



Diseño de un pavimento asfáltico drenante basado en un material de protección ambiental de dióxido de titanio (TiO_2), aplicado en el corredor vial de alto tráfico, Sector El Trébol, Cantón Quito.

Amagua Sangoquiza, Julio Alexander

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Morales Muñoz, Byron Omar MSc.

15 de marzo de 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: AMAGUA_REVISION.docx (D98518701)
Submitted: 3/16/2021 1:10:00 PM
Submitted By: jaamagua@espe.edu.ec
Significance: 5 %

Sources included in the report:

Mezclas drenantes Carvajal Chicaiza.pdf (D21060574)
Tesis_Carvajal_Quishpi.pdf (D37379861)
TESIS ARMJIOS.docx (D40565375)
SILVA_SOSA_TESIS.docx (D98432965)
Asfalto.docx (D13838224)
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15050/1/T-ESPE-040414.pdf>
<http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15334/1/Tesis%20Microaglomerado%20en%20Caliente.pdf>

Instances where selected sources appear:

24

BYRON OMAR
MORALES MUÑOZ

Firmado digitalmente por BYRON
OMAR MORALES MUÑOZ
Fecha: 2021.03.16 16:51:02 -05'00'



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño de un pavimento asfáltico drenante basado en un material de protección ambiental de dióxido de titanio (TiO₂), aplicado en el corredor vial de alto tráfico, sector El Trébol, Cantón Quito”** fue realizado por el señor **Amagua Sangoquiza, Julio Alexander** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de marzo de 2021

Firma:

BYRON OMAR
MORALES MUÑOZ

Firmado digitalmente por BYRON
OMAR MORALES MUÑOZ
Fecha: 2021.03.15 10:39:03 -05'00'

Ing. Byron Omar Morales Muñoz, MSc.

C. C.: 1712565900



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Amagua Sangoquiza, Julio Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1721138301, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño de un pavimento asfáltico drenante basado en un material de protección ambiental de dióxido de titanio (TiO₂), aplicado en el corredor vial de alto tráfico, sector El Trébol, Cantón Quito** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de marzo 2021

Firma

Amagua Sangoquiza, Julio Alexander

C.C.: 1721138301



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Amagua Sangoquiza, Julio Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1721138301, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño de un pavimento asfáltico drenante basado en un material de protección ambiental de dióxido de titanio (TiO₂), aplicado en el corredor vial de alto tráfico, sector El Trébol, Cantón Quito** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 10 de marzo 2021

Firma

Amagua Sangoquiza, Julio Alexander

C.C.: 1721138301

Dedicatoria

A lo largo de la vida nos imponemos metas que, con dedicación, perseverancia y firmeza las cumplimos, por tal razón el presente trabajo va dedicado principalmente a "Dios", por darme vida, sabiduría, fortaleza y ser mi guía para seguir progresando en mi vida personal y profesional, pues sin él nada hubiera sido posible, además de darme la mejor Familia del mundo.

A mis padres Sr. Julio Cesar Amagua Sangoquiza y Sra. Ana Elizabeth Sangoquiza Troya, por ser el pilar fundamental en mi vida sin escatimar esfuerzos me han apoyado, siendo ejemplo de fortaleza y perseverancia ante las adversidades de la vida, quienes me han demostrado su amor y comprensión en todas las etapas de mi existencia, celebrando mis éxitos y ayudándome en los momentos más difíciles para que hoy hiciera realidad uno de mis sueños.

A mi hermano Jefferson Vinicio, aunque muchas veces pareciera que estuviéramos peleando, hay momentos donde el fuego desaparece y nos unimos. Gracias por el apoyo brindado a lo largo de todo este proceso que fue la elaboración de mi tesis.

A mis hijos Elián Zaíd, Gael Ezequiel y a mi compañera de vida Jhoana Gabriela por su amor, apoyo incondicional y por ser la fuerza e inspiración de cada día, para que sea el principio de muchos más logros en beneficio de nuestro hogar, para que se sientan orgullosos y poder contribuir a tener una vida digna que todo hogar se merece.

