parámetros y límites de exposición. La oxidación fotocatalítica de óxidos de nitrógeno NO_x con la adición de dióxido de titanio (TiO_2) como semiconductor se ha convertido en la última década motivo de investigación en diferentes puntos del mundo.

Los Ensayos “in situ”, se dan con el objetivo de conocer el efecto descontaminante o autolimpiante de los materiales fotocatalíticos aplicados sobre las estructuras urbanas, se debe de ir más allá de los ensayos de laboratorio que si bien muestran con mucha certeza los resultados cabe la posibilidad de que estos al estar en un medio totalmente uniforme sin cambio

es decir un medio ideal se comportan de manera particular, en cambio el medio real es totalmente variable y cambiante es por ello que se deben desarrollar varios tipos de ensayos de medidas “in situ”, que si bien no están bajo ninguna normativa o tengan certificación (ambiental, calidad, etc), ni están bajo leyes legal, son de mucha importancia porque permiten conocer de una manera más precisa la realidad, como funcionan estos productos y su eficacia a lo largo del tiempo.

El primer ensayo “in situ” es la EUROVIA, diseñado por el Centro de Investigación de EUROVIA en Francia, se basó en las normas de laboratorio actuales durante el momento de su ejecución, este ensayo a escala real tiene como metodología colocar una cámara hermética sobre la superficie de su muestra de ensayo esto con el objetivo de tener un medio controlado, a esta cámara se le introdujo aire contaminado de manera artificial el cual simula un medio natural contaminado de la zona que es ocasionado por los contaminantes vehiculares, se introduce el aire contaminado artificial hasta llegar a una concentración constante tipo, medida en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esta concentración típica será la simulación de gases óxidos de nitrógeno NO_x de una calle urbana representativa.

Una vez que el aire artificialmente contaminado pasa por la cámara y se encuentre dentro de la cápsula, se mide la concentración de NO_2 a la salida de la misma del lado opuesto con el fin de determinar las variaciones por el efecto de los materiales fotocatalíticos dentro de la cápsula. La variable de intensidad de la luz UV también está controlada dentro de la cápsula transparente, dentro del proyecto se consideraron intensidades y radiaciones lumínicas para el ensayo, al ser un medio controlado se puede hacer variar los valores de las variables para conocer diferentes comportamientos, con el único objetivo de simular días de luminosidad variable a escala real (nublados $0,5 \text{ mw}/\text{cm}^2$ y soleados $3 \text{ mw}/\text{cm}^2$), esto es beneficioso para los demás países aledaños ya que en un solo lugar de área el cual tiene un medio controlado se pueden simular diferentes tipos de calidad de aire, intensidad de luz de otros lugares.

Por otro lado, en Valencia el ensayo a escala real 1:1 es el proyecto de la Cámara Euphore – CEAM, Valencia en España por la fundación CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo), este proyecto se encuentra situado en el Parque Tecnológico de Paterna, quienes han realizado un singular ensayo, lo que lo llevo a ser pionero en el sector, para la evaluación de la actividad fotocatalítica de materiales. (CONAMA, 2012)



Figura 18. Cámara euphone-ciam-Valencia. Tomado de (CONAMA, 2012)

Se describe el ensayo que durante seis días, las 24 horas de cada día, se introducen en el medio controlado por medio de una cámara monitorizada EUPHORE piezas de muestras con características fotocatalíticas, es decir diferentes tipos de materiales que contengan TiO_2 dióxido de titanio, donde se introduce la misma composición química como la concentración del aire contaminado que existe en una zona patrón, tomada dentro de la ciudad de Valencia. De esta manera es como mide la reducción de las concentraciones de NO_x óxidos de nitrógeno por efecto de estos productos, ya que al contar con un ingreso controlado y monitoreado y una salida toma las variaciones que tuvieron con respecto al ingreso de los contaminantes.

En Europa el proyecto PICADA (Photo-catalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assessment), en su ensayo “in situ”, es un proyecto muy interesante ya que analiza la realidad actual y futura de nuestra sociedad con la creciente poblacional las viviendas ya no crecerán en extensión sino más bien en altura. Esta investigación europea contribuyó e impulso al desarrollo de productos fotocatalíticos aplicados a las estructuras urbanas, para disminuir los niveles de contaminación ambiental provocados por gases NO_x en entornos con disposición en “street canyon” lugares donde debido a los edificios contiguos forman una especie de cañón debido a lo alto de sus estructuras lo que conduce a un alto grado de confinamiento por la forma en altura de las edificaciones actuales en las ciudades además de ser también muy cercanas al futuro este tipo de distribución urbana. Este proyecto sería

considerado como una mezcla de estudios realizados en laboratorio y de estudios a escala real con mediciones “in situ” en condiciones reales. El proyecto tuvo como objetivo hacer la comparación de dos medios, el primero donde la medida de contaminantes NO_x pertenece a una calle en el cual no se incorporaron materiales fotocatalíticos, el segundo medio es una calle con parecidas características físicas y ambientales a la calle del medio primero, donde sí se colocaron productos fotocatalíticos como morteros sobre las estructuras verticales que confinan las calles. Al término del proyecto se concluyó que el medio segundo obtuvo altas reducciones de concentraciones de NO_x, en comparación con el medio primero que se da en condiciones normales; se puede explicar que el uso de materiales fotocatalíticos influyo en la disminución de contaminantes NO_x. (CONAMA, 2012).

En Londres el Borough of Camden de Reino Unido, durante el 2006 el ayuntamiento o municipalidad de Camden en trabajo conjunto con los consultores del Imperial College de Londres, llevaron a cabo un ensayo de descontaminación ambiental usando materiales fotocatalíticos como los adoquines en el vecindario de Southampton Row, Bloomsbury. Se contemplo en el proyecto incorporar baldosas con dióxido de titanio especialmente diseñado, la aplicación tuvo un área de 1200 m² aproximadamente y se monitorizó la concentración de NO_x mediante el método de quimioluminiscencia. Al término del ensayo se concluyó que la contaminación en el área redujo en más del 20%, por efecto de los materiales fotocatalíticos. Es por ello que la investigación presente podría lograr los mismos resultados si son aplicados en áreas extensas con el uso de los adoquines fotocatalíticos como pavimento articulado los cuales se encuentran en contacto directo con la contaminación de estos gases tóxicos emitidos por el parque automotor.

En Madrid en el Ecobarrio La Rosilla, la iniciativa de la Empresa Municipal de Vivienda y Suelo del Ayuntamiento de Madrid (EMVS) dentro de un programa social aplicado a barrios ecológicos y sostenibles, junto a otros barrios de la ciudad, claman su voluntad de aplicar criterios de sostenibilidad, solicitan además que estos criterios se incluyan desde el proceso de diseño; mediante la correcta distribución de espacios, como áreas verdes, aplicación de materiales fotocatalíticos; hasta su ejecución, gestión y mantenimiento. Esta iniciativa es novedosa que sirve como impulso innovador para Madrid en temas tan sensibles para la salud humana como es la calidad de aire. El objetivo de la operación es que 1300 personas vivan en una superficie de 98.000 m² formando 400 viviendas para vivir en una comunidad urbana sostenible, este es un proyecto de gran magnitud ya que no es a una escala in situ sino a escala urbanística, estos pobladores son conscientes de temas tan sensibles como

la relación que existe entre la sostenibilidad y eficiencia energética de sus lugares de residencia, empezando por su adecuada orientación solar quienes son diseñados por arquitectos, la aceptación de topologías edificatorias que seas capaces de obtener mayores grados de autosuficiencia energética y disposición de volúmenes los cuales hacen responsables a los constructores como también tener espacios públicos capaz de constituir verdaderas comunidades, seguras y socialmente cohesionadas para convivir en sociedad el cual es responsabilidad del estados de los entes políticos. En el vecindario investigado se instalaron losetas fotocatalíticas para pavimento peatonal, en la zona de estacionamiento colocaron adoquines fotocatalíticos y para el pavimento vial se colocó una capa con spray fotocatalítico. Esta primera etapa fue en las estructuras de uso común, ya en la segunda etapa se llevará a cabo en las edificaciones donde se le aplico materiales fotocatalíticos a fachadas y cubiertas. Este proyecto intenta mediante la experimentación demostrar un nuevo concepto de microciudad autónoma, sostenible, que energéticamente sea autosuficiente, es admirable como ciudades ya ponen en marcha proyectos que aún no han sido normados o estandarizados, al término de las investigaciones comprobadas se logran tener más alcances en este tema por otro lado los pobladores han alcanzado un nivel de consciencia que demanden cada vez con más clamor querer tener ciudades cada vez más limpias y listas para vivir en concordancia con el medio ambiente. (Siñeriz Martinez, 2015).

3.13 Contaminación del Aire

La contaminación del aire inclusive antes de la pandemia de COVID-19, la cual ha sido un fenómeno sin anticipación que se llevó la vida de millones de personas es considerada como una de las crisis mundiales más difíciles de nuestro tiempo y que además nos encontramos frente a una contaminación silenciosa el cual es la mala calidad del ambiente que según el informe State of Global Air 2019 señala que la contaminación atmosférica es el quinto factor de riesgo en la escala de mortalidad al 2017 en el mundo, y que aquella causaba alrededor de 5 millones de muertes en el mundo es decir en estadística es una relación de 1/10 es decir que 1 de cada 10 decesos son a causa de la mala calidad del aire, además se concluye que mueren más personas relacionadas a la contaminación atmosférica que accidentes de tráfico que por malaria. (OMS, 2018).

Cabe resaltar que dentro del contexto de la COVID-19, diversos estudios han permitido sospechar que existe una correlación entre la contaminación atmosférica y los contagios de COVID-19, estas investigaciones se explican ya que frente a una enfermedad tan mortal que se produce justamente en el sistema respiratorio, donde ingresan por boca y nariz,

los contaminantes tanto ambientales como virus de contagio tendría que estar vinculado de alguna manera con su medio de transporte como es el aire. Para poder sintetizar y entender los expertos explican que la contaminación atmosférica puede influenciar en la propagación de la pandemia de COVID-19 de tres maneras: aumentando la propagación debido a que por el medio en el que viaja el virus es contaminando, aumentando la susceptibilidad debido a las personas que sin saberlo pueden tener inflamaciones en las vías respiratorias a causa de la mala calidad ambiental y de esta manera empeorar la infección. Tal como lo menciona la revista del banco mundial expone que ya se ha demostrado que el virus se transmite por partículas en forma de gotas suspendidas en el aire; un claro ejemplo cuando una persona infectada estornuda o tose y propaga partículas que contienen carga viral que al entrar en contacto una persona sana podría quedar contagiada si ingresa por boca o nariz.

Diferente de lo que se piensa la tos es consecuencia común de la contaminación atmosférica y no solo por causa del resfriado, así mismo es probable que la tos aumente la transmisión, debido a que existen pacientes que no presentan síntomas llamados asintomáticos. Para poder explicar desde la biología se entiende que las vías respiratorias cuentan con células que revisten en forma de epitelio cilíndrico de forma tubular denominados cilios, el movimientos de los cilios desplazan el moco hacia la faringe, en donde es deglutido junto a la saliva; estos además tienen la función de atrapar cualquier partícula contaminada y de esta manera cuida a los pulmones así mismo atrapar partículas virales hacia la parte delantera de la nariz en contacto con el exterior para posteriormente eliminarlo sonándose con un papel, o ser tragado hacia la garganta, de esta manera protege a los pulmones de que este virus ingrese. La contaminación atmosférica mata las células de manera que los cilios ya no podría cumplir esta primordial función que traería como consecuencia que las personas sean mucho más susceptibles de contagiarse de COVID-19, es así como la contaminación ambiental puede empeorar este escenario pandémico ocasionado por el COVID-19. (Narain, 2020)

En conclusión, es rescatable que algunos indicadores de la calidad del aire han mejorado respecto a años anteriores, pero no se debe olvidar que han sido de carácter involuntario por parte de las personas debido al confinamiento mundial, es por ello que es necesario que exista un grado de consciencia y que no sea de fuerza mayor; los contaminantes más nocivos PM_{2,5}; partículas de diámetro de 2.5 micrómetros, mucho más pequeño que el grosor del cabello humano; todavía siguen presentes a pesar del confinamiento económico y social. Además, según lo expuesto anteriormente es probable que estas partículas estén acrecentando la propagación y la gravedad de la COVID-19 en el mundo. Por lo tanto, los

gobiernos nacionales deben continuar prestando atención a la gestión de la contaminación atmosférica no solo desde las normativas sino más allá como la concientización de la población para que sean ellas mismas las que se cuiden.

Por otro lado, se ha visto que las causales de contaminación por el sector construcción también son causados por el derribo o demolición que causan niveles altos de ruido durante la ejecución del proyecto, o el aumento en la concentración de polvo y partículas en el aire como las PM_{10} y $PM_{2.5}$ y además del incremento de los óxidos de nitrógeno NO_x y monóxido de carbono CO , estos agravarían la calidad del aire.

3.13.1 $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} son materias particuladas como sus siglas PM lo indica, esta es uno de los seis criterios contaminantes según la EPA (agencia de protección ambiental de U.S), esta es una mezcla de partículas solidas y liquidas que están suspendidas en el aire como polvo, polen, hollín, tierra etc. que incluyen tanto materia orgánica como materia inorgánica. Los investigadores y científicos clasifican a las partículas por su tamaño ya que estas provocan diferentes reacciones fisiológicas.

Las subcategorías más comunes son las PM_{10} y $PM_{2.5}$, en las cuales su sustancial diferencia es el tamaño ya que el número a la derecha del PM indica el tamaño del diámetro aerodinámico de la partícula, a si las PM_{10} son aquellas partículas menores de $10\ \mu m$ y las $PM_{2.5}$ son aquellas referidas a partículas con un diámetro aerodinámico menor a $2.5\ \mu m$, también llamadas PM_{10} polvo grueso y $PM_{2.5}$ llamado polvo fino, se visualiza a escala en la siguiente figura.

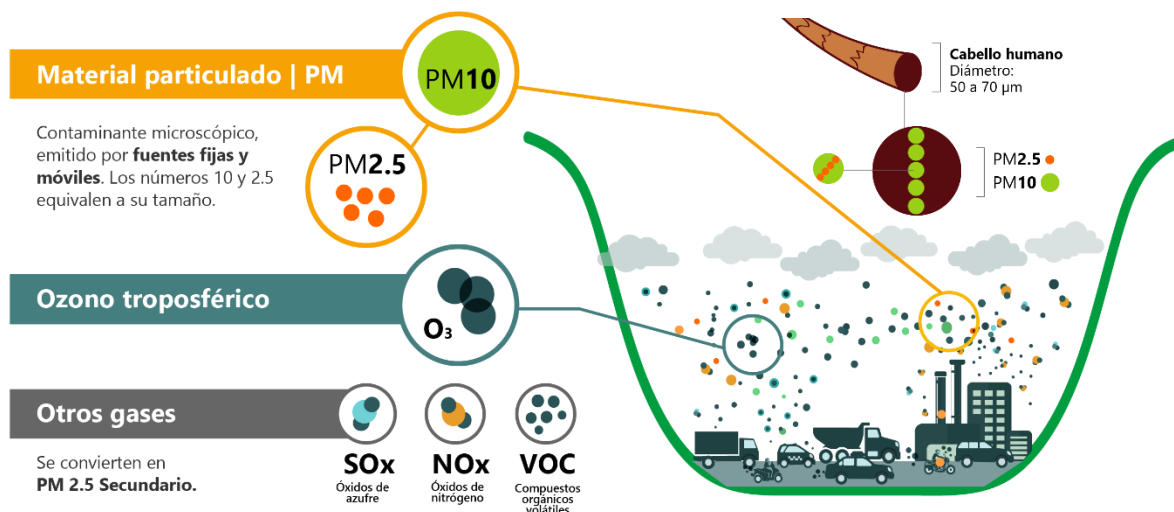


Figura 19. Tamaño del material particulado en el aire. Adaptado: Página del Área metropolitana Valle de Aburrá. (<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes.aspx>)

Como se observa el Ozono troposférico es un gas presente y nociva en el aire producto de la reacción química NO_2 y la energía fotónica este es un oxidante químico que deteriora el sistema respiratorio; así mismo los NO_x gas toxico de color pardo, que es subproducto de procesos de combustión a altas temperaturas, como plantas eléctricas y el parque automotor (Area Metropolitana del Valle Aburrá, 2019).

