

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Efecto de la adición de dióxido de titanio, como agente protector contra la rigidización del asfalto, por efecto de radiación solar en sectores mayores a los 4000 m s.n.m. - Huancayo 2021**

Angel Adriel Garcia Vasquez

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Civil

Huancayo, 2023

# EFFECTO DE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO, COMO AGENTE PROTECTOR CONTRA LA RIGIDIZACIÓN DEL ASFALTO, POR EFECTO DE RADIACIÓN SOLAR EN SECTORES MAYORES A LOS 4000 msnm – HUANCAYO 2021

## INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	4%
2	<a href="https://informatica.upla.edu.pe">informatica.upla.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="https://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="https://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://repositorio.unsa.edu.pe">repositorio.unsa.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%

9	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	1 %
10	<a href="http://www.revistaingenieria.unal.edu.co">www.revistaingenieria.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	1 %
11	<a href="http://www.virtualpro.co">www.virtualpro.co</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://www.scielo.unal.edu.co">www.scielo.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://laboratoriodeasfaltosabc.site">laboratoriodeasfaltosabc.site</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://www.iberdrola.com">www.iberdrola.com</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://digital.csic.es">digital.csic.es</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://motolanka.net">motolanka.net</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://cio.repositorioinstitucional.mx">cio.repositorioinstitucional.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://www.readbag.com">www.readbag.com</a> Fuente de Internet	<1 %

21

[repositorio.upn.edu.pe](http://repositorio.upn.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

---

22

Puspadhwaja Mall, Bijaya Kumar Mohanty, Dhananjay Bhawanishankar Patankar, Rustom Mody, Rashbehari Tunga. "Physiochemical parameters optimization for enhanced nisin production by Lactococcus lactis (MTCC 440)", Brazilian Archives of Biology and Technology, 2010

Publicación

<1 %

---

23

[repositorio.unsaac.edu.pe](http://repositorio.unsaac.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

---

24

[repositorio.uptc.edu.co](http://repositorio.uptc.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

---

25

[repositorio.unsch.edu.pe](http://repositorio.unsch.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

---

26

[theibfr.com](http://theibfr.com)

Fuente de Internet

<1 %

---

27

[zagan.unizar.es](http://zagan.unizar.es)

Fuente de Internet

<1 %

---

28

[es.slideshare.net](http://es.slideshare.net)

Fuente de Internet

<1 %

---

29

[revistas.unal.edu.co](http://revistas.unal.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

---

30	Barrera Andrade José Manuel. "Degradación de colorantes textiles en soluciones acuosas usando catalizadores mesoporosos de TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> dopados con Fe", TESIUNAM, 2016 Publicación	<1 %
31	repository.javeriana.edu.co Fuente de Internet	<1 %
32	repositorio.ucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
34	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
35	www.imt.mx Fuente de Internet	<1 %
36	www.bancomundial.org.mx Fuente de Internet	<1 %
37	www.scielo.org.co Fuente de Internet	<1 %
38	pesquisa.bvsalud.org Fuente de Internet	<1 %
39	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
40	www.comciencia.com Fuente de Internet	<1 %

---

41 [tecnologiaquimica.uo.edu.cu](http://tecnologiaquimica.uo.edu.cu) <1 %  
Fuente de Internet

---

42 Luís Pinho. "Tirania-silica composite materials for self-cleaning applications on monumental stones", Repositório Aberto da Universidade do Porto, 2014. <1 %  
Publicación

---

43 [repositorio.ucss.edu.pe](http://repositorio.ucss.edu.pe) <1 %  
Fuente de Internet

---

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

## ÍNDICE

PORTADA.....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
DEDICATORIA .....	III
ÍNDICE .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	17
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	17
1.2. Formulación del problema .....	19
1.2.1. Problema general .....	19
1.2.2. Problemas específicos.....	19
1.3. Objetivos .....	19
1.3.1. Objetivo general.....	19
1.3.2. Objetivos específicos.....	19
1.4. Justificación e importancia.....	20
1.5. Limitaciones de la presente investigación.....	20
1.6. Hipótesis y variables .....	21
1.6.1. Hipótesis general.....	21
1.6.2. Hipótesis específicas.....	21
1.6.3. Variables .....	21
1.6.4. Operacionalización .....	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	23