Es así que este trabajo queda plasmado para guiar a futuras generaciones.

Julio Alexander Amagua Sangoquiza

Agradecimiento

A Dios que con su sabiduría ha sabido poner en mi camino a las personas correctas a quienes amo y son parte fundamental en mi vida, para culminar con éxito mi carrera universitaria.

A mis padres Julio y Elizabeth, a mi hermano Jefferson, por ser mis compañeros de vida, por siempre brindarme su apoyo incondicional, tanto sentimental como económico. Fueron mi voz de aliento que me daban fuerza para seguir a pesar de los obstáculos, la guía para corregirme en mi andar.

A mis abuelitos Gregorio, María Luisa, Luis (†) y Carmen Victoria, quienes siempre me apoyaron, consintieron y animaron en este caminar de mi vida, por su sabiduría y consejos que han contribuido a mi formación personal y profesional.

A los amores de mi vida, mis hijos Elián y Gael, que se convirtieron en mi motor, en ese ser que me impulsa a seguir adelante, que no me permite darme por vencido ni hundirme en mis problemas, que me enseñan cada día a valorar las pequeñas cosas de la vida con su inocencia, su amor puro y sus caricias tan tiernas. Como no agradecer a mi esposa Jhoana, por brindarme su tiempo, apoyo y fortaleza que permite que nuestro hogar siga creciendo con amor y ayuda mutua para cumplir nuestros logros.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, que me abrió las puertas y me permitió conocer a esas personas que han sido más que docentes unos verdaderos amigos que me han ayudado a forjar mi camino de preparación y hacer de mi hoy una gran profesional.

En especial al Ing. Byron Morales, por guiarme en todo el proceso de investigación, por haber contribuido con sus consejos y su invaluable experiencia, por su paciencia en este largo camino que llevo la elaboración de este trabajo, un Dios le pague.

Julio Alexander Amagua Sangoquiza

Índice de contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos	8
Índice de tablas	16
Índice de figuras.....	19
Resumen	21
Abstrac	22
Capítulo I: Generalidades	23
Introducción.....	23
Planteamiento del problema.....	24
Macro	24
Meso.....	25
Micro.....	26
Justificación.....	27
Objetivos	28
Objetivo general.....	28
Objetivos específicos.....	28
Marco teórico.	29
Definición de pavimento	29
Clasificación del pavimento	29
Pavimento flexible	30
Pavimento Rígido.....	31
Pavimentos mixtos	32
Conformación del pavimento flexible	33

Subrasante	33
Subbase	34
Base	34
Capa de rodadura o carpeta asfáltica	35
Mezclas asfálticas.....	36
Definición.....	36
Clasificación de mezclas asfálticas	36
Capítulo II: Agregados, material bituminoso, mezclas asfálticas drenantes y pavimentos fotocatalíticos	38
Agregados pétreos.....	38
Clasificación de agregados pétreos	38
Por su origen.....	39
Por su tamaño.....	39
Por su naturaleza	40
Por su adhesividad.....	41
Obtención de los agregados pétreos	41
Material bituminoso.....	43
Asfalto	43
Caracterización del asfalto	43
Por su grado de viscosidad.....	43
Por su grado de penetración	44
Por su grado de desempeño	45
Propiedades de los asfaltos	45
Propiedades químicas del asfalto.....	46
Propiedades físicas del asfalto.....	46
Clasificación de los materiales asfálticos.....	47