3.14 Dióxido de Nitrógeno NO_2

El dióxido de nitrógeno, o NO_2 , es un contaminante del aire gaseoso compuesto de nitrógeno y oxígeno y pertenece a un grupo de gases relacionados llamados óxidos de nitrógeno o NO_x . El NO_2 se forma cuando los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo, el gas o el diesel se queman a altas temperaturas. El NO_2 y otros óxidos de nitrógeno en el aire exterior contribuyen a la contaminación por partículas y a las reacciones químicas que producen ozono. Es uno de los seis contaminantes del aire generalizados que tienen estándares nacionales de calidad del aire para limitarlos en el aire exterior.

El NO_2 también se puede formar en el interior cuando se queman combustibles fósiles como la madera o el gas natural. Como fuentes de obtención del contaminante tenemos a los automóviles, camiones y autobuses son las mayores fuentes de emisiones, seguidos de las plantas de energía, los equipos de construcción pesados y otros motores móviles que funcionan con diesel, y las calderas industriales.

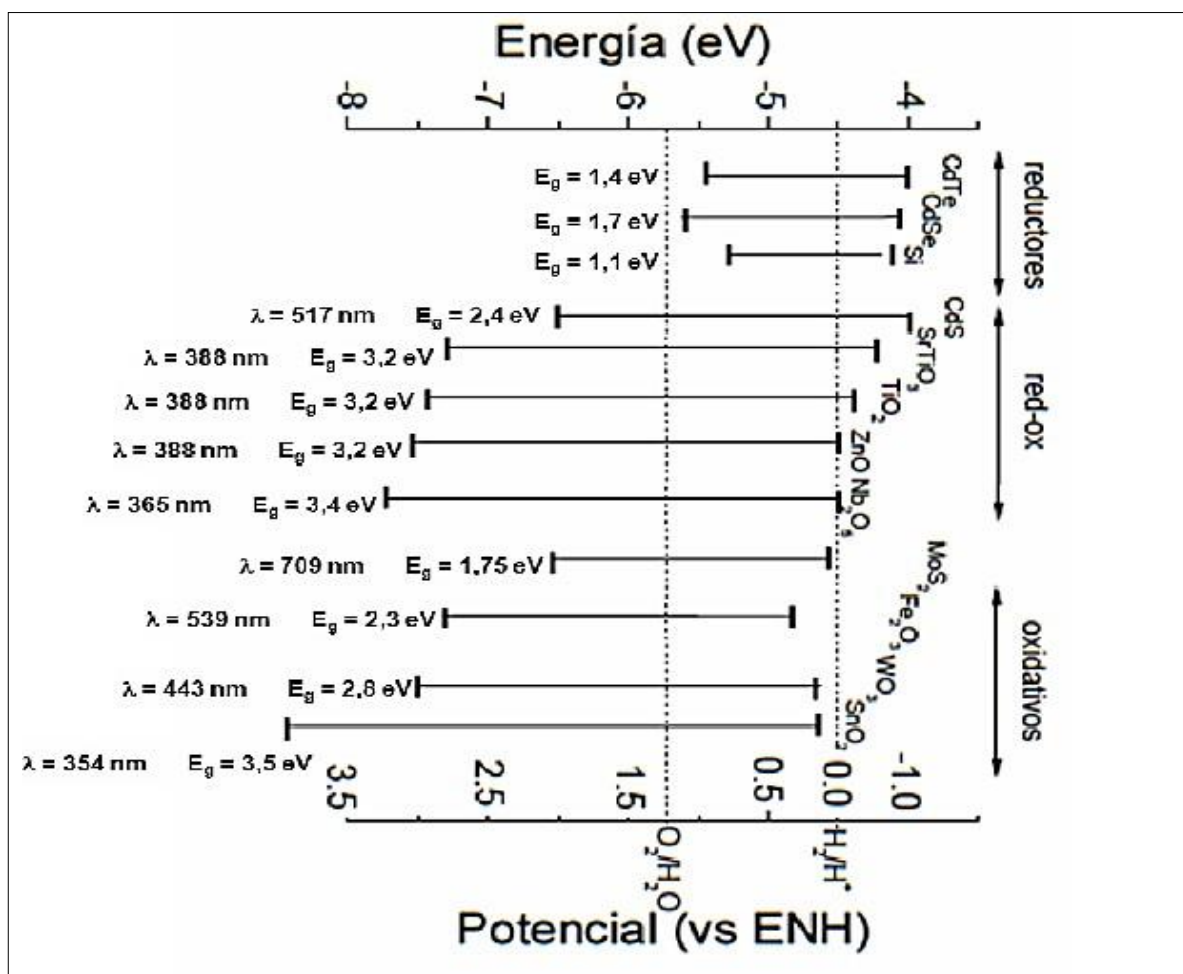
3.15 Longitud de onda e Intensidad de la luz

El dióxido de titanio absorbe longitudes de onda; el cual ocupa un papel necesario para que se dé inicio y activar el proceso fotocatalítico, correspondiente a la radiación UV-A de longitudes de 320-400 nm; es normal que existan otros compuestos que cuentan con la misma propiedad de actividad fotocatalítica que se activan a mayores o menores longitudes de onda, aunque se ha estudiado la “actividad fotocatalítica de otros óxidos como los (óxido de zinc, de estaño, de tungsteno, etc.) y sales (seleniuro de cadmio, sulfuro de cadmio, etc.), en general, los mejores resultados se obtienen con óxidos de titanio dopados con algún metal (plata, oro, etc.), no metal (carbón, nitrógeno, etc.) o mezclado con otros óxidos (óxido de zirconio, óxido de zinc, etc.)”, como menciona el congreso nacional de medio ambiente estas se muestran el gráfico 4. (CONAMA, 2012)

Si los materiales van a ser usados en exteriores, estos son lógicamente activados por la radiación solar activados por la longitud de onda del espectro solar, así al estar debajo de los rayos solares se aprovecha eficazmente las horas de sol en puesta. Al presente no se ha

encontrado otro catalizador que presente con la radiación visible de rayos UV-A una actividad fotocatalítica igual al dióxido de titanio, ya lo mencionaba Pichat en su investigación donde refiere que “...cuando estos materiales se utilizan en interiores la radiación puede seleccionarse con las limitaciones debidas al uso de radiaciones nocivas para la salud (UV-B (320-280 nm), UV-C (280-200 nm), UV lejano (200-10 nm))” (Pichat., 2012), con esos rangos se podrá controlar tanto la longitud de onda como la intensidad para seleccionar fuentes de luz más adecuadas, inclusive se podrán probar con luces, focos lámparas etc. que simulen estos medios.

Gráfico 4. *Compuestos semiconductores con sus bandas de conducción y de valencia porbables de actuar como fotocatalizadores con la radiación UV.*



Tomado de Conama, 2012.

3.16 Rodamina B

La rodamina es el material principal para poder determinar la capacidad fotocatalítica de los adoquines de concreto, mediante su degradación de color se confirmará la degradación de otros contaminantes que se encuentran en la atmosfera, este material es usado en la Norma Italiana UNI 11259-2008 donde el colorante químico evalúa la capacidad fotocatalítica (Jimenez & Castellote).

La rodamina engloba a la familia de compuestos orgánicos heterocíclicos fluorescentes, amino-derivado de Xanteno. Esta familia también puede considerarse como derivado de la fluoresceína, esta familia la componen la rodamina B, la rodamina 6G y la rodamina 123. En la agricultura estos se usan como tratamientos en las semillas para distinguirlas de las tratadas y las no tratadas. En la industria son usados como colorantes en industrias textiles y de papel introducidos en los láseres de colorante, también son comúnmente usados en el agua para determinar la velocidad, el volumen y las direcciones de flujo manteniendo una línea de ubicación. Sus cambios de decoloración son fáciles y poco costosa empleando instrumentos llamados fluorómetro, lo cual representa una ventaja frente a otros pigmentos (Snare, Treloar, Ghiggino, & Thislethwaite, 2012)

Las rodaminas como compuesto orgánico es soluble en agua, metanol y etanol, en cuanto a su toxicidad es considerada como baja, sin embargo existen estudios realizados en los Estados Unidos que catalogan a la rodamina B como sospechosa de poseer propiedades carcinogénicas por lo cual deben llevar una etiqueta de advertencia; se encuentra más comúnmente como un sólido cristalino verdoso, brillante y muy soluble en agua (50g/L) y en alcoholes, dando soluciones de color rojo con fuerte fluorescencia debido al color. Si bien es soluble en agua es importante saber que el agua tratada con cloro como lo es el agua del grifo descompone la rodamina B, así como también estas disoluciones son absorbidas por los plásticos que es su común envasado por tal motivo debe mantenerse en recipientes de vidrio. (Snare, Treloar, Ghiggino, & Thislethwaite, 2012)

La rodamina B tiene características apropiadas para ser elegida como material de diversos tipos de ensayos colorimétricos debido a que: (Snare, Treloar, Ghiggino, & Thislethwaite, 2012):

- Posee baja foto sensibilidad a la luz UV
- Alta estabilidad en un entorno básico
- Alta sensibilidad colorimétrica
- Amplio uso en fotocatalisis

La estructura química de la Rodamina B (C₂₈ H₃₁ ClN₂ O₃), es como se observa en la figura 20.

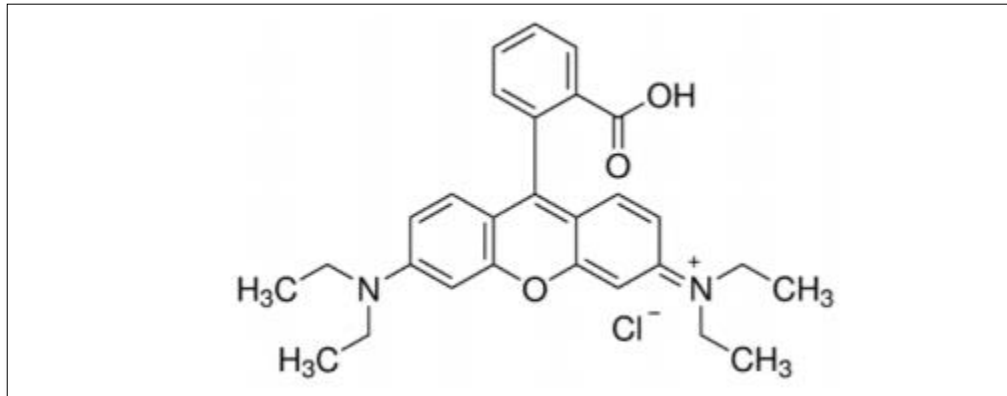


Figura 20: Estructura Química de la Rodamina B (C₂₈ H₃₁ ClN₂ O₃). Tomado de la tesis “Evaluación de la propiedad fotocatalítica de prefabricados para obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio (TiO₂)” (Hernandez, 2019, pág. 55)

3.17 Prueba de Rodamina UNI 11259

La Unificación Nacional Italiana UNI es la asociación que la conforman entes privados y públicos concedido de reconocimiento jurídico, miembro de origen italiano de ISO (Organización Internacional de Estandarización y de CEN (Comité Europeo de Normalización)). Esta asociación ofrece normas técnicas en diversos sectores con excepción de dos el eléctrico y electrónico.

La norma UNI 11259-2008 tiene como objetivo utilizar el método colorimétrico del pigmento rodamina para determinar la actividad fotocatalítica, esta es de manera cuantitativa ya que se toma datos numéricos. (UNI 11259, 2008). Esta norma es comúnmente llamada como la prueba de rodamina, fue divulgada en el año 2008 en el mes de febrero en Italia, Europa.

La metodología de este ensayo se basa principalmente en registrar las variaciones de color en el tiempo con un límite de 26 horas, será tomada en los especímenes elaborados a partir de cemento tratado con el dióxido de titanio previamente pigmentado con rodamina B el cual es un pigmento orgánico, en condiciones bajo radiaciones UV-A usualmente las lámparas UV, con 1 metro de distancia o menos. (Medina Salazar, 2019). La muestra es una mezcla básica que contiene cemento, agregado fino, agregado grueso y agua, y que además es una probeta prismática según la norma.

El pigmento orgánico que menciona es la rodamina B, este colorante rojo debe ser aplicado disuelto en una solución de 0.3 gr de rodamina B disuelto en 120 gr de agua destilada

directo a la superficie de los especímenes o muestras previamente delimitadas por un área circular de $22\pm 2\text{cm}^2$.

Durante el ensayo se observará la actividad fotocatalítica mediante la decoloración de rodamina, en ese sentido el cálculo o medición colorimétrica es con el uso de un colorímetro y la experiencia de un investigador, se realiza mediante la toma de un parámetro "a*" que es la referencia para el color rojo. Para la toma de datos en primera instancia se tomará como primer valor al justo antes de la exposición a la lámpara UV- A, "a*" se mide en el tiempo inicial t_0 , es decir, $a^*(0h)$. Luego, una vez que la lámpara se enciende y comienza con la irradiación de rayos UV -A, se realizan dos medidas más, a 4 horas después del inicio que es un $a^*(4h)$, y después de 26 horas, $a^*(26h)$.

Finalmente se registran los valores R_4 y R_{26} se calculan como sigue en la siguiente fórmula para determinar su capacidad fotocatalítica que deberá ser mayor a un 15% de decoloración para poder validar su actividad fotocatalítica. (Vásquez, 2016).. (UNI 11259, 2008)

$$R_4 = \frac{a^*(0h) - a^*(4h)}{a^*(0h)} \times 100 \quad R_{26} = \frac{a^*(0h) - a^*(26h)}{a^*(0h)} \times 100$$

3.18 Prueba de Autolimpieza

Esta prueba se determina por apreciación u observación, utilizando la rodamina B como colorante orgánico es pintado en la superficie de una estructura de concreto producido con cemento fotocatalítico. El panel o pieza de concreto es sometido a 24 - 48 horas de luz ultravioleta estos datos serán tomados periódicamente. (Tx Active, 2012)

Una de las propiedades con las que cuenta este adoquín fotocatalítico es la autolimpieza y es importante ya que no solo las propiedades físicas y mecánicas del adoquín son relevantes sino también su estética, una prueba de ello es ver como los edificios pierden gradualmente su estética debido al envejecimiento contaminación ambiental que manchan las estructuras y la influencia de tiempo sin embargo el mantenimiento de estas estructuras son constante y a menudo implica más sobrecostos con el uso de otros materiales. El uso de concreto autolimpiable facilita una solución para este problema. (Folli, 2010)

Las propiedades de autolimpieza corresponden en gran parte a la eficiencia de la oxidación de moléculas orgánicas, el gran poder redox de los radicales de oxígeno basados en los rayos UV formados en la superficie del fotocatalizador TiO_2 puede descomponer los

aglutinantes orgánicos. La atmosfera proporciona el agua y el oxígeno los cuales son necesarios para la formación de radicales OH, mientras que la luz UV contenida en la luz solar es necesaria para la activación de TiO₂. (Chen, Kou, & Poon, 2011)

Para medir la durabilidad de las fachadas de edificaciones hechas a base de concreto con dióxido de titanio (TiO₂), serán medidas y controladas midiendo su variación en el tiempo de color de la fachada. Esta proporciona una medida directa de la eficiencia de la auto actividad de limpieza proporcionado por TiO₂ en el concreto. (Tx Active, 2012)

3.19 Normas sobre evaluación de actividad fotocatalítica

Con el propósito de unificar y regular los ensayos que determinan la actividad fotocatalítica de los materiales y su cuantificación, se han publicado varias normas ISO (International Organization for Standardization), se mencionan las siguientes que recabo Mills es sus investigaciones: (Mills & Hill, 2012)

- ISO 22197-1:2007. “Fine Ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials. Part 1: Removal of nitric oxide”, ISO, Ginebra, 2007.
- ISO 22197-2:2011. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials – part 2: Removal of acetaldehyde”, ISO, Ginebra, 2011
- ISO 22197-3:2011. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials – part 3: Removal of toluene”, ISO, Ginebra, 2011.
- ISO 27447:2009. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for antibacterial activity of semiconducting photocatalytic materials”, ISO, Ginebra, 2009.
- ISO 27448:2009. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for self-cleaning performance of semiconducting photocatalytic materials – Measurement of water contact angle”, ISO, Ginebra, 2009.
- ISO 10678:2010. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Determination of photocatalytic activity of surfaces in an aqueous medium by degradation of methylene blue”, ISO, Ginebra, 2010.