2.1. Antecedentes del problema .....	23
2.1.1. Antecedentes nacionales .....	23
2.1.2. Antecedentes internacionales.....	25
2.1.3. Artículos científicos .....	28
2.2. Bases teóricas.....	30
2.2.1. Fotocatálisis heterogénea.....	30
2.2.2. Aplicación del TiO <sub>2</sub> a los pavimentos.....	33
2.2.3. Materiales híbridos .....	34
2.2.4. Irradiación UV .....	36
2.2.5. Variables del material .....	37
2.2.6. Diseño de mezclas asfálticas en caliente .....	39
2.3. Definición de términos básicos .....	41
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....</b>	<b>43</b>
3.1. Método, tipo o alcance de la investigación .....	43
3.2. Materiales y métodos .....	44
3.2.1. Técnica y recolección de datos .....	44
3.3. Población y muestra .....	44
3.4. Procedimiento de análisis de datos.....	45
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>46</b>
4.1. Presentación de resultados .....	46
4.1.1. Material granular.....	48
4.1.2. Ligante asfáltico.....	52
4.1.3. Material propio .....	53
4.2. Viscosidad del asfalto .....	54
4.2.1. Viscosidad al variar el tiempo de exposición a radiación solar – OE 1.....	54
4.2.2. Viscosidad al variar la adición de dióxido de titanio – OE 2 .....	65
4.3. Combinación y diseño de mezcla.....	74



4.3.1. Propiedades de muestras al variar el ligante asfáltico .....	78
4.3.2. Adherencia de muestras modificadas expuestas a radiación solar – OE 3....	85
4.3.3. Propiedades mecánicas de muestras modificadas expuestas a radiación solar – OE 3.....	92
4.4. Análisis de resultados - OG.....	100
4.5. Discusión de resultados .....	102
4.6. Análisis estadístico.....	104
4.6.1. Viscosidad.....	104
4.6.2. Estabilidad .....	115
4.6.3. Flujo.....	123
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES .....	132
RECOMENDACIONES .....	134
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
ANEXOS .....	139
ANEXO 1. Panel fotográfico.....	139
ANEXO 2. Certificados de ensayo.....	164
ANEXO 3. Matriz de consistencia .....	189

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de la variable.....	22
Tabla 2: Valores de la radiación solar (kWh/m <sup>2</sup> /día) en Junín .....	46
Tabla 3: Fuente de origen de agregados.....	48
Tabla 4: Análisis granulométrico – Piedra chancada de ½” .....	49
Tabla 5: Análisis granulométrico – Arena natural .....	50
Tabla 6: Análisis granulométrico – Arena procesada .....	51
Tabla 7: Ficha Técnica del ligante asfáltico PEN 85/100.....	53
Tabla 8: Análisis granulométrico – Material propio.....	53
Tabla 9: Viscosidad (mPa.s) – Ligante asfáltico PEN 85/100.....	55
Tabla 10: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 4 meses .....	56
Tabla 11: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 8 meses .....	58
Tabla 12: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 12 meses .....	60
Tabla 13: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 16 meses .....	62
Tabla 14: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 0.5% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	66
Tabla 15: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 1% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	68
Tabla 16: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 2% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	70
Tabla 17: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 4% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	72
Tabla 18: Porcentajes en mezcla de agregados MAC 02 .....	75
Tabla 19: Porcentajes en mezcla de agregados MAC 02 .....	76
Tabla 20: Pesos obtenidos por porcentaje de ligante asfáltico.....	77
Tabla 21: Coeficiente TSR ante variación de ligante asfáltico (%).....	78
Tabla 22. Resultados de propiedades mecánicas (1).....	80
Tabla 23: Resultados de propiedades mecánicas (2) .....	81
Tabla 24: Resumen de resultados para el OCA .....	85

Tabla 25: Coeficiente TSR (%) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 4 meses.....	85
Tabla 26: Coeficiente TSR (%) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 8 meses.....	87
Tabla 27: Coeficiente TSR (%) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 12 meses.....	89
Tabla 28: Coeficiente TSR (%) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 16 meses.....	90
Tabla 29: Flujo (mm) y Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 4 meses.....	92
Tabla 30: Flujo (mm) y Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 8 meses.....	94
Tabla 31: Flujo (mm) y Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 12 meses.....	96
Tabla 32: Flujo (mm) y Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 16 meses.....	98
Tabla 33: Prueba de normalidad de viscosidad de L.A. 85/100 sin envejecer .....	104
Tabla 34: Correlaciones de viscosidad de L.A. 85/100 sin envejecer .....	105
Tabla 35: Prueba de normalidad de viscosidad de L.A. 85/100 + 0.5% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	106
Tabla 36: Correlaciones de viscosidad de L.A. 85/100 + 0.5% TiO <sub>2</sub> (16 meses).....	107
Tabla 37: Prueba de normalidad de viscosidad de L.A. 85/100 + 1% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	108
Tabla 38: Correlaciones de viscosidad de L.A. 85/100 + 1% TiO <sub>2</sub> (16 meses).....	108
Tabla 39: Prueba de normalidad de viscosidad de L.A. 85/100 + 2% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	109
Tabla 40: Correlaciones de viscosidad de L.A. 85/100 + 2% TiO <sub>2</sub> (16 meses).....	110
Tabla 41: Prueba de normalidad de viscosidad de L.A. 85/100 + 4% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	111
Tabla 42: Correlaciones de viscosidad de L.A. 85/100 + 4% TiO <sub>2</sub> (16 meses).....	112
Tabla 43: Prueba de normalidad de viscosidad de L.A. 85/100 envejecida (16 meses) .....	113
Tabla 44: Correlaciones de viscosidad de L.A. 85/100 envejecida (16 meses).....	114