	10
Asfaltos modificados.....	48
Beneficios de la modificación del Asfalto	48
Aplicaciones de los asfaltos modificados	49
Obtención del material asfáltico	49
Mezcla Asfáltica drenante.....	50
Especificaciones técnicas de los materiales y la mezcla asfáltica	50
Agregados.....	50
Asfalto.....	50
Definición de mezclas asfálticas drenantes	51
Características de la mezcla asfáltica drenante	51
Diseño de la mezcla asfáltica drenante.....	53
Proceso general para el diseño de mezclas asfálticas en caliente	53
Descripción de los métodos de diseño.....	55
Sistemas urbanos de desarrollo sostenible (SUDS).....	57
Desarrollo sostenible	57
Construcción sostenible.....	58
Técnicas de drenaje sostenible	59
Best Management Practice (BMPs):	60
Environmental Alliance ¹² (UK) (2001):	61
CIRIA C697 (2001):.....	61
Pavimentos asfálticos drenantes.....	63
Tipos de pavimentos asfálticos drenantes	63
Pavimento tipo A – Infiltración total	63
Pavimento tipo B – Infiltración parcial	64
Pavimento tipo C – Sin infiltración	65
Métodos de diseño del pavimento asfáltico	66

	11
Método AASHTO 93	66
Método THE SUDS MANUAL.....	75
Pavimentos fotocatalíticos	80
Contaminación de naturaleza química	80
Óxidos de nitrógeno.....	80
Proceso de Oxidación avanzada (POA).....	81
Fotocatálisis Heterogénea	82
Dióxido de titanio – TiO ₂	82
Fotocatálisis del dióxido de titanio.....	83
Aplicación en materiales de construcción	84
Capas de rodadura, a partir del empleo de mezclas bituminosas drenantes como soporte y percolación de lechadas especiales:	84
Empleo de sprays (pulverizados) sobre superficies de rodadura existentes:	85
Efectos del TiO ₂ en los pavimentos.....	85
Efecto Autolimpiable	85
Efecto de descontaminación.....	86
Capítulo III: Caracterización de los agregados, material bituminoso y dióxido de titanio	87
Descripción General	87
Ensayos para los agregados pétreos.....	87
Análisis granulométrico de áridos finos y gruesos (INEN 696) / (ASTM C136)	88
Equipos y materiales.....	88
Procedimiento	88
Resultado	90
Equivalente de arena (INV E-133) / (ASTM D2419, 2014).....	91
Equipos y materiales.....	91
Procedimiento	92

	12
Ecuación y Resultados	92
Desgaste en la máquina de los Ángeles, abrasión (INEN-860) (ASTM-C131).....	93
Equipos y materiales.....	93
Procedimiento	94
Ecuación y Resultados	95
Gravedad específica y absorción para agregados finos (INEN 856)	96
Equipos y Materiales.....	96
Procedimiento	97
Ecuación y Resultados	98
Gravedad específica y absorción para agregados gruesos (INEN 857)	99
Equipos y Materiales.....	100
Procedimiento	100
Ecuaciones y Resultados.....	101
Ensayos en el asfalto.....	102
Penetración (INEN-917) / (ASTM D5)	103
Equipos y Materiales.....	103
Procedimiento	104
Resultados	105
Punto de reblandecimiento (INEN 920) / (ASTM D36)	105
Equipos y Materiales.....	105
Procedimiento	106
Resultados	107
Índice de penetración (INV E-724)	107
Ecuaciones y resultados	107
Ductilidad (INEN 916) / (ASTM D113).....	108
Equipos y Materiales.....	108

	13
Procedimiento	109
Resultados	109
Punto de inflamación copa abierta de Cleveland (INEN 808) / (ASTM D92)	110
Equipo y Materiales.....	110
Procedimiento	110
Resultados	111
Gravedad específica de asfalto (ASTM D70).....	111
Equipo y Materiales.....	111
Procedimiento	112
Ecuaciones y resultados	112
Caracterización del dióxido de titanio y su componente anhídrido	113
Capítulo IV: Elaboración y ensayos de las briquetas, muestras rectangulares del pavimento flexible drenante fotocatalizador.....	116
Elaboración de briquetas	116
Equipos y materiales	116
Procedimiento	117
Preparación de la mezcla	117
Compactación de la muestra	118
Ensayo de las briquetas de asfalto	118
Análisis de vacíos	118
Gravedad específica máxima teórica – RICE (ASTM D2041)	119
Gravedad específica de Bulk (ASTM D2726).....	121
Cálculo de porcentaje de vacíos.....	123
Prueba de permeabilidad.....	124
Ensayo del cántabro seco (NLT – 352).....	125
Equipos y materiales.....	125