- ISO 10677:2011. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Ultraviolet light source for testing semiconducting photocatalytic materials”, ISO, Ginebra, 2011.
- ISO 10676:2010. “Fine ceramics, advanced technical ceramics – Test method for water purification of semiconducting photocatalytic materials by measurement of forming ability of active oxygen”, ISO, Ginebra, 2010.

En la actualidad, en Europa existen ensayos de control de eficiencia hechos en laboratorio para analizar la capacidad fotocatalítica de los materiales, como se detalla a continuación: (CONAMA, 2012)

- Norma Italiana:

- UNI 11247/2010: Determinación del índice de reducción fotocatalítica de óxidos de nitrógeno en el aire por materiales inorgánicos: método de ensayo de flujo continuo.
- UNI 11259/2008: Determinación de la actividad fotocatalítica de los aglutinantes hidráulicos Método de prueba de Rodamina

- Norma Francesa: XP B44-011:2009-12-01: Fotocatálisis - Método de ensayo para la evaluación de materiales fotocatalíticos frente a la degradación de NOx - Método de paso único en modo tangencial.

En Perú aún no existe una normativa que regule este tipo de investigaciones, es por ello que se toma en referencia a normas internacionales como las ISO o ensayos internacionales más específicos, la normativa italiana es de fácil comprensión como también de aplicación para analizar la eficiencia en la reducción de concentraciones de óxidos de nitrógeno.

Al día de hoy, existen muchos grupos de trabajo e investigación a nivel internacional (AENOR, CEN, European Federation of Photocatalysis) que están realizando investigaciones, con el objetivo de unir y normalizar este tipo de pruebas a nivel internacional, es necesario que en Latinoamérica se den estos grupos de investigación especializados donde se realicen más proyectos profundos sobre la fotocatalisis y así ampliar el alcance de conocimientos. (Tx Active, 2012)

Uno de estos proyectos se formó en Europa llamado PICADA a inicio del 2001 en donde durante 4 años y medio se formó un consorcio de gobiernos europeos, con la ayuda de laboratorios independientes de investigación, inclusive universidades, empresas contratistas y

fabricantes para investigar, evaluar y validar el efecto de la descontaminación de concretos o cementos fotocatalíticos, todo con el único fin de mejorar el sector construcción y su relación con el medio ambiente. (Tx Active, 2012)



Figura 21. Proyecto PICADA – Países Conformantes. Tomado de “The Photocatalysis Active Principle” (Tx Active, 2012)

Mediante ensayos de laboratorio y las evaluaciones de campo in situ, PICADA pudo demostrar que el concreto fotocatalítico funciona eficientemente para la degradación de los contaminantes que se encuentran en el ambiente.

Una compilación de las investigaciones, estudios y proyectos ejecutados por PICADA puede ser estudiados en línea a través de su página web en www.picada-project.com. Por otro lado, PICADA desarrolló procedimientos de prueba que son utilizados para medir el rendimiento o capacidad de los concretos fotocatalíticos como materiales de construcción que puedan adaptarse en cualquier medio contaminado. (Morbi, Cangiano, & Borgarello, 2010)

CAPÍTULO 4: PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS ADOQUINES

4.1 Adoquín Tipo II

Los adoquines son unidades con medidas preestablecidas de concreto simple que pueden ser hechos manualmente o mecanizados, este último utiliza máquinas especializadas con vibro compactación para eliminar las burbujas de aire, por otro lado dentro sus ventajas, los adoquines cuentan con un proceso de producción muy rápido y eficaz ya que desde el inicio de la fabricación a las 48 horas ya pueden ser puestos en obra previa aprobación del área de calidad, esto es debido a que alcanzan altas resistencias a temprana edad, son confortables, seguros, y sobre todo económicos; en el caso de lluvias tiene un comportamiento permeable ya que el agua penetra directamente al suelo, otra de sus fortalezas de estos adoquines es su gran capacidad de bajo costo en mantenimiento al ser piezas únicas e independientes, pueden ser reemplazables en caso se encuentre mal un sector; este es un factor muy conveniente para poder sacar el línea de tiempo las comparaciones con su costo-beneficio.

Por su belleza estética, para los diseños arquitectónicos y la diversidad de colores, alta resistencia al desgaste, facilidad de instalación y mantenimiento, los adoquines de concreto son un recurso práctico para la construcción de pavimentos, calzadas, patios, jardines, etc.

Los adoquines de acuerdo al uso pueden ser usados para tránsito vehicular como para tránsito peatonal y patios industriales; a nivel arquitectura es mucho más estético en comparación con los pavimentos que son monocromos es por ello en los últimos años en el país muchas ciudades han optado por colocar en el centro histórico el adoquinado.

Adoquines para pavimentos de tránsito vehicular ligero, la NTP 399.611 (2015) menciona como requisitos físicos de acuerdo a la siguiente tabla 9, tener en cuenta que el valor mostrado son estándares en cambio el de paréntesis es solo de información,

Tabla 9. *Requerimientos mínimos de los adoquines según la NTP 399.611*

Tipo	Espesor nominal (mm)	Resistencia a la compresión, mín. MPa (kg/cm ²)	
		Promedio de 3 unidades	Unidad individual
I (peatonal) Tipo B,C y D *Todos los tipos	40	31 (320)	28 (290)
	60	31 (320)	28 (290)
II (Vehicular ligero)	60	41 (420)	37 (380)
	80	37 (380)	33 (340)
	100	35 (360)	32 (325)
III (Vehicular pesado, patios industriales o de contenedores)	≥ 80	55 (561)	50 (510)

Tomado de la NTP 399.611

4.2 El concreto

Durante muchos años hasta nuestros días el concreto como material de construcción es el más comercial y tradicional, además de ser un producto artificial, este concreto está constituido por la mezcla de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, esta mezcla en principio se muestra como una estructura plástica y moldeable y al término de este proceso adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes, debido a estas características hace del concreto un material ideal para la construcción, hoy en día existen diversos tipos de construcción como madera, acero, vidrio, plástico etc. pero el concreto en todo el mundo es usado por su plasticidad, bajo costo, manejabilidad para poder amoldarse a diversas formas a diferencia del acero que es rígido o como la madera. (Pesquel Carvajal, 1998)

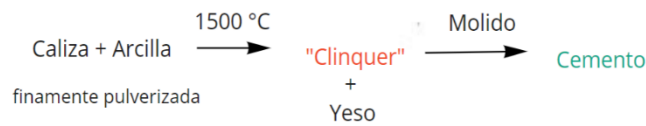
De la definición que da Pesquel se entiende que al conjugar las proporciones de los componentes se obtendrían diferentes propiedades de la mezcla, incluso al agregar los aditivos se modificarían estas propiedades entonces para poder conocer más de este material que es ideal para la construcción es necesario investigar las posibles modificaciones con otros componentes o aditivos para conocer más de sus propiedades.

4.3 El cemento HE -Portland

La oferta para el tipo de cemento HE en la ciudad de Arequipa está conformada por las empresas como Cementos Yura, Cemento Pacasmayo, Cementos Sol y otros, estos cementos están compuesto por materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice que se encuentran en la arcilla o pizarra además del yeso. El proceso de fabricación del cemento comienza con la fina pulverización de la caliza y arcilla (con una elevada cantidad de C_3S silicato tricálcico responsable del endurecimiento inicial) que ha una temperatura elevada de $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ mediante un proceso de calcinación en hornos rotatorios de gran dimensión se sintetizan y se funden, formando bolas conocidas como “Clinker o clinker”; finalizado este proceso el clinker se enfría y se le agrega yeso en bajas proporciones.

Finalmente, se le adiciona material puzolánico volcánico en el caso de cemento HE de cementos yura, para su posterior triturado en molino de última generación hasta obtener un polvo fino; el producto comercial resultante es el cemento Portland, conocido y comercialmente listo para la venta (Rivera, 2002).

Al sintetizar la definición anterior la ecuación sería:



Dentro de las propiedades de este tipo de cemento es que alcanza resistencias iniciales altas, aumenta la impermeabilidad, cuenta con un alto calor de hidratación y una resistencia baja a los sulfatos, se obtiene una mejor plasticidad y trabajabilidad en concretos. Siendo la investigación de carácter ambiental este tipo de cemento también esta alineado con ello ya que cuenta con beneficios ambientales como un menor consumo energético y menor emisión de gases de efecto invernadero dentro de su fabricación. Dentro de las recomendaciones de su uso es un curado con abundante agua, mantener humectada la superficie para lograr la mayor resistencia y así evitar los fisuramientos por excesivo secado; el almacenamiento de las bolsas de cemento deberá de ser en un ambiente seco, bajo techo donde este separado del suelo y paredes, protegerlo de la humedad si es necesario cubrir con polietileno para almacenamientos prolongados; también dentro de las recomendaciones se debe evitar apilar más de 10 bolsas.

Por otro lado, la norma internacional ASTM C 150 (Tipo III) establece cinco diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción, de la misma manera la NTP 334.009 (Tipo III), NTP 334.082 (Tipo HE) y ASTM C-150-99.A.

Tipo I: Normal. Para uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento.

Tipo II: Moderado. Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.

Tipo III: Altas resistencias. Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.

Tipo IV: Bajo calor de hidratación. Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.

Tipo V: Resistente a la acción de los sulfatos. Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

Finalmente se puede resumir que el cemento es un conglomerante hidráulico que al adicionarle agua se logra obtener una reacción química en su composición, que le otorga la trabajabilidad y que posteriormente se endurece.

Además, el cemento in-situ deberá cumplir un control de calidad exhaustivo para asegurarse de cumplir con las condiciones requeridas, ya que si este cemento antes de ser puesto en ejecución estuvo expuesto a lluvias como es el clima de gran parte de las regiones del país, podría configurar y modificar sus características.

Es importante mencionar que el uso de este tipo de cemento HE es comúnmente usado en la fabricación de prefabricados como adoquines, bloques, bloquetas y demás elementos debido a que la elaboración de estos requiere de una alta rotación de producción, que abarca desde el traslado de las unidades hasta su comercialización, es por ello que se requiere tener una pronta disponibilidad de los moldes y solo es posible con el uso de este cemento que permite alcanzar resistencias iniciales suficientes para soportar un desmoldeo con seguridad y sin deformaciones excesivas de los esfuerzos que estará sometido durante y después del desmoldeo.

4.4 Agua de mezcla y agua de curado

El agua que se utiliza tanto para la preparación de la mezcla como para el curado deberá de cumplir con los estándares nacionales como es la norma NTP 334.088 donde específica que se debe de utilizar agua potable; es importante tener en cuenta la cantidad de iones de cloruro el cual está delimitado en la norma peruana; el agua cumple dos funciones muy importantes, la primera y en principio es que permite la hidratación del cemento y segundo que hace que la mezcla sea manejable el cual es también característica importante para poder ser versátil.

Profundizando en la primera función, el agua que hidrata al cemento no es del 100 por ciento ya que parte de esta se evapora y no presenta una alteración, al evaporarse deja vacíos los cuales disminuyen y altera la resistencia y la durabilidad del mortero o concreto. Según Rivva menciona que la cantidad de agua varía entre 25 a 30% de la masa de cemento para hidratar la mezcla, pero con esta cantidad la mezcla no es manejable la cual también es una función importante del concreto, por ello se requiere como mínimo una cantidad de agua del orden del 40% de la masa del cemento, entonces se ha visto como práctica común que se coloque una cantidad menor de agua para ir graduándola hasta conseguir una mezcla trabajable de esta manera el trabajador no tendrá problemas al momento de colocar el concreto evitando problemas por la mala trabajabilidad del concreto. (Rivva Lopez, 2000)

4.5 Los agregados para el concreto

Los agregados comúnmente llamados como áridos son aquellos materiales inertes que están en la naturaleza los encuentran de forma granular, según su extracción pueden ser de forma naturales es decir directamente de una cantera o artificiales los cuales pasan por procesos de chancado para conseguir tamaños que se requieran, estos áridos al aglomerarlos con el cemento Portland adicionado de agua constituyen un todo compacto, conocido como concreto. Los agregados dentro de la mezcla de concreto son considerados a todos los materiales que tengan y aporten una resistencia y que además no modifiquen ni perturben desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas con el fin de garantizar una adherencia con la pasta endurecida del cemento Portland para prestar un servicio de construcción de estructuras. (Rivera, 2002)

Por otro lado, según la ASTM denomina a los agregados a todos aquellos materiales granulares el cual puede ser desde grava, arena, piedra triturada o escoria el cual aplicado en un medio cementante forma un concreto o un mortero hidráulico.

4.5.1 Clasificación de los agregados

Esta clasificación es comúnmente se acuerdo al tamaño del agregado el cual varía desde partículas pequeñas hasta partículas de gran tamaño, de acuerdo a esta clasificación se denomina Granulometría, el cual estudia la distribución de estas partículas y las clasifica.

De acuerdo a la clasificación unificada los suelos se dividen en suelos finos que son pasantes del tamiz N°3/8 y quedan retenido en la malla N°200 dentro de estos el más usual es la arena tanto gruesa como fino resultado de la desintegración de las rocas.

Por otro lado, el agregado grueso es el retenido del tamiz N°4; también proviene de la desintegración de las rocas y se puede clasificar en piedra chancada y gravas. Para la elaboración de mezclas de mortero o de concreto se emplean los agregados gruesos y agregado fino.

4.5.2 Funciones del agregado

Las funciones del agregado que desempeña dentro de la mezcla del concreto se dividen en tres que se detallan a continuación estas son según el libro de Rivera:

- Los agregados brindan un relleno a la pasta así reduce el contenido de pasta por unidad de volumen traducido es costo se reduce ya que este ocupa un volumen dentro de la pasta además de que el agregado es relativamente más bajo que el cemento.
- Las partículas de los agregados ayudan a resistir el desgaste propio o intemperismo que se puedan actuar sobre el concreto.
- El agregado ayuda a reducir los cambios de volumen que son el resultado del fraguado y endurecimiento además del humedecimiento y secado; o de calentamiento de la pasta.

4.6 Diseño de mezclas de concreto

Es importante conocer los parámetros para el cálculo del diseño de mezcla, propiedades como la trabajabilidad, resistencia y durabilidad parametrizan estos valores. La trabajabilidad va a variar de acuerdo a la granulometría, forma y textura de los agregados, las proporciones del agregado fino y grueso, inclusive los aditivos pueden ayudar a la trabajabilidad y plasticidad de la mezcla. La resistencia a la compresión es el objetivo principal de la mezcla ya que determina el uso de aplicación que uno espera; la durabilidad de la mezcla debe de ser capaz de soportar exposiciones como congelación, deshielo, ciclos como el mojado y secado, calentamiento y enfriamiento, que la superficie pueda estar en contacto con sustancias químicas, ambiente con sales como son riveras marinas entre otras.