Tabla 45: Cuadro de descriptivos – Estabilidad (kg) envejecimiento con radiación solar .....	115
Tabla 46: Prueba de normalidad – Estabilidad (kg) envejecimiento con radiación solar .....	120
Tabla 47: Correlaciones - Estabilidad (kg) envejecimiento con radiación solar por 4 meses .....	121
Tabla 48: Correlaciones - Estabilidad (kg) envejecimiento con radiación solar por 8 meses .....	121
Tabla 49: Correlaciones - Estabilidad (kg) envejecimiento con radiación solar por 12 meses .....	122
Tabla 50: Correlaciones - Estabilidad (kg) envejecimiento con radiación solar por 16 meses .....	122
Tabla 51: Cuadro de descriptivos – Flujo (mm) envejecimiento con radiación solar ..	123
Tabla 52: Prueba de normalidad – Flujo (mm) envejecimiento con radiación solar ....	128
Tabla 53: Correlaciones - Flujo (mm) envejecimiento con radiación solar por 4 meses .....	129
Tabla 54: Correlaciones - Flujo (mm) envejecimiento con radiación solar por 8 meses .....	130
Tabla 55: Correlaciones - Flujo (mm) envejecimiento con radiación solar por 12 meses .....	130
Tabla 56: Correlaciones - Flujo (mm) envejecimiento con radiación solar por 16 meses .....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Reporte de radiación solar nacional – Senamhi .....	18
Figura 2: Piel de cocodrilo presente sobre pavimento asfáltico.....	19
Figura 3: Mecanismo de la fotocatalisis .....	31
Figura 4: Métodos de agitación mecánica.....	35
Figura 5: Métodos de deposición química .....	36
Figura 6: Curva granulométrica de piedra chancada de ½” .....	50
Figura 7: Curva granulométrica de arena natural.....	51
Figura 8: Curva granulométrica de arena procesada.....	52
Figura 9: Curva granulométrica del filler .....	54
Figura 10: Viscosidad (mPa.s) – Ligante asfáltico PEN 85/100.....	56
Figura 11: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 4 meses.....	58
Figura 12: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 8 meses.....	60
Figura 13: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 12 meses.....	62
Figura 14: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 envejecida con radiación solar por 16 meses.....	64
Figura 15: Viscosidad (mPa.s) al variar los tiempos de radiación solar vs. Temperatura (°C).....	65
Figura 16: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 0.5% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	67
Figura 17: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 1% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	69
Figura 18: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 2% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	71
Figura 19: Viscosidad (mPa.s) – L.A. PEN 85/100 al adicionar 4% de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	73
Figura 20: Viscosidad (mPa.s) al variar la adición de Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	74
Figura 21: Curva de mezcla de agregados .....	77
Figura 22: Coeficiente TSR ante variación de ligante asfáltico (%).....	80
Figura 23: Vacíos (%) vs. Ligante asfáltico (%).....	82

Figura 24: Estabilidad (kg) vs. Ligante asfáltico (%) .....	82
Figura 25: Flujo (mm) vs. Ligante asfáltico (%) .....	83
Figura 26: Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> ) vs. Ligante asfáltico (%).....	83
Figura 27: Vacíos de agregado mineral (%) vs. Ligante asfáltico (%).....	84
Figura 28: Vacíos llenos de ligante asfáltico (%) vs. Ligante asfáltico (%).....	84
Figura 29: Coeficiente TSR ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 4 meses.....	87
Figura 30: Coeficiente TSR ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 8 meses.....	88
Figura 31: Coeficiente TSR ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 12 meses.....	90
Figura 32: Coeficiente TSR ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 16 meses.....	91
Figura 33: Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 4 meses.....	93
Figura 34: Flujo (mm) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 4 meses.....	93
Figura 35: Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 8 meses.....	95
Figura 36: Flujo (mm) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 8 meses.....	95
Figura 37: Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 12 meses.....	97
Figura 38: Flujo (mm) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 12 meses.....	97
Figura 39: Estabilidad (kg) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 8 meses.....	99
Figura 40: Flujo (mm) ante variación de Dióxido de Titanio (%) – Radiación solar por 8 meses.....	99
Figura 41: Coeficiente TSR (%) por envejecimiento con radiación solar – Resumen general.....	100
Figura 42: Estabilidad (kg) por envejecimiento con radiación solar – Resumen general .....	101
Figura 43: Flujo (mm) por envejecimiento con radiación solar – Resumen general ....	102