	14
Procedimiento	125
Ecuaciones y resultados	126
Ensayo del cántabro húmedo (NLT - 362)	126
Equipos y materiales	127
Procedimiento	127
Ecuaciones y resultados	127
Ensayo Marshall (ASTM D1559)	128
Equipos y materiales	128
Procedimiento	128
Resultados	129
Elaboración de muestras rectangulares (mezcla asfáltica)	129
Ensayo de las muestras rectangulares (mezcla asfáltica)	130
Colocación de la emulsión de base acuosa de TiO_2 sobre las muestras Rectangulares	130
Cálculos	130
Procedimiento	131
Prueba de descontaminación	133
Prueba de autolimpieza	135
Capítulo V: Resultados y discusión	137
Resultados de los ensayos	137
Agregados pétreos	137
Asfalto	138
Formula de trabajo	138
Contenido optimo del asfalto	140
Ensayo de análisis de vacíos	140
Ensayos del cántabro seco y húmedo	140

Ensayo Marshall	141
Resultado de los ensayos de las muestras rectangulares (mezcla asfáltica).....	141
Prueba de descontaminación	141
Prueba de autolimpieza	143
Capítulo VI: Diseño del pavimento asfáltico drenante fotocatalizador	145
Descripción del área de estudio	145
Diseño del pavimento flexibles preliminar por el método AASHTO 93	146
Ejes Equivalentes	146
Confiabilidad	150
Serviciabilidad.....	150
Desviación estándar del sistema.....	151
Modulo resiliente y coeficiente estructural de capas	151
Diseño estructural del pavimento asfáltico.....	151
Sistema de drenaje.....	153
Tasa de infiltración para la carpeta de rodadura porosa y profundidad máxima de almacenamiento	153
Salida de la estructura del pavimento	155
Conclusiones y recomendaciones.....	157
Conclusiones.....	157
Recomendaciones	158
Referencia bibliográfica	160
Anexos	168

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Grupo de agregados empleados en las carreteras</i>	40
Tabla 2 <i>Clasificación del asfalto por su viscosidad a 60 °C</i>	43
Tabla 3 <i>Clasificación del asfalto por su grado de penetración</i>	44
Tabla 4 <i>Clasificación del asfalto por su grado de desempeño</i>	45
Tabla 5 <i>Especificaciones para los agregados pétreos</i>	50
Tabla 6 <i>Especificaciones para el asfalto</i>	51
Tabla 7 <i>Clasificación propuesta de las técnicas de drenaje sostenible</i>	62
Tabla 8 <i>Factor de distribución por dirección (F_D)</i>	68
Tabla 9 <i>Factor de distribución por carril (F_C)</i>	68
Tabla 10 <i>Niveles de confiabilidad (R)</i>	69
Tabla 11 <i>Valores de Z_R para diferentes grados de confiabilidad</i>	69
Tabla 12 <i>Índice de serviciabilidad final (P_t)</i>	70
Tabla 13 <i>Desviación estándar (S_o)</i>	71
Tabla 14 <i>Niveles de drenaje</i>	75
Tabla 15 <i>Coeficiente de drenaje para la base y la subbase</i>	75
Tabla 16 <i>Coeficiente de drenaje para la base y la subbase</i>	76
Tabla 17 <i>Valores relativos de permeabilidad</i>	78
Tabla 18 <i>Valores de reseña para el coeficiente de escorrentía (c) en diversos tipos de superficies</i>	79
Tabla 19 <i>Clasificación de los distintos Procesos de Oxidación Avanzada</i>	81
Tabla 20 <i>Propiedades físicas del Dióxido de Titanio (TiO_2)</i>	82
Tabla 21 <i>Cantidad de muestra para ensayo granulométrico</i>	89
Tabla 22 <i>Granulometría de agregado de 3/4", 3/8" y arena</i>	90
Tabla 23 <i>Cálculo de equivalente de arena</i>	93
Tabla 24 <i>Gradación de las muestras de ensayo</i>	94