Dentro de los métodos de diseños más conocidos está el método ACI 211, método del módulo de fineza, método Walker, método empírico entre otros; es muy común empezar el diseño con la relación a/c para poder determinar las dosificaciones consiguientes debido a que el agua en el concreto (relación agua/cemento), es la que determina la resistencia del mismo y en condiciones normales su durabilidad.

Concretos con relación agua/cemento muy altas por encima de $a/c= 0.5$ pueden traer como consecuencia resistencias bajas además de ser susceptibles a ser atacados por agentes externos. En caso contrario si la relación agua/cemento son bajas menores a $a/c=0.45$ contribuyen de manera positiva a la resistencia a la compresión del concreto además de tener un mejor comportamiento al ataque de agentes contaminantes del medio ambiente y como consecuencia una mayor durabilidad (Rivera, 2002).

La investigación presente se basará para la certificación del cumplimiento de los requisitos de la variable resistencia a la compresión, en los resultados de laboratorio del ensayo de los adoquines. Es importante mencionar que para el diseño de mezcla también se pueden elaborar siguiendo el diseño de mezclas de ACI o mediante el método empírico de prueba y error.

4.7 Resistencia a la compresión

Se define como la máxima medida de la resistencia sometida a una carga axial a las muestras o especímenes de concreto; regularmente, se expresa en unidades de kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm^2), Megapascuales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg^2 o psi) a la edad de 28 días, con frecuencia de 7 días se hace el control para conocer el comportamiento de esta a los 7,14, 21 y 28 días finalmente. El concreto está propuesto especialmente a tomar esfuerzos de compresión, se utiliza como índice de calidad la resistencia a estas cargas axiales por unidad de medida. (Rivera, 2002)

Notaciones:

$f'c$: Es la resistencia a la compresión del concreto, se expresa comúnmente en Kg/cm^2 .

$f'cr$: Conocida como la resistencia a compresión promedio requerida, es requerida para la selección de los materiales en diversas proporciones que intervienen en la unidad cubica de concreto, se expresa comúnmente en Kg/cm^2 .

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis del ensayo resistencia a la compresión (NTP 366.611-NTP 366.604)

5.1.1 Ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 3 días

En la siguiente tabla se muestra las resistencias a la compresión de los especímenes de concreto a la edad de 3 días, por cada tratamiento de porcentaje se hicieron 3 roturas para tener un dato promedio que pueda ser comparado con los otros tratamientos.

Tabla 10. *Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 3 días para los distintos tratamientos.*

Especímen	Edad	TiO ₂			
		0%	3%	7%	12%
AF-01	3 días (Kg/cm ²)	379.90	437.38	387.81	383.07
AF-02		474.13	434.94	330.32	383.48
AF-03		423.81	469.54	386.98	406.66
Promedio		425.95	447.29	368.37	391.07

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 10. se puede resumir los datos obtenidos de la siguiente manera para cada tratamiento realizado de acuerdo a 0, 3, 7 y 12% de TiO₂ como se observa en la tabla siguiente.

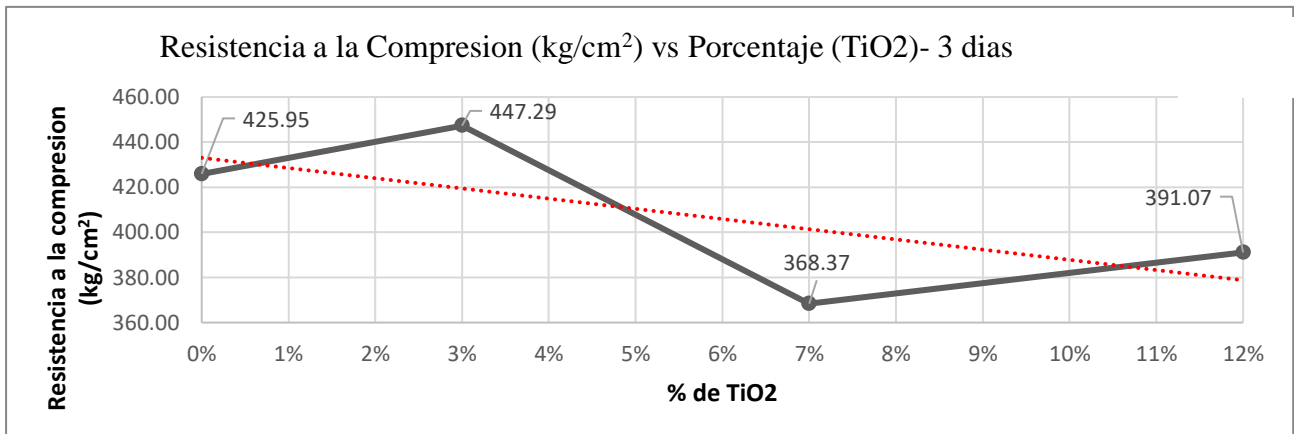
Tabla 11. *Promedios resumen de la resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 3 días para los distintos tratamientos.*

Resistencia a la Compresión para los tratamientos de Dióxido de Titanio (TiO ₂) a la edad de 3 días			
0%	3%	7%	12%
425.95	447.29	368.37	391.07

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla nos muestra los valores promedios, para poder conocer su relación entre las variables se hizo el gráfico siguiente donde se colocó la variable independiente en el eje x y la dependiente en eje y; se observa el pico más alto del gráfico 5 que corresponde al 3% de TiO₂, en contraste a la resistencia mínima alcanzada por el tratamiento de 7% de TiO₂, estas serán descritas con mayor análisis en los siguientes ítems.

Gráfico 5. Resistencia a la Compresion (kg/cm²) vs Porcentaje (TiO₂)- 3 dias



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar como en el gráfico 5 el adoqueín elaborado con 0% de dióxido de titanio obtuvo la resistencia promedio de (425.95 kg/cm²) superando en 1.42% la resistencia de diseño de 420 kg/cm².

El adoqueín con 3% de dióxido de titanio mostro el máximo valor promedio de resistencia a la compresión a los 3 días de edad (447.29 kg/cm²), superando en 6.5% la resistencia de diseño de 420 kg/cm².

El adoqueín con 7% de dióxido de titanio presenta el menor valor promedio de resistencia a la compresión a la edad de 3 días (368.37 kg/cm²) habiendo llegado a un 87.71% de la resistencia de diseño, este comportamiento es esperado ya que a los 3 días se espera que haya alcanzado el 80% de la resistencia el adoqueín.

El adoqueín con 12% de dióxido de titanio presenta el valor de resistencia a la compresión a la edad de 3 días (391.07 kg/cm²) habiendo alcanzado un 93.11% de la resistencia de diseño de 420 kg/cm².

Por otro lado, la gráfica aún no se puede concluir un patrón o relación por lo que el comportamiento que mostro es muy variable y no se tiene una tendencia lineal. Bajo esta premisa se continua con los ensayos para poder establecer las conclusiones.

5.1.2 Ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 7 días

En la siguiente tabla 12 se muestra las resistencias a la compresión de los especímenes de concreto a los 7 días, para este análisis se hicieron 3 roturas por cada tratamiento de dióxido de titanio TiO_2 , con el fin de obtener un dato promedio que pueda ser comparado con los otros tratamientos.

Tabla 12. *Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 7 días para los distintos tratamientos.*

Especímen	Edad	TiO_2			
		0%	3%	7%	12%
AF-01	7 días (Kg/cm ²)	383.06	460.24	390.75	424.05
AF-02		372.72	459.45	377.52	417.22
AF-03		377.86	464.14	363.84	434.14
Promedio		377.88	461.28	377.37	425.14

Fuente: Elaboración propia

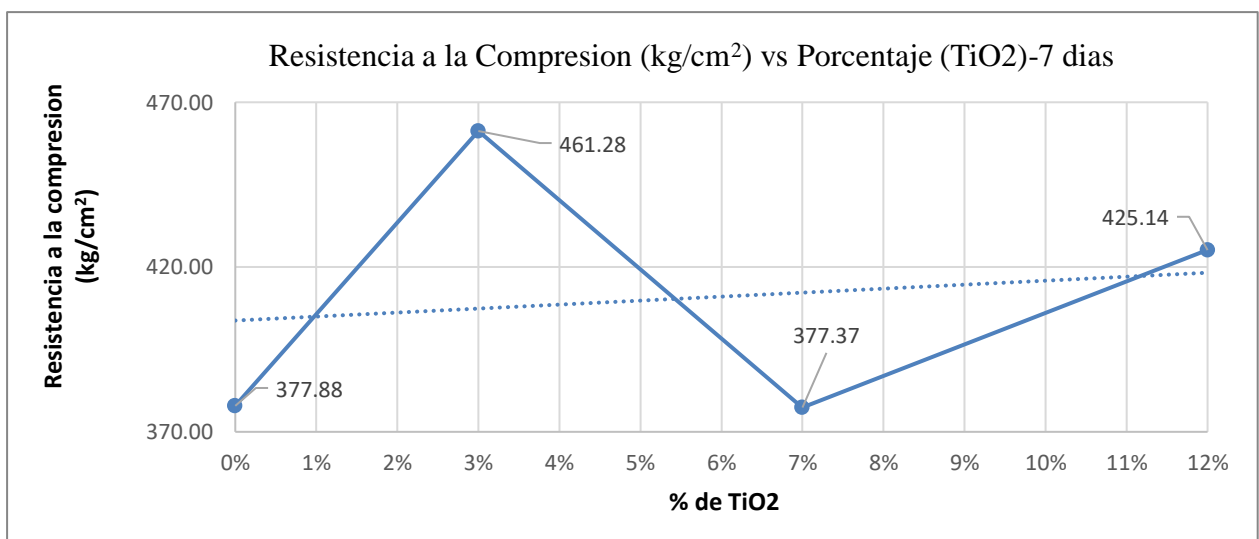
De acuerdo a la tabla 12. se puede resumir de la siguiente manera para cada tratamiento realizado.

Tabla 13. *Promedios resumen de las resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 7 días para los distintos tratamientos.*

Resistencia a la Compresión para los tratamientos de Dióxido de Titanio (TiO_2) a la edad de 7 días			
0%	3%	7%	12%
377.88	461.28	377.37	425.14

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6. *Resistencia a la compresión promedio a los 7 días vs % TiO_2*



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el gráfico 6. el adoquín tratado con 0% de dióxido de titanio obtuvo la resistencia promedio de (377.88 kg/cm²) con una disminución del 11.29% con respecto a la resistencia obtenida a los 3 días de (425.95 kg/cm²); con respecto a la resistencia de diseño de 420 kg/cm² esta ha alcanzado a los 7 días el 89.97%, esta disminución de resistencia del adoquín podría explicarse por un error operativo debido a que el refrentado de azufre no haya sido bien adherido de manera uniforme.

El adoquín con 3% de dióxido de titanio presentó el mayor valor promedio de resistencia a la compresión a la edad de 7 días (461.28 kg/cm²), con un aumento del 3.13 % respecto a la resistencia de los 3 días de (447.29 kg/cm²) superando en 9.83% a la resistencia de diseño de 420 kg/cm², este comportamiento lineal positivo es propio del concreto, se puede concluir que la adición del dióxido de titanio no afecta negativamente al concreto.

El adoquín con 7% de dióxido de titanio presenta el menor valor promedio de resistencia a la compresión (377.37 kg/cm²) con un aumento del 2.44 % respecto del valor a los 3 días de (368.37 kg/cm²), alcanzando el 89.85% de la resistencia de diseño de 420 kg/cm². La resistencia de (377.37 kg/cm²) es semejante a la resistencia de (377.88 kg/cm²) que corresponde al tratamiento de 0% de dióxido de titanio a la edad de 7 días.

El adoquín con 12% de dióxido de titanio presenta el valor promedio de resistencia a la compresión (425.14 kg/cm²) con un incremento del 8.87% respecto al valor obtenido a los 3 días de (391.07 kg/cm²) el cual supero en 1.22 % de la resistencia de diseño de 420 kg/cm².

5.1.3 Ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 28 días

Tabla 14. *Ensayo de resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 28 días para los distintos tratamientos.*

Especimen	Edad	TiO ₂			
		0%	3%	7%	12%
AF-01	28 días (Kg/cm ²)	436.14	446.94	413.23	411.37
AF-02		449.28	453.78	426.40	421.11
AF-03		415.30	432.29	448.58	416.18
Promedio		433.57	444.34	429.40	416.22

Fuente: Elaboración propia

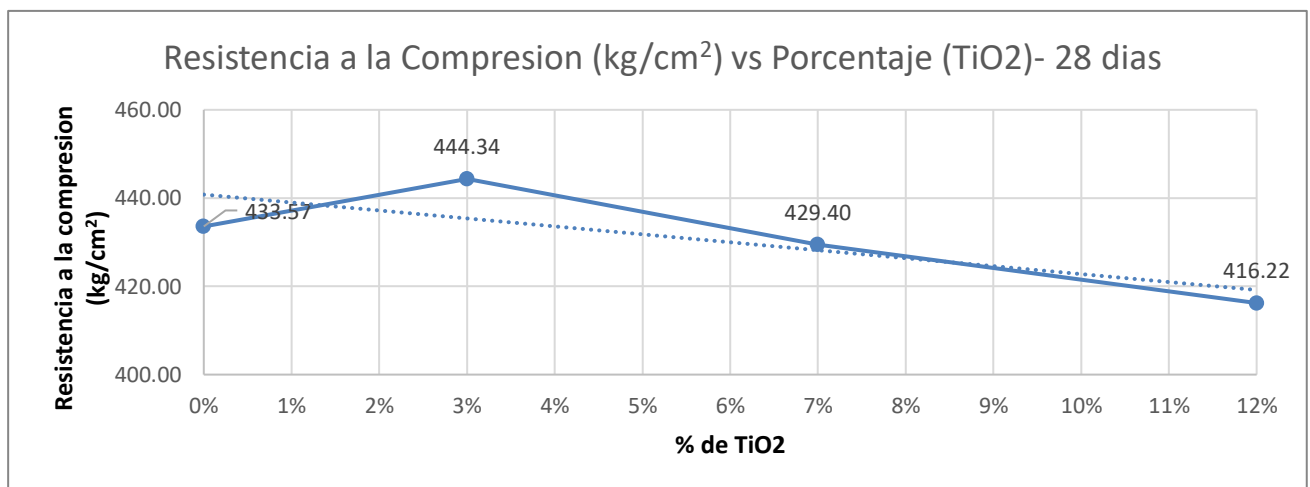
De acuerdo a la tabla 14 se puede sintetizar de la siguiente manera para cada tratamiento realizado.

Tabla 15. Promedios resumen de las resistencia a la compresión de adoquines a la edad de 28 días para los distintos tratamientos.

Resistencia a la Compresión para los tratamientos de Dióxido de Titanio (TiO ₂) a la edad de 28 días			
0%	3%	7%	12%
433.57	444.34	429.40	416.22

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7. Resistencia a la compresión promedio a los 28 días vs % TiO₂



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 7 se observó que el adoquín elaborado con 0% de dióxido de titanio obtuvo la resistencia promedio de (433.57 kg/cm²) con un aumento del 14.74% con respecto a la resistencia de los 7 días (377.88 kg/cm²) , así mismo esta supera en 3.23% a la resistencia de diseño de 420 kg/cm².