Figura 44: Diagrama de dispersión de viscosidad de L.A. 85/100 sin envejecer .....	105
Figura 45: Diagrama de dispersión de viscosidad de L.A. 85/100 + 0.5% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	107
Figura 46: Diagrama de dispersión de viscosidad de L.A. 85/100 + 1% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	109
Figura 47: Diagrama de dispersión de viscosidad de L.A. 85/100 + 2% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	111
Figura 48: Diagrama de dispersión de viscosidad de L.A. 85/100 + 4% TiO <sub>2</sub> (16 meses) .....	113
Figura 49: Diagrama de dispersión de viscosidad de L.A. 85/100 envejecida 16 meses .....	114
Figura 50: Diagrama de dispersión - Estabilidad (kg) .....	123
Figura 51: Diagrama de dispersión - Flujo (mm) .....	131

## RESUMEN

La presente investigación trata de mitigar el daño que produce la radiación solar en la mezcla asfáltica presente en los pavimentos de la red vial local, mostrando de esta manera al dióxido de titanio como agente conservador de las propiedades de mezcla ante daño inducido por radiación solar, por ello se plantea como objetivo principal determinar en qué medida la adición de dióxido de titanio mitiga el efecto de la radiación solar.

Para el desarrollo de la presente investigación, fue necesario el diseño de una mezcla según las especificaciones Marshall, con la cual se obtuvo una mezcla patrón que fue sometida a distintos periodos de exposición a radiación solar simulada por un equipo que emite luz ultravioleta. De esta manera, se evaluó la alteración de las propiedades de mezcla ante la adición al 0.5%, 1.0%, 2.0% y 4.0% de dióxido de titanio sobre el peso del asfalto. Estas propiedades que se llegaron a evaluar fueron de estabilidad y flujo mediante el ensayo de Marshall, la adherencia mediante el coeficiente de TSR y la viscosidad mediante el viscosímetro rotacional.

Finalmente, de los resultados obtenidos, se concluyó que existe un nivel de conservación de propiedades de la mezcla con adición de dióxido de titanio obteniendo que la conservación de estabilidad y adherencia evaluada se alcanza del 2.0% al 2.4% de adición, ya que en porcentajes superiores se presenta un deterioramiento en las propiedades, y en porcentajes inferiores se encuentra una progresión de conservación que llega hasta el 2.0% de dióxido de titanio.

**Palabras clave:** Mezcla asfáltica en caliente, estabilidad, flujo, TSR, radiación solar, dióxido de titanio, propiedades de mezcla



## ABSTRACT

The present investigation tries to mitigate the damage caused by solar radiation in the asphalt mix present in the pavements of the local road network, thus showing titanium dioxide as a preserving agent of the mix properties against damage induced by solar radiation. For this reason, the main objective is to determine to what extent the addition of titanium dioxide mitigates the effect of solar radiation.

For the development of the present investigation, it was necessary to design a mixture according to the Marshall specifications, with which a standard mixture was obtained that was subjected to different periods of exposure to solar radiation simulated by equipment that emits ultraviolet light. In this way, the alteration of the mixing properties was evaluated before the addition of 0.5%, 1.0%, 2.0% and 4.0% of titanium dioxide on the weight of the asphalt. These properties that were evaluated were stability and flow through the Marshall test, adhesion through the TSR coefficient and viscosity through the rotational viscometer.

Finally, from the results obtained, it was concluded that there is a level of conservation of properties of the mixture with the addition of titanium dioxide, obtaining that the conservation of stability and adhesion evaluated is reached from 2.0% to 2.4% of addition, since in higher percentages there is a deterioration in the properties, and in lower percentages there is a progression of conservation that reaches up to 2.0% of titanium dioxide.

**Keywords:** Hot mix asphalt, stability, flow, TSR, solar radiation, titanium dioxide, mixing properties