Tabla 25 <i>Número de esferas de acuerdo a su degradación</i>	95
Tabla 26 <i>Cálculo del desgaste de agregado grueso</i>	96
Tabla 27 <i>Gravedad específica del agregado fino</i>	99
Tabla 28 <i>Cantidad de muestra necesaria</i>	100
Tabla 29 <i>Gravedad específica del agregado grueso</i>	102
Tabla 30 <i>Resultados del ensayo de penetración en el asfalto</i>	105
Tabla 31 <i>Toma de temperatura a las muestras de asfalto</i>	107
Tabla 32 <i>Resultado del índice de penetración</i>	108
Tabla 33 <i>Determinación del ensayo de ductilidad</i>	109
Tabla 34 <i>Determinación del punto de inflamación</i>	111
Tabla 35 <i>Cálculo de la gravedad específica del asfalto</i>	113
Tabla 36 <i>Ficha técnica del dióxido de titanio</i>	114
Tabla 37 <i>Propiedades físicas del dióxido de titanio</i>	114
Tabla 38 <i>Ficha técnica de la Resina de Poliuretano</i>	115
Tabla 39 <i>Cálculo de la gravedad específica máxima teórica para 4% de asfalto</i>	120
Tabla 40 <i>Cálculo de la gravedad específica Bulk para 4% de asfalto (MUESTRA #1)</i>	122
Tabla 41 <i>Cálculo de la gravedad específica Bulk para 4% de asfalto (MUESTRA #2)</i>	122
Tabla 42 <i>Cálculo de la gravedad específica Bulk para 4% de asfalto (MUESTRA #3)</i>	123
Tabla 43 <i>Cálculo de porcentaje de vacíos para briquetas</i>	124
Tabla 44 <i>Datos conseguidos de la prueba de permeabilidad</i>	125
Tabla 45 <i>Perdida por desgaste de las mezclas asfálticas (Ensayo cántabro seco)</i>	126
Tabla 46 <i>Perdida por desgaste de las mezclas asfálticas (Ensayo cántabro húmedo)</i>	127
Tabla 47 <i>Resultados del ensayo Marshall</i>	129
Tabla 48 <i>Diseño de la emulsión acuosa</i>	131
Tabla 49 <i>Cantidad de TiO₂ para cada emulsión</i>	131
Tabla 50 <i>Resultados de cada ensayo de los agregados pétreos</i>	137

Tabla 51 <i>Resultados de cada ensayo del asfalto</i>	138
Tabla 52 <i>Cantidad de agregados para elaboración de la mezcla asfáltica porosa</i>	139
Tabla 53 <i>Estabilización granulométrica con agregados pétreos de la Constructora Terán</i>	139
Tabla 54 <i>Resultados de Ensayo de Análisis de vacíos</i>	140
Tabla 55 <i>Resultados de Ensayo Cántabro Seco y Húmedo</i>	141
Tabla 56 <i>Resultados de Ensayo Marshall</i>	141
Tabla 57 <i>Resultados de cantidad NO₂ en el interior del cubeto hermético</i>	142
Tabla 58 <i>Resultados de degradación del NO₂</i>	142
Tabla 59 <i>Resultados de ensayos para la determinación de la calidad del agua</i>	143
Tabla 60 <i>Coordenadas del intercambiador “El Trébol”</i>	145
Tabla 61 <i>TPD Av. General Rumiñahui, Sector “El Trébol”</i>	146
Tabla 62 <i>Tasa de crecimiento vehicular (%)</i>	147
Tabla 63 <i>Proyección vehicular para el 2020</i>	148
Tabla 64 <i>Factor de crecimiento vehicular</i>	148
Tabla 65 <i>Resumen de factor de crecimiento vehicular</i>	149
Tabla 66 <i>Determinación de ESAL’s – Método AASHTO simplificado</i>	149
Tabla 67 <i>Proyección del tránsito al tiempo de diseño</i>	150
Tabla 68 <i>Cálculo – diseño de la estructura del pavimento asfáltico flexible – método AASHTO 93</i>	152
Tabla 69 <i>Ecuaciones de intensidad para la estación M – 0024</i>	153
Tabla 70 <i>Datos de diseño para un TR de 10 años</i>	154
Tabla 71 <i>Resultados de la profundidad máxima de asfalto para TR de 10 años</i>	154
Tabla 72 <i>Resultado de espaciamiento entre tuberías</i>	155
Tabla 73 <i>Caudal de infiltración de la subbase</i>	155