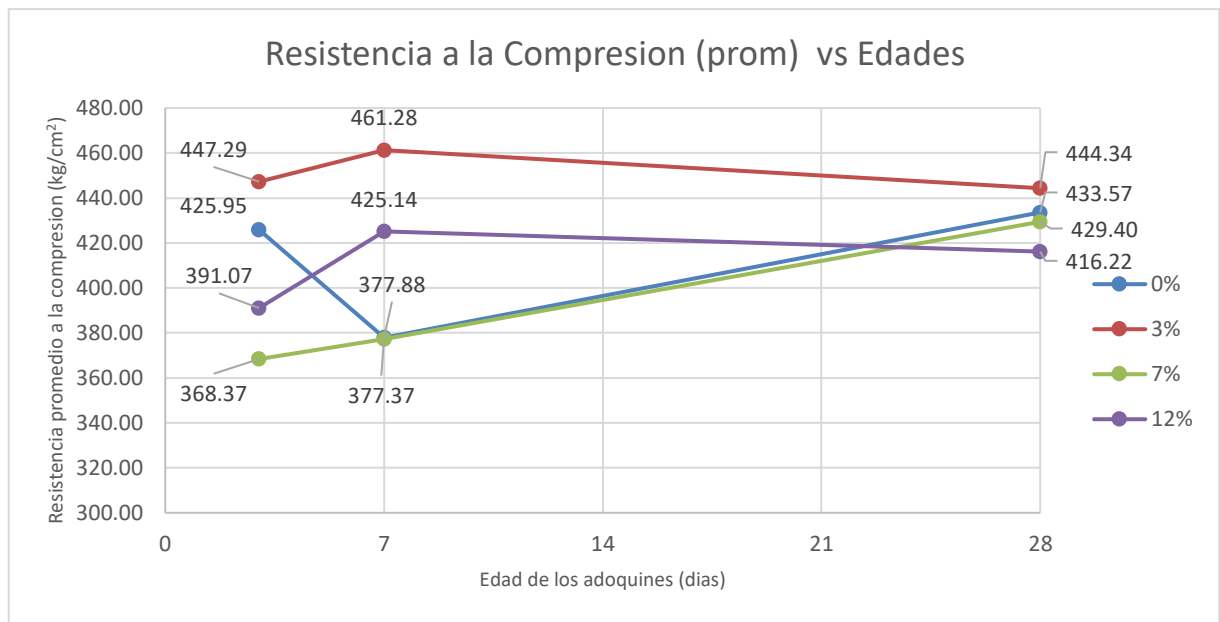
El adoquín con 3% de dióxido de titanio presentó el mayor valor promedio de resistencia a la compresión a la edad de 28 días (444.34 kg/cm²), con una disminución de 3.67% respecto a la resistencia de los 7 días (461.28 kg/cm²), así mismo esta supera en 5.80% a la resistencia de diseño de 420 kg/cm², este comportamiento se debe a que el proceso de curado se dio durante 7 días el cual favoreció a su incremento de resistencia; sin embargo, a los 28 días disminuyó su resistencia debido a que no fue suficiente los días de curado para lograr su resistencia proyectada.

El adoquín con 7% de dióxido de titanio presenta el valor promedio de resistencia a la compresión (429.40 kg/cm²), con un aumento progresivo de 13.79% respecto a la resistencia de los 7 días (377.37 kg/cm²), así mismo esta supera en 2.24% a la resistencia de diseño de 420 kg/cm².

El adocuin con 12% de dióxido de titanio presenta el menor valor promedio de resistencia a la compresión a la edad de 28 días (416.22 kg/cm²) el cual no supero la resistencia de diseño de 420 kg/cm² es más tuvo una disminuci3n de 2.10% frente a la lectura de 7 días (425.14 kg/cm²), este comportamiento puede responder a los 7 días de curado al que fue sometido.

5.1.4 Análisis de la resistencia promedio y edad para los distintos tratamientos

Gráfico 8. Resistencia promedio y edad para los distintos tratamientos de TiO₂



Fuente: Elaboraci3n propia

En el gráfico 8 se observa un consolidado del comportamiento de los especímenes a las edades de 3, 7 y 28 días; estos valores promedios de resistencia a la compresión son variables ya que el tratamiento con 3% de TiO₂ (447.29 kg/cm²) a los 3 días tuvo el más alto valor sin embargo a los 28 días (444.34 kg/cm²) no tuvo el desempeño esperado lineal de pendiente constante, a pesar de haber superado en 3.67% la resistencia de diseño de 420 kg/cm², se puede explicar que el curado el cual fue sometido hasta el séptimo día, punto de inflexión de la recta, pueda haber afectado dentro de la configuraci3n del cemento con el dióxido de titanio a su resistencia final.

En el caso del adocuin con 0% de TiO₂, se estima que el desempeño ha sido afectado por una falla manual debido a la desuniformidad del refrentado de azufre o por haber sufrido durante la rotura fallas por concentraci3n de esfuerzos, a los 3 días (425.95 kg/cm²) supera el valor de diseño sin embargo a los 7 días cae a (377.88 kg/cm²) para finalmente terminar a los 28 días (433.57 kg/cm²) cumpliendo con el valor esperado superando en 3.23% el valor de diseño del adocuin de 420 kg/cm².























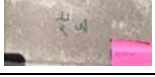













El comportamiento del adoquín de 12% y 3% es muy semejante, por lo tanto, es probable que haya ocurrido la misma falla, a los 7 días fue el punto de fricción ya que a los 28 días cae para dejar de ser un desempeño lineal, sin embargo, no cumple a los 28 días el valor de diseño, este resultado es debido a que el 12% de dióxido de titanio con respecto del peso de cemento, es una gran parte sustituida, por lo que debilita la estructura, así mismo queda evidenciado y verificado que a mayor cantidad de dióxido de titanio será menor la resistencia del concreto.

El desempeño del adoquín de 7% es a diferencia de los demás tratamientos el que mejor comportamiento tiene con una tendencia lineal y un aumento progresivo a los 3 días de (368.37 kg/cm²) alcanzando un 87% respecto a la resistencia de diseño de 420 kg/cm², así mismo a los 7 días de (377.37 kg/cm²) alcanzando 89.85% respecto a la resistencia de diseño de 420 kg/cm², y finalmente a los 28 días con (429.40 kg/cm²) cumpliendo así con la resistencia de diseño de 420 kg/cm² superando en 2.24% a esta. Bajo este análisis el tratamiento de 7% es el más óptimo para el ensayo de resistencia con respecto a la cantidad de dióxido de titanio debido a su relación lineal entre ambas variables y su comportamiento predecible de acuerdo a la resistencia a la compresión.

5.2 Análisis de los adoquines fotocatalítico con la prueba de Rodamina

5.2.1 Análisis de los adoquines fotocatalítico con 0, 3, 7 y 12% de TiO₂ en los 3 días.

Tabla 16. Registro fotográfico de adoquines de concreto fotocatalítico a los diferentes tratamientos de 0, 3, 7 y 12% de TiO₂

No. Lectura	Fecha	Hora	T °C	Registro fotográfico de adoquines de concreto fotocatalítico			
				0%	3%	7%	12%
1	11-Ago	11:30am	21				
							
							
2	12-Ago	11:30am	22				
							
							
3	13-Ago	11:30am	22				
							
							

Fuente: Elaboración propia

El adoquín adicionado con 0% de dióxido de titanio, conforme pasaban las horas continuó manchado sin degradarlo como se muestra en las fotos de la tabla, es a consecuencia de no contar con el fotocatalizador es por ello que como cualquier material solo lo absorbe, hasta la última toma el pigmento penetra en el adoquín sin tener en evidencia la degradación.

La capacidad autolimpiante del adoquín con 3% de dióxido de titanio se ha evidenciado mediante la degradación de la rodamina b actuando eficaz y eficientemente para esta prueba ya que a la tercera toma ha disminuido la intensidad del color validando su propiedad autolimpiante.

La capacidad autolimpiante del adoquín con 7% de dióxido de titanio, presentó en su primera lectura mostraba un rojo más oscuro en la superficie, conforme pasaron las horas en

la lectura 2 ya había degradado el colorante de rodamina b disuelto en agua destilada más que el adoquín de 3% es decir actuó eficazmente y con ello al tercer día de lectura el adoquín se muestra que en uno de ellos está limpio del colorante con ello valida su propiedad autolimpiante.

La capacidad autolimpiante del adoquín con 12% de dióxido de titanio, en la primera lectura mostraba un rojo más claro en comparación con los demás, es debido a que por la alta cantidad de dióxido de titanio el adoquín tomo un color blanquecino a diferencias de los diferentes tratamiento, conforme pasaron las horas en la lectura 2 el adoquín había degradado el colorante de rodamina b pero no con el mismo desempeño que el de 3 o 7%, esto demuestra y valida como en otras investigaciones concluyen que el hecho de aumentar el fotocatalizador no es directamente proporcional a la capacidad autolimpiante, para el adoquín con 12% también se valida su propiedad autolimpiante.

5.2.2 Análisis Final de la prueba Rodamina con los adoquines en distintos tratamientos.

Al observar los datos cualitativos obtenidos durante el ensayo se evidencia que la degradación de colorante orgánico de rodamina B, actúa eficazmente en la muestra de los adoquines de 3 y 7% de TiO_2 , ya que ambos se eliminan al tercer día el color rojo obtenido por el colorante Rodamina B contrario a los adoquines de 0% y 12% de TiO_2 .

Se concluye que los adoquines en presencia de contaminantes ocasionados por la combustión vehicular de la Av. Independencia a una temperatura promedio de 22 °C con rayos UV de valor 12 promedio de los tres días de ensayo, la cual es valorada como extremadamente alta, esta información es obtenida del pronóstico de radiación UV máximo del SENAMHI en su página web diariamente, se han desempeñado de manera eficaz teniendo como el mejor comportamiento a las proporciones de 3 y 12% de TiO_2 .

CONCLUSIONES

- La hipótesis se validó, ya que tanto el tratamiento de 3 y 7% no perjudicaron la resistencia del concreto inclusive la optimizaron a los 28 días, además que cumplió con su propiedad autolimpiante.
- La variable resistencia a la compresión se demostró que los tratamientos con 0% (433.57 kg/cm²), 3% (444.34 kg/cm²) y 7% (429.40 kg/cm²) cumplieron y superaron la resistencia requerida de 420kg/cm², en cambio el tratamiento con 12% (416.22 kg/cm²) no cumplió con la resistencia requerida.
- En el ensayo de capacidad autolimpiante el tratamiento con 3 y 7% de TiO₂ actuaron eficazmente, ya que al tercer día de lectura los adoquines presentan mayor degradación de colorante frente a las otras muestras con ello validan su propiedad autolimpiante.
- Se concluyó que el tratamiento con 7% de TiO₂ fue el óptimo con respecto al tratamiento con 0% de TiO₂ que es el adoquín patrón o base por mostrar un equilibrio en las 2 propiedades evaluadas como son la resistencia a la compresión y propiedad autolimpiante. El análisis del estudio brindo que el adoquín con 7% de TiO₂ se comportó de manera lineal durante las edades de 3,7 y 28 días y alcanzó la resistencia requerida con un curado de 7 días, además en cuanto a su propiedad fotocatalítica también logro degradar la coloración de la rodamina B con mejor desempeño que los otros tratamientos, es por ello que es el tratamiento óptimo para la dosificación planteada de relación a/c de 0.4 y relación 1:3 cemento: arena.
- Se concluye que el aumento del fotocatalizador de dióxido de titanio no es directamente proporcional a su propiedad autolimpiante, ya que el adoquín con 12% de TiO₂ no tiene el desempeño eficiente como los tratamientos de 3 y 7% es por ello que el aumento del dióxido de titanio no es proporcional a su capacidad autolimpiante, además resultó que la única muestra que no fue autolimpiante fue el tratamiento con 0% de TiO₂ debido a que no cumplió con la medida cualitativa de observación.
- Se concluye que la temperatura no influye en la capacidad fotocatalítica más si los rayos UV (*la activación del fotocatalizador depende de los fotones*), ya que se ha desarrollado la investigación en temperaturas de 22°C en promedio a diferencia de

otras investigaciones de más de 37°C donde también se obtuvieron óptimos resultados.

- La humedad promedio durante los días de medición fue de 42% en la ciudad de Arequipa; esta información fue obtenida de la página weather.com; así mismo, no afectó el resultado de la propiedad autolimpiante de las propiedades de los adoquines.
- Conforme a los resultados de los ensayos hechos se puede concluir que la producción de prefabricados para obras de infraestructura vial tiene una viabilidad ambiental y un impacto favorable para la región Arequipa y del país, si se aplica en las calles de alto tráfico con pavimento articulado de adoquines fotocatalíticos.

RECOMENDACIONES

- Para resultados más precisos es necesario agregar ensayos de laboratorio especializados que permitan analizar cuantitativamente la degradación del colorante Rodamina B, como también poder observar a escala nanométrica sus propiedades específicas.
- Se recomienda continuar con las mediciones de NO₂ en la ciudad de Arequipa como se hizo durante el 2004-2018 ya que la base de datos ayuda a poner en conocimiento a la población sobre la nocividad de la calidad del aire, además de concientizarla e incentivar a más estudiantes a investigar en crear o modificar materiales de construcción que puedan eliminar o mitigar los contaminantes.
- Se recomienda que las probetas de concreto en el proceso de curado sean más de los 7 días, ya que este podría afectar a la resistencia final de los 28 días en su resistencia a la compresión, esto podría ser motivo de más investigaciones para ver el desempeño de la mezcla con curados de más de 7 días o ejecutar otros procesos de curado.
- Revisar el proceso y correcta elaboración del refrentado de azufre para los adoquines de concreto, con el fin de evitar valores dispersos que puedan generar distorsiones en los resultados finales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Morbi, S. C. (2010). *Cement Based Materials for Sustainable Construction Materails and Technologies*. Italia: CTG Italcementi.
- AirVisual. (2018). WORLD AIR QUALITY EPORT. *AirVisual*, 22.
- Almazan, D. (21 de Noviembre de 2013). Asociación Ibérica de la Fotocatálisis. *Agora News*.
- Area Metropolitana del Valle Aburrá. (2019). *Metropol*. Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/Principales-contaminantes.aspx>
- Arrieta Freyre, J., & Pañaherrera Deza, E. (2000). FABRICACION DE BLOQUES DE CONCRETO CON UNA MESA VIBRADORA. *CISMID*, 67. Obtenido de <http://www.cismid.uni.edu.pe/wp-content/uploads/2019/12/E01A.pdf>
- Bermejo Fernandez, M. (2018). *Tesis: "Fotocatálisis y su capacidad descontaminante. Aplicacion en Gran Via"*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Bermejo, M. (2018). *Tesis: Fotocatálisis y su capacidad descontaminante apliacion en Gran Via*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/49612/1/TFG_Bermejo_Fernandez_Marina.pdf
- Bernuy Chavez, G. O., & Flores Cortez, H. H. (2020). *Tesis: Evaluación de las propiedades mecánicas y capacidad autolimpiable del mortero c/a 1:5 de cemento portlad tipo I modificado co dióxido de titanio (TiO₂), en la ciudad de Lima*. Lima: UPC. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/653673/Bernuy_ChG.pdf?sequence=3
- Boonen, E., & Beelndes, A. (2014). *Recent Photocatalytic Applications for Air Purification*. Belgium: Belgian Road Research Center (BRRC).
- Casanova. (2009). *La construcción sostenible. Una mirada estratégica*. Barcelona.
- Cassar, & Carinne. (2003). *White cement for architectural concrete, poessing photocatalytic propetiies*. Durban: Int. Coegr. on the Chemistry of cement.
- Cementos YURA. (2021). *Ficha Tecnica* . Lima-Perú.
- Chen, J., Kou, S., & Poon, C. (2011). Photocatalytic cement-based materials: Comparison of nitrogen oxides an toluene removal potentials and evaluation of selfcleaning performance. *Building and environ*.
- Chorres Panta, K., & Sota Calderon, D. (2018). *"DISEÑO DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ADOQUINES CON AGREGADOS DE CONCHA DE ABANICO"*. Piura: Udep.