Índice de figuras

Figura 1 <i>Estructura típica del pavimento flexible</i>	30
Figura 2 <i>Distribución de la carga en el pavimento flexible</i>	31
Figura 3 <i>Estructura típica del pavimento rígido</i>	31
Figura 4 <i>Distribución de la carga en el pavimento rígido</i>	32
Figura 5 <i>Estructura típica del pavimento mixto</i>	33
Figura 6 <i>Transferencia de cargas a capas inferiores</i>	34
Figura 7 <i>Criterios de clasificación de agregados</i>	38
Figura 8 <i>Planta de almacenamiento de agregados pétreos de la Constructora Terán</i> ..	42
Figura 9 <i>Obtención del agregado pétreo (muestreo en pila)</i>	42
Figura 10 <i>Conformación del asfalto</i>	46
Figura 11 <i>Proceso general para el diseño de una mezcla asfáltica</i>	54
Figura 12 <i>Aspectos que involucra el desarrollo sostenible</i>	58
Figura 13 <i>Influencia de la urbanización en el drenaje natural</i>	59
Figura 14 <i>Pavimento permeable Tipo A - Infiltración total</i>	64
Figura 15 <i>Pavimento permeable Tipo B - Infiltración parcial</i>	65
Figura 16 <i>Pavimento permeable: Tipo C – sin infiltración</i>	66
Figura 17 <i>Valores del coeficiente estructural (a_3) para subbase granular</i>	72
Figura 18 <i>Valores del coeficiente estructural (a_2) para base granular</i>	72
Figura 19 <i>Valores del coeficiente estructural (a_1) para la carpeta de rodadura</i>	73
Figura 20 <i>Mecanismo de oxidación de NO a través de TiO_2</i>	83
Figura 21 <i>Granulometría de los agregados pétreos de 3/4", 3/8" y arena</i>	90
Figura 22 <i>Equipo Marshall</i>	129
Figura 23 <i>Proceso de mezclado</i>	131
Figura 24 <i>Aspersión de la emulsión acuosa sobre las muestras</i>	132

Figura 25 Muestras rectangulares asperjadas la emulsión acuosa con 3%, 5%, 8% y 10% de TiO_2	132
Figura 26 Cámara hermética con muestras asfálticas porosas fotocatalíticas en su interior.....	133
Figura 27 A) Cobre, B) Ácido nítrico, C) Disolución del cobre y ácido nítrico.....	133
Figura 28 Reacción del Cu y el $4HNO_3$ dentro del cubeto hermético.....	134
Figura 29 Muestras contaminadas con NO_2	135
Figura 30 Aspersión de agua en el pavimento asfáltico drenante fotocatalizador.....	136
Figura 31 Recolección del agua drenada por el pavimento asfáltico drenante fotocatalizador.....	136
Figura 32 Faja granulométrica estabilizada para mezcla asfáltica porosa.....	139
Figura 33 Intercambiador “El Trébol”.....	145
Figura 34 Inundación en el intercambiador “El Trébol”.....	146
Figura 35 Espesores de las capas que conforman el pavimento, diseño método AASHTO-93.....	153
Figura 36 Espesores de las capas que conforman el pavimento, diseño THE SUDS MANUAL.....	156

Resumen

La contaminación ambiental es uno de los grandes problemas que se ha generado en las zonas urbanas hasta la actualidad, mismos que desatan problemas respiratorios y alergias a los seres humanos.