- CONAMA. (2012). Congreso Nacional del Medio Ambiente-España. 77. Obtenido de <http://www.conama2012.conama.org/conama10/download/files/conama11/CT%202010/1896706311.pdf>
- Costa, A., Chiarello, I., Sello, E., & Guarino, M. (2011). *Effects of TiO₂ Based Photocatalytic Paint on Concentrations and Emissions of Pollutants and animal performance in a Swine Weaning Unit*. (Vol. 96). Journal of Environmental Management.
- Diario Gestion. (09 de 06 de 2019). Lima es la octava ciudad más contaminada de América Latina. *Diario Gestion*. Recuperado el 5 de 11 de 2020, de <https://gestion.pe/economia/lima-octava-ciudad-contaminada-america-latina-269614-noticia/?ref=gesr>
- Equipos para la construcción S.A. (2016). *Ciclo de trabajo de bloques y adoquines*. RECOMAR.
- Fernandez, J. (17 de marzo de 2016). *Estructura básica de un sistema ERP*. Obtenido de <http://www.erptoday.info/estructura-basica-sistema-erp/>
- Folli, A. (2010). *Tesis doctoral: Fotocatalisis en sistemas de cemento Portland: Fundamentos de los efectos autolimpiantes y mitigacion de la polucion del aire*.
- Garces Giraldo, L., & Mjeia Franco, E. (2013). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Semillero de investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA*, 10. Obtenido de <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/195/1/083-92%20La%20fotocat%20C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>
- Garrida Cabo, C. (2007). *Tesis: Estrategias de optimización de procesos de descontaminación de efluentes acuosos y gaseosos mediante fotocatalisis heterogénea*. España. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=1470>
- Garrido, C. (2020). *ESTRUCTURA ERP*. Obtenido de <https://prezi.com/zsxnfnfc297lw/estructura-de-un-erp/?frame=98a244876fe1c9a3194319645df26b29f3e050f2>
- Gautier Salazar, A. (2011). *PRODUCCIÓN DE H₂ MEDIANTE DESCOMPOSICIÓN FOTOCATALITICA DE AGUA: ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD DE TiO₂ MESOESTRUCTURADO DOPADO CON Pt (tesis grado)*. España: Universidad Rey Juan Carlos. Obtenido de https://burjcdigital.urjc.es/bitstream/handle/10115/11758/10-11_Gautier%20Salazar_Alejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gestion. (02 de 11 de 2020). *Diario Gestion*. Obtenido de <https://gestion.pe/economia/empresas/grana-y-montero-ahora-se-llama-aenza-noticia/?ref=gesr>
- Guangfna, L., Huang, Y., & Chenq, C. (2011). *Development and Application of Eco-Friendly Concrete* (Vols. 250-253).

- Hashimoto, K. (2005). TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospect. *The Japan Society of Applied Physics*, 18. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.44.8269/pdf>
- Hernandez, C. (2019). *Tesis : Evaluacion de la propiedad fotocatalitica de prefabricados para obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio (TiO₂)*. Cundinamarca: Universidad Piloto de Colombia.
- Huerta, C. (2018). *Tesis: EFECTO DEL DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) EN EL COMPORTAMIENTO DEL MORTERO DE CEMENTO PORTLAND TIPO I PARA FACHADAS LIMA METROPOLITANA 2018*. Lima: Universidad Ricardo Palma. Obtenido de https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2015/CIV_T030_72942827_T%20MART%20C3%8DNEZ%20Z.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- INEI. (2019). *Estadísticas Construcción*. Obtenido de <https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/construccion-11154/>
- INEI. (2019). *INEI GOB*. Recuperado el Febrero de 2020, de <https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>
- INEI. (2020). *Estado de la Poblacion Peruana 2020*. Lima.
- informáticos, I. S. (11 de Octubre de 2011). *Centro de Desarrollo de Competencias Digitales de Castilla-La Mancha*. Obtenido de <https://www.bilib.es/actualidad/blog/noticia/articulo/caso-de-exito-implantacion-de-un-sistema-integr-1/>
- Institute, C. A. (2012). La Calidad del Aire en América Latina: Una Vision Panorámica. *Clear Air*, 36.
- Jimenez, E., & Castellote, M. (s.f.). LA FOTOCATÁLISIS EN CONSTRUCCIÓN: FUNDAMENTOS Y MÉTODOS DE MEDIDA.
- Katzman, L. (2006). Building Toward a Cleaner Environment: A New Role for an Existing Product, TiO₂. *Semantic scholar*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Building-Toward-a-Cleaner-Environment%3A-A-New-Role-Katzman/25e56a9593284d2aa30cc5b50d833ec91b05028c#paper-header>
- Kunak. (02 de abril de 2020). *KUNAK Sensing anywhere*. Obtenido de <https://www.kunak.es/blog/contaminacion-aire-obras-demoliciones-derribos/>
- Laplaza Guerra, A. (2017). *Tesis Doctoral: Influencia del color y el acabado superficial en las propiedades de un mortero fotocatalitico como solucion de envolvente*. Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/48788/1/AGUSTIN_LAPLAZA_GUERRA.pdf

- Lippiatt B. C. (1999). Selecting cost-effective green building products: BEES approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 4448-55.
- Lopez, E. R. (2014). *Diseño de Mezclas* (2da ed.). Lima, Peru: ICG.
- Manuel Vásquez Espinoza, T. d. (2016). *Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiable del concreto $f'c=210$ Kg/cm²*. Cajamarca: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA.
- Medina Salazar, E. (2019). *Optimización de las propiedades físico-mecánicas del mortero autolimpiante de C:A: con dióxido de titanio (Tesis de Master)*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Meng, C., Dong, P., Hao, T., & Ting, C. (2020). *Photocatalytic concrete paving block reinforced*. School of Materials Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, People's Republic of China, Republic of China.
- Mentado Almeida, B. (2010). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO "IN VIVO" DE UNA PLACA PARA ENSAYOS DINAMICOS (tesis doctoral)*. (ULPGC, Ed.) Gran Canaria. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Desktop/0622326_00000_0000.pdf
- Mills, A., & Hill, C. (01 de 06 de 2012). Overview of the current ISO tests for photocatalytic materials. 237, 7-23. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010603012001748>
- Ministerio del medio Ambiente. (2016). Guía de Calidad del Aire y Educación Ambiental. *Division e Educación Ambiental y Participación Ciudadana*. Obtenido de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>
- MINSA. (2018). *Principales causas de Defunciones en Hospitales*. Obtenido de https://www.minsa.gob.pe/reunis/data/defunciones_causas_principales.asp
- Morbi, A., Cangiano, S., & Borgarello, E. (2010). Cement Based Materials for Sustainable Development. *International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.
- MTC. (2018). *MANUAL DE CARRETERAS: DISEÑO GEOMÉTRICO DG –2018*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Narain, U. (2020). Contaminación atmosférica: confinada pero no detenida por la COVID-19. *BANCO MUNDIAL*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2020/07/01/air-pollution-locked-down-by-covid-19-but-not-arrested>
- Ohama, Y., & Van Gemert, D. (2011). *Application of titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials*. Springer.

- OMS. (2 de Mayo de 2018). *Who.int*. Obtenido de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- OMS. (2020). Las 10 principales causas de defunción. *Organismo Mundial de la Salud*.
- Organizacion Mundial de la Salud. (02 de 05 de 2018). *Calidad del Aire y Salud*. Obtenido de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- PACIFICO, U. D. (01 de 01 de 2009). *REPOSITORIO UP*. Obtenido de <https://repositorio.up.edu.pe/bitstream/handle/11354/1066/DelCastilloElsa2009.pdf?sequence=1>
- Paiz Rosales, J. A. (2018). *Tesis: DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTICULAS DE DIOXIDO DE TITANIO Y POLILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALITICAS E HIDROFOBICAS A ESCALA LABORATORIO*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8610/1/Jennyfer%20Amalia%20Paiz%20Rosales.pdf>
- Peñañiel Carpio, F. J., & Navarrete Angulo, S. M. (2019). *Tesis: Estudio de las características del fotocatalizador dióxido de titanio en hormigones, según la norma UNI 11259*. Quito: Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/20195/1/T-UCE-0011-ICF-198.pdf>
- Peruano, E. (7 de Junio de 2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental. pág. 4.
- Pesquel Carvajal, E. (1998). *Tópicos de Tecnología del Concreto*. Lima-Perú: Colegio de Ingenieros del Peru.
- Pichat. (2012). Solar energy conversion and photoenergy systems. Vol I- Solar Irradiation and TiO Render Materials Self-Cleaning. Obtenido de <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C08/E6-106-14.pdf>
- Polanco, M. D. (26 de 04 de 2021). *El Peruano*. Obtenido de <https://elperuano.pe/noticia/119555-peru-puede-tener-un-boom-en-la-construccion>
- Rejinders. (2009). *The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles form nanocomposites. Polymer Degradation and Stability*.
- Restrepo Ramos, Y., & Aya Rodriguez, J. (2018). *Tesis: Propuesta para la fabricación de adoquines en mortero mezclados con cascarilla de arroz para uso en la construcción de la ciudad de Girardot en el departamento de Cundinamarca*. Cundinamarca: Corporacion Universitaria Minuto de Dios. Obtenido de

- https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/7195/T.IC_RestrepoRamosTenniferTatiana_.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rivera, G. (2002). *Concreto Simple*. Bogotá.
- Rivva Lopez, E. (2000). *Materiales para el concreto*. Lima-Perú: ACI-Perú.
- Rodriguez Garcia, J. (2012). *Tesis: Morteros fotocatalíticos: análisis de su autolimpieza en función del tipo de cemento y rugosidad superficial*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Rodriguez Perez, I. (2012). *Tesis: PROPUESTAS DE FUNCIONALIDADES AVANZADAS EN UN APLACADO DE FACHADA*. Barcelona, España. Obtenido de https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_206255/PFC_IvanRodriguezPerez.pdf
- Rojas, F., Pacci, S., Sanchez-Ccoyllo, O., & Perales, M. (2019). Pronóstico de Reducción de Emisiones, de Enfermos y de. *conicyt*, 10. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v30n3/0718-0764-infotec-30-03-00117.pdf>
- Rosso, L. T. (2020). Impact of incorporating recycle glass on the photocatalytic capacity of paving concrete blocks. *Universidad Federal de Santa Catarina*.
- Sakai, N., Fujishima, A., Watanabe, T., & Hashimoto, T. (s.f.). *J. Phys. Chem .B*.
- Salazar, D. (2019). *Tesis: Efecto del Bi2O3 en las heterouniones Bi2O3/ g-C3N4 y BiO3/TiO2 para produccion de H2*. Cunduacán. Obtenido de <http://ri.ujat.mx/bitstream/20.500.12107/3115/1/Tesis%20David%20Salazar%20.pdf>
- Seminario, R., & Ruesta, G. (2018). *Tesis: DISEÑO DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE ADOQUINES CON AGREGADOS DE CONCHA DE ABANICO*. Piura: Udep. Obtenido de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3836/PYT_Informe_Final_Proyecto_AD OQUINES.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- SENA. (1990). *MANUAL PARA LA FABRICACION DE BLOQUES Y ADOQUINES*. Servicio Nacional de Aprendizaje. Obtenido de https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5008/manual_fabricacion_bloques_adoquines.PDF?jsessionid=098AC69BA5E630C0D09FA07A186A3CD1?sequence=1
- Shen, S., & Burtron, M. (2012). Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. *Construction and building Materials*, 874-883.
- Siñeriz Martinez, M. (2015). *Tesis: Aplicaciones arquitectonicas de los nanomateriales en base de titanio envolventes fotocatalitcas*. Madrid: Escuela Politecnica de Madrid. Obtenido de <https://aula3tfg.files.wordpress.com/2016/02/sic3b1eriz-martc3adnez-marc3ada-tfg.pdf>
- Snare, M., Treloar, K., Ghiggino, & Thislethwaite, P. (2012). "The photocatalytics of rhodamine B".

- Sugr  nez, R. (2016). *Tesis doctoral: NUEVOS MATERIALES DE COSTRUCCION CON PROPIEDADES AUTO-LIMPIATES Y DESCONTAMINANTES*. Cordova: Universidad de Cordova. Obtenido de <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13373/2016000001229.pdf?sequence=1>
- Tung-Chai, L., & Pong, S. (2015). Photocatalytic NOx degradation of concrete surface layers intermixed and spray-coated with nano-TiO2: Influence of experimental factors. *Unversidad Politecnica de Hong Kong*.
- Tx Active. (2012). The Photocatalysis Active Principle.
- UNI 11259. (2008). Determination Of The Photocatalytic Activity Of Hydraulic Binders Radamina Test Method. *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*.
- Urquiza Morante, J., & Gutierrez Diaz, Y. (2017). *Influencia del nivel socio economico y el grado de conocimiento M.A sobre las practicas ambientales de los estudiantes universitarios de la ciudad de Arequipa*. Arequipa: UNSA. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3650/Sourmowj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Valderrama, L. (2008). *CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE TITANIO CONTENIDOS EN LAS ARENAS DE LAS PLAYAS DE LA REGION ATACAMA-CHILE*. Universidad de Atacama. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481549229007.pdf>
- Vásquez. (2016). *Tesis: Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiable del concreto f'c=210kg/cm2*. Perú.
- Vasquez Espinoza, M. (2016). *Tesis: Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiante de concreto f'c=210kg/cm2*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Vigil , E., & Saadoun, L. (1999). *Journal of materials science letters*.
- Werle, A., de Souza, M., & Loh, K. (2015). The performance of a self-cleaning cool cementitious surface. *Universidad de Sao Paulo*.
- Wiesner, & Lowry. (2009). Decreasing uncertainties in assessing enviromental exposure, risk, and ecological implications of environ. *Sci. Technol*.
- Yu, J. C.-M. (2004). Deactivation and Regeneration of Environmentally Exposed Titanium Dioxide (TiO2) Based Products. *The Chinese University of Hong Kong*. Obtenido de https://www.epd.gov.hk/epd/sites/default/files/epd/english/environmentinhk/air/study/rpts/files/report-updatedcb_paving_blocks_2003.pdf

APÉNDICE A

A. Dosificación

Para el diseño de mezclas se hizo el método empírico de prueba y error para conseguir la mezcla, durante el diseño de mezcla para los adoquines se consideró los siguientes parámetros encontrar la:

La trabajabilidad requerida.

La consistencia requerida.

La resistencia requerida.

Las proporciones específicas de cualquier mezcla utilizada para adoquines de concreto dependerán de los materiales disponibles localmente, de los requisitos del equipo de fabricación y de la textura y calidad final deseadas de la unidad de pavimentación. Se utiliza una baja relación agua-cemento (usualmente entre 0,27 y 0,40) para producir un concreto de alto rendimiento y durabilidad (Chorres Panta & Sota Calderon, 2018)

Según el programa CISMID desarrollado en la Universidad Nacional de Ingeniería, menciona que la dosificación recomendada para adoquines de concreto con mesa vibratoria es 1:3: 1 (cemento: arena: confitillo), según esa recomendación y la propia experiencia de la empresa que produce adoquines de concreto prefabricado, se llegó a la siguiente dosificación mediante el método empírico de prueba y error. (Arrieta Freyre & Pañaherrera Deza, 2000), así como también en la tesis de Jennifer Restrepo y José Aya en Colombia presentaron la investigación denominada como “Propuesta para la fabricación de adoquines en mortero mezclados con cascarilla de arroz para uso en la construcción de la ciudad de Girardot en el departamento de Cundinamarca”, donde usaron para la elaboración de adoquines de concreto la dosificación 1:3 la cual indica que para 1m³ de mortero se necesitará 454 kg de cemento, 1.09m³ de arena y 240l de agua. (Restrepo Ramos & Aya Rodriguez, 2018)

Además, el % de TiO₂ que reemplace al peso de cemento y al peso de la mezcla es tomado de acuerdo a las investigaciones realizadas en Brasil. (Werle, de Souza, & Loh, 2015)

Tabla 17. *Dosificación de los adoquines fotocatalíticos tipo II*

		C	AF	AG	A	Aditivos	
	Und	Cemento	Arena Gruesa	Confitillo	Agua	TiO ₂	EUCOLITH (0.2% Wc)
0%	Kg	12.75	37.83	1.35	5.13	0.00	0.03
3%	Kg	12.37	37.83	1.35	5.13	0.38	0.03
7%	Kg	11.86	37.83	1.35	5.13	0.89	0.03
12%	Kg	11.22	37.83	1.35	5.13	1.53	0.03

Fuente: Elaboración propia

Se hizo un cálculo a grandes rasgos sobre el análisis económico de los adoquines, en base a la dosificación anterior el precio de agregado fino, agregado grueso, agua y el aditivo EUCOLITH son constantes así que se tomó como una variable X entonces se calculó el peso de cemento por kilo como también el peso por kilo del dióxido de titanio en fase anatase como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 18. *Análisis económico de costo de fabricación por unidad de adoquín fotocatalítico*

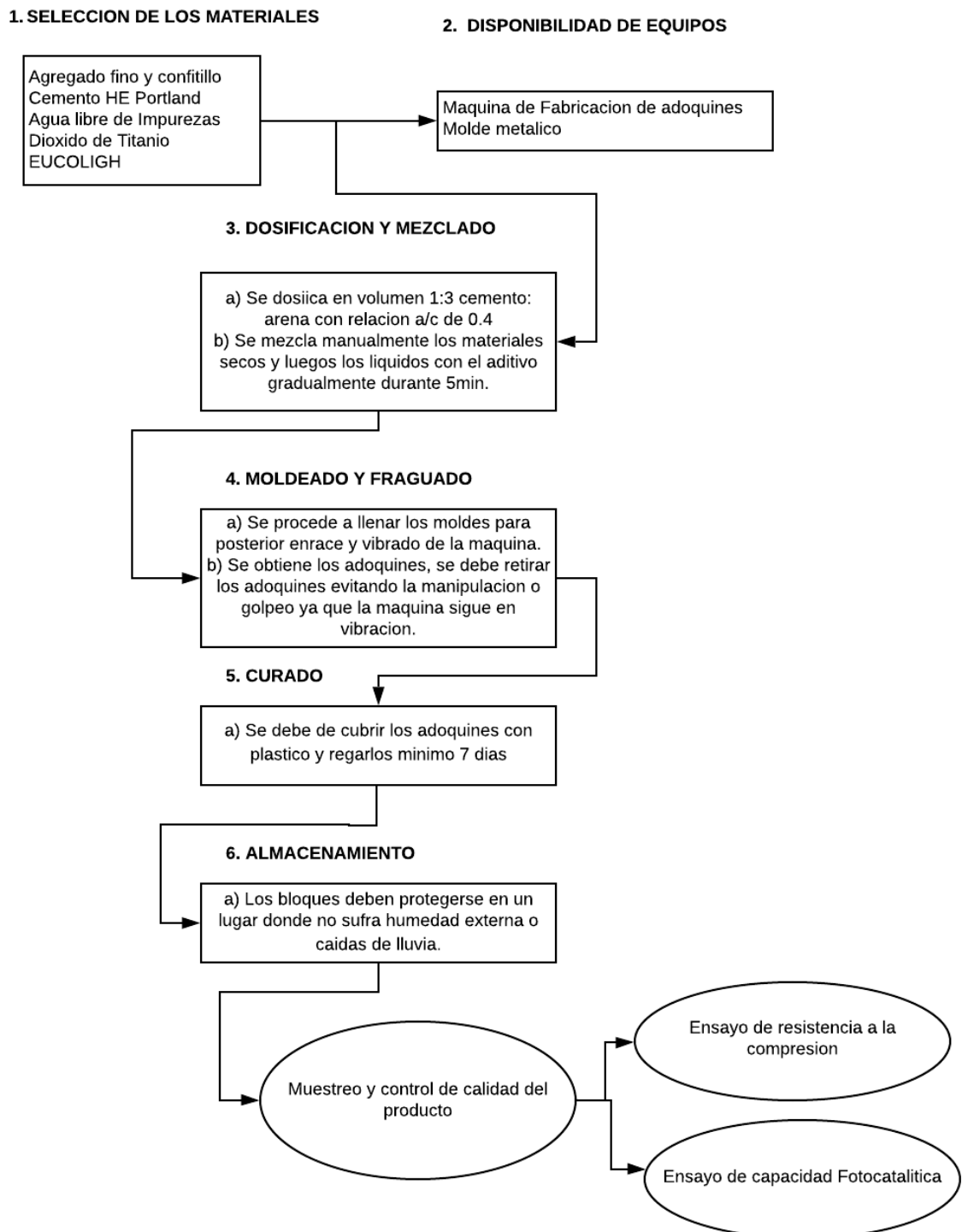
Material	Und	Cantidad	P. U	precio/kilo	%	Kg	Precio	Precio Und/14		
TiO ₂	kg	25	431.60	17.264	0%	0.00	S/ -	S/ -		
					3%	0.38	S/ 6.6	S/ 0.47		
					7%	0.89	S/ 15.4	S/ 1.10		
					12%	1.53	S/ 26.4	S/ 1.89		
Cemento HE	kg	42.5	18	0.4235	0%	12.75	S/ 5.4	S/ 0.39		
					3%	12.37	S/ 5.2	S/ 0.37		
					7%	11.86	S/ 5.0	S/ 0.36		
					12%	11.22	S/ 4.8	S/ 0.34		
						TiO ₂	Cemento	Total	Diferencia	
Total						0%	S/ -	S/ 0.39	S/ 0.39	
						3%	S/ 0.47	S/ 0.37	S/ 0.85	S/ 0.46
						7%	S/ 1.10	S/ 0.36	S/ 1.46	S/ 1.07
						12%	S/ 1.89	S/ 0.34	S/ 2.23	S/ 1.84

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla anterior se puede concluir que estos precios, aunque parecen altos son hallados a precios por compra de unidad de los materiales, en el caso de comprar de manera industrial es probable que se reduzcan el costo a un 80% debido a que la importación de dióxido de titanio en fase anatase es traída desde China donde los precios son bastante accesibles.

B. Flujograma de Producción

Figura 22. Flujograma de producción de los adoquines. Fuente: Elaboración propia



C. Panel Fotográfico

Foto 1. Máquina de compresión universal marca: ELE



Foto 2. Colocación del refrentado previo a la rotura de los adoquines



Foto 3. Agua Destilada



Foto 4. Colorante Rodamina B



Foto 5. Vaso medidor de pírex

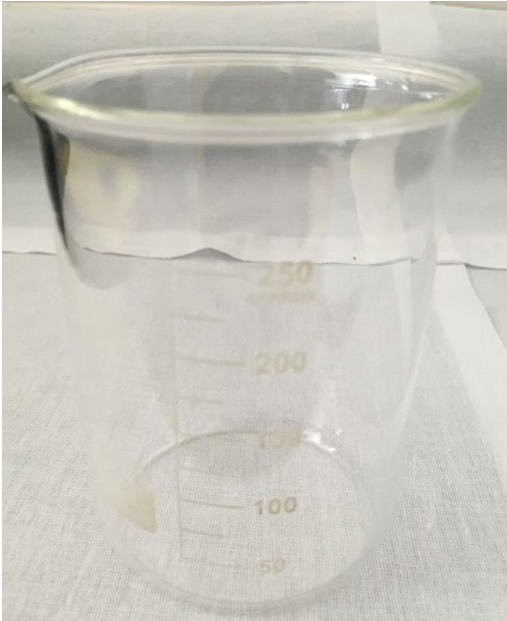


Foto 6. Dióxido de titanio fase anatase

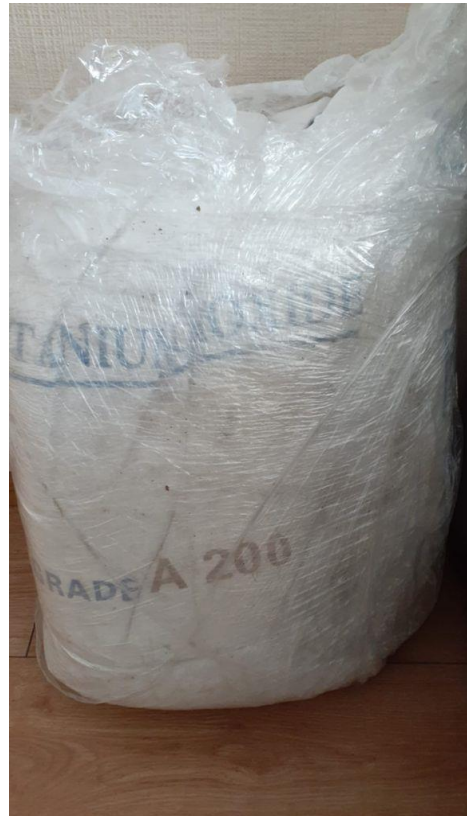


Foto 7. Proceso de producción de los adoquines



Foto 8. Llenado de moldes de adoquín



Foto 9. Transporte de adoquines a la zona de curado



Foto 10. Colocación y eliminación de adoquines ensayados en la maquina a compresión.



Foto 11. Transporte de las muestras para el refrentado de Azufre



Foto 12. Colocación de los adoquines en la Av. Independencia para la prueba de Rodamina B



D. Tabla de datos de los adoquines para las edades de 3, 7 y 28 días.

13 de Julio (3 días)																			
TiO2	Fecha vac	W(gr)	L1	L2	Promedio L	A1	A2	Promedio A	AREA		H1	H2	Promedio H	Carga Kgf		Resistencia Kg/cm2		Resistencia Mpa	
0%	sábado, 10 de Julio de 2021	2,322.0	20.02	20.04	20.03	10.11	10.13	10.12	202.70	201.43	5.84	5.86	5.85	77,008	85,773	379.90	425.95	37.26	41.77
		2,422.0	19.98	19.97	19.98	10.07	10.05	10.06	200.95		5.78	5.81	5.80	95,275		474.13		46.50	
		2,390.0	20.01	19.98	20.00	10.05	10.02	10.04	200.65		5.87	5.86	5.87	85,037		423.81		41.56	
3%		2,380.0	20.05	20.02	20.04	10.09	10.08	10.09	202.05	202.05	5.79	5.82	5.81	88,373	90,379	437.38	447.29	42.89	43.86
		2,469.0	20.08	20.07	20.08	10.04	10.06	10.05	201.75		5.85	5.87	5.86	87,750		434.94		42.65	
		2,540.5	20.05	20.02	20.04	10.09	10.11	10.10	202.35		5.84	5.87	5.86	95,014		469.54		46.05	
7%		2,450.0	20.02	20.01	20.02	10.11	10.13	10.12	202.55	202.97	5.84	5.83	5.84	78,551	74,749	387.81	368.37	38.03	36.12
		2,479.0	20.11	20.12	20.12	10.13	10.16	10.15	204.07		5.89	5.9	5.90	67,408		330.32		32.39	
		2,494.5	20.04	20.02	20.03	10.11	10.09	10.10	202.30		5.92	5.89	5.91	78,287		386.98		37.95	
12%	2,451.5	19.99	20	20.00	10.16	10.09	10.13	202.45	203.20	5.78	5.81	5.80	77,553	79,465	383.07	391.07	37.57	38.35	
	2,463.5	20.11	20.13	20.12	10.17	10.14	10.16	204.32		5.79	5.79	5.79	78,353		383.48		37.61		
	2,402.0	19.98	19.97	19.98	10.18	10.13	10.16	202.85		5.78	5.77	5.78	82,490		406.66		39.88		
											20.03			10.10					
17 de Julio (7 días)																			
TiO2	Fecha vac	W(gr)	L1	L2	Promedio L	A1	A2	Promedio A	AREA		H1	H2	Promedio H	Carga Kgf		Resistencia Kg/cm2		Resistencia Mpa	
0%	sábado, 10 de Julio de 2021	2,437.5	20.04	19.97	20.01	10.05	10.09	10.07	201.45	200.77	5.92	5.94	5.93	77,167	75,867	383.06	377.88	37.57	37.06
		2,442.5	19.98	19.97	19.98	10.06	10.01	10.04	200.45		5.91	5.9	5.91	74,711		372.72		36.55	
		2,311.5	19.99	20.01	20.00	10.03	10.01	10.02	200.40		5.77	5.81	5.79	75,723		377.86		37.06	
3%		2,431.5	20.09	20.03	20.06	10.11	10.07	10.09	202.41	201.70	5.83	5.81	5.82	93,156	93,042	460.24	461.28	45.13	45.24
		2,263.5	19.98	19.97	19.98	10.01	10.03	10.02	200.15		5.79	5.81	5.80	91,958		459.45		45.06	
		2,501.0	20.03	20.06	20.05	10.11	10.1	10.11	202.55		5.89	5.9	5.90	94,013		464.14		45.52	
7%		2,441.5	20.01	19.98	20.00	10.04	10.07	10.06	201.05	201.40	5.89	5.91	5.90	78,560	75,996	390.75	377.37	38.32	37.01
		2,281.5	19.97	19.98	19.98	10.04	10.05	10.05	200.65		5.72	5.77	5.75	75,749		377.52		37.02	
		2,377.0	20.11	20.01	20.06	10.11	10.08	10.10	202.51		5.81	5.8	5.81	73,680		363.84		35.68	
12%	2,328.5	20.04	20.01	20.03	10.05	10.11	10.08	201.85	201.62	5.72	5.78	5.75	85,596	85,709	424.05	425.14	41.59	41.69	
	2,379.0	20.18	20.17	20.18	10.05	10.06	10.06	202.86		5.74	5.72	5.73	84,638		417.22		40.92		
	2,298.0	19.98	20.01	20.00	10.01	10.01	10.01	200.15		5.71	5.72	5.72	86,893		434.14		42.57		
											20.02			10.06					
07 de Agosto (28 días)																			
TiO2	Fecha vac	W(gr)	L1	L2	Promedio L	A1	A2	Promedio A	AREA		H1	H2	Promedio H	Carga Kgf		Resistencia Kg/cm2		Resistencia Mpa	
0%	sábado, 10 de Julio de 2021	2,322.0	20.02	20.02	20.02	9.99	9.99	9.99	200.00	200.00	5.72	5.7	5.71	87,228	86,721	436.14	433.57	42.77	42.52
		2,422.0	19.98	19.94	19.96	10.05	10.05	10.05	200.60		5.7	5.72	5.71	90,124		449.28		44.06	
		2,390.0	19.9	19.98	19.94	10	10	10.00	199.40		5.7	5.7	5.70	82,811		415.30		40.73	
3%		2,380.0	20.05	20.07	20.06	10.11	10.1	10.11	202.71	202.97	5.91	5.92	5.92	90,598	90,202	446.94	444.34	43.83	43.57
		2,469.0	20.08	20	20.04	10.23	10.23	10.23	205.01		5.72	5.72	5.72	93,029		453.78		44.50	
		2,540.5	20.05	20.01	20.03	10.05	10.04	10.05	201.20		5.78	5.77	5.78	86,978		432.29		42.39	
7%		2,450.0	20.02	19.86	19.94	9.99	9.98	9.99	199.10	199.62	5.77	5.76	5.77	82,275	85,723	413.23	429.40	40.52	42.11
		2,479.0	20	19.97	19.99	9.98	9.99	9.99	199.55		5.8	5.79	5.80	85,088		426.40		41.82	
		2,494.5	19.96	20.02	19.99	10.02	10.01	10.02	200.20		6.1	6.1	6.10	89,806		448.58		43.99	
12%	2,451.5	19.93	19.92	19.93	10.05	10.09	10.07	200.64	201.06	5.71	5.71	5.71	82,539	83,691	411.37	416.22	40.34	40.82	
	2,463.5	20.03	19.99	20.01	10.16	10.14	10.15	203.10		5.78	5.77	5.78	85,528		421.11		41.30		
	2,402.0	19.93	19.86	19.90	10.02	10.03	10.03	199.45		5.78	5.77	5.78	83,006		416.18		40.81		

ANEXOS I

I.1 Tabla de toma de datos de PM2.5 en Arequipa

Tabla 19. *Histórico de datos de concentracion de PM2.5 en Arequipa*

N°	AÑO	MES	DIA	HORA	CONCENTRACION
					µg/m ³
					Cp
1	2019	02	14	00:00:00	45
2	2019	02	15	09:00:00	45
3	2019	03	15	07:00:00	44
4	2019	03	15	08:00:00	45.2
5	2019	04	17	08:00:00	53.8
6	2019	04	29	19:00:00	49
7	2019	05	30	08:00:00	63.2
8	2019	05	31	20:00:00	58
9	2019	06	19	00:00:00	120
10	2019	06	5	08:00:00	72
11	2019	07	2	22:00:00	74
12	2019	07	17	08:00:00	81
13	2019	08	16	22:00:00	62
14	2019	08	13	08:00:00	57
15	2019	09	3	08:00:00	51
16	2019	09	2	21:00:00	43
17	2019	10	15	00:00:00	56
18	2019	10	26	23:00:00	45
19	2019	11	1	06:00:00	60
20	2019	11	6	09:00:00	59
21	2019	12	25	01:00:00	220
22	2019	12	25	02:00:00	164
23	2019	12	23	12:00:00	64
24	2020	01	1	01:00:00	207
25	2020	01	1	02:00:00	111
26	2020	01	1	08:00:00	98
27	2020	02	18	08:00:00	43
28	2020	02	18	23:00:00	28
29	2020	03	10	08:00:00	42
30	2020	03	13	07:00:00	44
31	2020	04	25	08:00:00	30
32	2020	04	25	07:00:00	28
33	2020	05	1	07:00:00	34
34	2020	05	21	19:00:00	34
35	2020	06	9	20:00:00	81
36	2020	06	9	19:00:00	73
37	2020	07	10	09:00:00	62
38	2020	07	13	20:00:00	53

39	2020	08	1	21:00:00	99
40	2020	08	7	18:00:00	75
41	2020	09	4	07:00:00	52
42	2020	09	9	08:00:00	38
43	2020	10	21	22:00:00	64
44	2020	10	21	19:00:00	53
45	2020	11	15	19:00:00	113
46	2020	11	15	20:00:00	114
47	2020	12	25	01:00:00	41
48	2020	12	25	06:00:00	27
49	2021	01	6	15:00:00	33
50	2021	01	11	08:00:00	27
51	2021	02	210	07:00:00	64
52	2021	02	21	04:00:00	45
53	2021	03	30	19:00:00	81
54	2021	03	30	19:00:00	67
55	2021	04	13	20:00:00	64
56	2021	04	11	18:00:00	61

Fuente: Elaboración Propia

I.2 Concentración de dióxido de nitrógeno 20114

CONCENTRACIÓN DE DE DIOXIDO DE NITROGENO POR METODOLOGIA PASIVA AÑO 2014

ZONA	1ª ETAPA ENERO 2014	2ª ETAPA FEBRERO 2014	3ª ETAPA MARZO 2014	4ª ETAPA ABRIL 2014	5ª ETAPA MAYO 2014	6ª ETAPA JUNIO 2014	7ª ETAPA JULIO 2014	8ª ETAPA AGOSTO 2014	9ª ETAPA SEPTIEMBRE 2014	10ª ETAPA OCTUBRE 2014	11ª ETAPA NOVIEMBRE 2014	12ª ETAPA DICIEMBRE 2014	E.C.A. ANUAL (Referencial)
Ciudad de Dios			13	14	14			17	17			15	100
Centro de Salud													100
Ciudad Municipal Parroquia				30					35				100
Alto Cayma													100
Plaza Las Americas													100
Cerro Colorado			21	23	27			30	28			24	100
Pueblo Joven													100
Independencia			26	22	21			22	22			21	100
Puesto de Salud													100
Edificadores Misti													100
Ovalo San Lázaro													100
Cercado			74	85	93			98	104			83	100
Marriscal Castilla													100
Cerro Colorado			23	31	35			38	37			32	100
Av. Miguel Forga													100
Senati Parque Industrial			28	35	47			48	50			32	100
Puesto de Salud													100
Manuel Prado													100
Centro de Salud													100
Miguel Grau Zona B			24	18	20			18	20			18	100
Puesto de Salud													100
13 de Enero J.L.B. y R.				32					43				100
Characato Inst.													100
Geof. U.N.S.A.			15	13	15			14	15			14	100
Puesto de Salud													100
Hunter				17					23				100
San José de Tiabaya			13	19	28			26	25			17	100
Vía de la Salud S/N			30	27	41			46	41			32	100
Univ. Católica													100
Santa María			26	29	40			44	46			32	100
E.C.A. ANUAL (Referencial)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

I.3 Ficha Técnica del Dióxido de titanio Anatasa A200



VERGARA S.A.

IMPORTADORES DE PRODUCTOS QUIMICOS
ALIMENTICIOS E INDUSTRIALES

Certificate Of Analysis

Get sample's time:	2020-07-02	Analysis NO.:	200702YJ-TDA06
Sample name:	Titanium Dioxide Anatase A200	MFG.:	2020-07-02
Batch No.:	200702	EXP:	2023-07-01

Results of Analysis

Item	Specs	Result
Purity g/100g	≥ 99.00	99.32
Water soluble salt %	≤ 0.25	0.20
Acid soluble salt %	≤ 0.5	0.35
Dry on ignition %	≤ 0.5	0.30
Chrome, Cr mg/kg	< 2	< 2
Plumbum, Pb mg/kg	< 5	< 1
Arsenium, As mg/kg	< 1	< 1
Mercury, Hg mg/kg	< 1	< 1
Cadmium, Cd mg/kg	< 1	< 1
Stibium, Sb mg/kg	< 2	< 1
Tinting strength %	≥ 110	115
45um sieve residue %	≤ 0.05	0.02
Loss by ignition g/100g(after dried)	≤ 0.50	0.30
Bacteria CFU/g max	≤ 100	Not detected
Moulds CFU/g max	≤ 10	Not detected
Yeasts CFU/g max	≤ 10	- Not detected

I.4 Ficha Técnica de la Rodamina B



QINGDAO SANHUAN COLORCHEM CO., LTD
ROOM 2301 BUILDING 4, PENGLINANHUA PLAZA, 12 LIAOYANG
EAST ROAD QINGDAO, CHINA.
Tel: 86-532- 88979188/88978188/88700866/88962866
Fax: 86-532- 88962988/88967877
Email: sales@cncolorchem.com
Web: http://www.cncolorchem.com

INVOICE NO.: SH19QD13431

CERTIFICATE OF ANALYSIS

PRODUCT NAME: RHODAMINE B, 500% PACKING: IN 25KGS DRUM
BATCH NO.: 20190901 QUANTITY: 200KGS
TOTAL PACKAGES: 8 DRUMS TEST DATE: 2019-09-01

TEST ITEMS	SPECIFICATION	TEST RESULTS
APPEARANCE	SHINING GREEN POWDER	SHINING GREEN POWDER
STRENGTH %	500%	500%
SHADE	SIMILAR TO STANDARD	SIMILAR TO STANDARD
MOISTURE % ≤	5%	2%
INSOLUBLE MATTER IN WATER % ≤	0.50%	0.15%
FINESS(80um Residue)	0.45%	0.15%

Handwritten notes: 20190901, 88962866, 88967877

Handwritten signature: A. A. C. G. A.

THIS IS TO CERTIFY THAT WE, THE UNDERSIGNED, HAVE INSPECTED THE QUALITY OF THE ABOVE MENTIONED GOODS AND FOUND THE RESULT OF INSPECTION CONFORMS TO THE STANDARDS.

Approved by: _____

WELCOME TO COLORCHEM GROUP
YOUR RELIABLE SUPPLIER

I.5 Ficha Técnica de cemento HE-Yura

FICHA TÉCNICA 2021/ V.1

YURA

PROPIEDADES

EL CEMENTO INDUSTRIAL YURA TIPO HE - ULTRA RESISTENCIA INICIAL, por su formulación especial, proporciona al concreto las siguientes propiedades:

- Alta resistencia inicial.
- Aumento de impermeabilidad.
- Menor calor de hidratación.
- Mayor plasticidad y trabajabilidad en concretos.

BENEFICIOS AMBIENTALES

- Menor consumo energético.
- Menor emisión de gases de efecto invernadero durante su fabricación.

RECOMENDACIONES DE USO

- Curado adecuado con abundante agua.
- Mantener humectada la superficie para lograr la mayor resistencia y evitar fisuramiento por excesivo secado.
- Tomar precauciones para el adecuado curado en vaciados cuando se presentan bajas temperaturas.
- Asesorarse siempre con un profesional de la construcción/ingeniero civil.

RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

- El contacto con este producto provoca irritación cutánea e irritación ocular grave, evite el contacto directo en piel y mucosas.
- En caso de contacto con los ojos, lavar con abundante agua limpia.
- En caso de contacto con la piel, lavar con agua y jabón.
- Para su manipulación es obligatorio el uso de los siguientes elementos de protección:



Botas Impermeables



Protección Respiratoria



Guantes Impermeables



Protección Ocular

ALMACENAMIENTO

Para mantener el cemento en óptimas condiciones, se recomienda:

- Almacenar en un ambiente seco, bajo techo, separado del suelo y de las paredes.
- Protegerlos contra la humedad o corriente de aire húmedo.
- En caso de almacenamiento prolongado, cubrir el cemento con polietileno.
- No apilar más de 10 bolsas o en 2 pallet de altura.

PRESENTACIONES DISPONIBLES

Bolsas 42.5 Kg	Ideal para proyectos medianos y pequeños, o con accesos complicados y pocas áreas de almacenamiento.
Big Bag 1.0 TM	Para proyectos de constructoras que tienen planta de concreto. Facilita la manipulación de grandes volúmenes.
Big Bag 1.5 TM	Para proyectos mineros y de gran construcción, requiere la utilización de equipos de carga.
Granel	Abastecido en bombonas para descargar en silos contenedores.

NORMAS TÉCNICAS

PAIS	NORMA	DENOMINACIÓN	
NORMA TÉCNICA PERUANA	NTP 334 082	Cemento Portland	TIPO HE
NORMA CHILENA OFICIAL	NCh 148.Of 68	Cemento Portland Puzolánico	GRADO ALTA RESISTENCIA
NORMA AMERICANA	ASTM C1157	Portland Cement	TIPO HE
NORMA BOLIVIANA	NB-011	Cemento Portlanda Con Puzolana	TIPO IP 40
NORMA ECUATORIANA	NTE INEN 2380	Cemento Hidráulico	TIPO HE
NORMA COLOMBIANA	NTC 121 - 321	Cemento Portland	TIPO ART

DURACIÓN

Almacenar y consumir de acuerdo a la fecha de producción utilizando el más antiguo. Se recomienda que el cemento sea utilizado antes de 60 días de la fecha de envasado indicada en la bolsa, luego de esa fecha, verifique la calidad del mismo.

I.6 Ficha Técnica de Aditivo EUCOLITH



EUCOLITH R®

PLASTIFICANTE PARA BLOQUES DE CONCRETO

Descripción:

EUCOLITH R es un plastificante para bloques diseñado para ayudar en la producción de elementos de concreto de asentamiento cero, vibrados en máquinas.

Aplicaciones principales:

- Bloques de concreto.
- Tubos.
- Elementos de concreto prefabricado.

Características / Beneficios:

- Su acción plastificante facilita el desencofrado, ayuda a aumentar la producción y mejora su apariencia.
- Mejora la textura y aclara el color.
- Sus propiedades como dispersante de cemento mejoran la hidratación del cemento.
- Mejora la cohesión y reduce el agrietamiento.
- Aumenta la resistencia a la compresión a edades tardías.
- No mancha.
- Produce una unidad más densa y menos permeable.

Información técnica:

Apariencia : Líquido viscoso.
Color : Crema.
Densidad : 0.99 kg/Lt.

Dosificación:

EUCOLITH R se dosifica a razón de 0.15% a 0.25% del peso del cemento.
Se recomienda realizar ensayos previos en la obra para determinar la dosificación adecuada, lo cual puede ser diferente a las dosificaciones recomendadas. Los resultados varían debido a las diversas condiciones de cada obra y tipo de materiales empleados. Cualquier consulta contacte al Departamento de Construcción Química Suiza Industrial.

203 x 203 x 406 mm – 635 kg arena, 544 kg grava

Mezcla	Promedio	Resistencia Promedio	Cemento	Eucolith R
1	17.5 kg	150 kg/cm ²	147 kg	296 mL
2	17.1 kg	122 kg/cm ²	136 kg	266 mL
3	17.1 kg	112 kg/cm ²	136 kg	-----

Resistencia observada en elementos de:

203 x 203 x 406 mm – 771 kg arena, 1179 kg grava

Mezcla	Promedio Promedio	Resistencia Promedio	Cemento	Eucolith R	Harina de Silice
1	13.95 kg	96 kg/cm ²	136 kg	444 mL	77 kg
2	13.61 kg	84 kg/cm ²	127 kg	444 mL	68 kg
3	13.76 kg	80 kg/cm ²	127 kg	355 mL	68 kg
4	13.76 kg	80 kg/cm ²	136 kg	-----	77 kg

QSI Perú S.A.
Telf.: +51-1 710 4000

contacto@qsi.pe

Hoja Técnica / JM
Versión 01-QSI
Octubre 2019

ESPECIALIDADES

EUCOLITH R®

PLASTIFICANTE PARA BLOQUES DE CONCRETO

Presentación:

- Cilindro 200kg 53.3 galones*
 - Balde 20kg 5.3 galones*
- *galones americanos aproximados.

Direcciones para su uso:

- Se puede agregar EUCOLITH R a cada batchada de concreto y mortero ya sea manualmente o con equipo dosificador automático. EUCOLITH R se debe agregar con el agua de mezcla para disolución y distribución inmediata a través de la batchada.
- Los resultados a obtener varían con los diversos tipos de cementos y la calidad de agregados utilizados.
- Se recomienda realizar ensayos previos en la obra para determinar la dosificación adecuada, de acuerdo al tipo de obra o proyecto a realizar.
- EUCOLITH R se dosifica en planta dependiendo de las necesidades y comportamiento del diseño.
- EUCOLITH R es compatible con otros aditivos, sin embargo cada aditivo deber ser agregado por separado.
- EUCOLITH R no contiene cloruro de calcio u otros ingredientes potencialmente de corrosión.

Precauciones / restricciones:

- Se deben tomar precauciones para mantener EUCOLITH R sobre el punto de congelamiento, sin embargo el congelamiento y descongelamiento no dañará el material si éste se agita completamente. Nunca lo agite con aire o lanza de aire.
- No utilice aire para su agitación.
- Limpie con agua las herramientas y el equipo antes que se endurezca el mortero y/o concreto
- Durante la manipulación usar las medidas de seguridad apropiadas. Usar el equipo de protección personal apropiado.
- Evitar el contacto con la piel, ojos y vías respiratorias. En caso de contacto con la piel, lavar con abundante agua, para mayor información consultar la hoja de seguridad del producto.

Manejo y almacenamiento:

EUCOLITH R debe almacenarse en su envase original herméticamente cerrado y bajo techo.

Vida útil de almacenamiento: 1 año.