El desarrollo del presente trabajo de investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento del Dióxido de Titanio (TiO_2) como fotocatalizador en mezclas asfálticas drenantes. Para esto, se elaboró muestras rectangulares de pavimento asfáltico drenante con 4% de contenido asfáltico, se colocó una microemulsión de base acuosa con diferente porcentaje de Dióxido de Titanio (3%, 5%, 8%, 10%) sobre la superficie de todas las caras de dichas muestras utilizando un difusor a presión, esta solución de base acuosa es producto de la combinación entre un aditivo y agua con una relación equitativa aditivo:agua (1:1). Mediante ensayos de laboratorio se comprobó que las muestras absorbieron $197,17 \mu/\text{m}^3$ de contaminación de Dióxido de nitrógeno (NO_2) que equivale a un 98,56% del límite máximo dado por la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (NECA). Para la prueba de descontaminación se comprobó que estuvo presente en todas las muestras con inclusión de TiO_2 aumentando considerablemente en las muestras con el 10% de TiO_2 , para la prueba de autolimpieza la muestra con inclusión del 5% de TiO_2 cumple con los límites dados por la Organización Mundial del Medioambiente (OMM) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

Palabra Clave:

- **DIÓXIDO DE TITANIO**
- **DESCONTAMINANTE**
- **AUTOLIMPIABLE**
- **FOTOCATALIZADOR**

Abstract

Environmental pollution is one of the major problems that has been generated in urban areas until today, which causes respiratory problems and allergies to human beings.

The objective of this research work is to study the behavior of titanium dioxide (TiO₂) as a photocatalyst in draining asphalt mixtures. For this purpose, rectangular samples of draining asphalt pavement with 4% asphalt content were prepared, and a water-based microemulsion with different percentages of Titanium Dioxide (3%, 5%, 8%, 10%) was placed on the surface of all the faces of these samples using a pressure diffuser. This water-based solution is the product of the combination of an additive and water with an equal additive:water ratio (1:1). Laboratory tests showed that the samples absorbed 197.17 µ/m³ of nitrogen dioxide (NO₂) contamination, which is equivalent to 98.56% of the maximum limit set by the Ecuadorian Air Quality Standard (NECA). For the decontamination test, it was found that it was present in all the samples with TiO₂ inclusion, increasing considerably in the samples with 10% TiO₂. For the self-cleaning test, the sample with 5% TiO₂ inclusion complies with the limits given by the World Environment Organization (WMO) and the Environmental Protection Agency (EPA).

Keyword:

- **TITANIUM DIOXIDE**
- **DECONTAMINANT**
- **SELF-CLEANING**
- **PHOTOCATALYST**

Capítulo I: Generalidades

Introducción

La Organización Panamericana de la Salud (2016), menciona que los problemas derivados de los altos grados de contaminación existentes en el aire han cobrado un gran interés al pasar el tiempo, debido al aumento del tráfico vehicular en grandes ciudades, en los cuales se acumulan los contaminantes causantes de alergias y enfermedades respiratorias.

La emisión de dióxido de nitrógeno (NO_2) a la atmósfera ha producido una variedad de problemas en la salud de los seres humanos y efectos negativos en el ambiente sobre la Tierra, además de su toxicidad, los NO_2 reaccionan con los hidrocarburos para formar ozono, causante principal del smog fotoquímico y de la lluvia ácida, estos gases que contribuyen al cambio climático y al calentamiento global del planeta, son más nocivos que el mismo dióxido de carbono (CO_2) (Uzcategui Paredes, 2010).

En la actualidad existen investigaciones para el uso del pavimento fotocatalizador en zonas urbanas con alta concentración vehicular y poblacional, que eliminando los contaminantes de NO_2 en el aire por medio de la fotocatalisis, un proceso de oxidación natural idéntico a la fotosíntesis de las plantas, reduce la alta concentración de contaminantes que están expuestas en la población, como los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV's) que repararan el aire que se respira (Cruzado, 2018).

Para lo cual, el dióxido de titanio (TiO_2), es un químico activo y más utilizado como fotocatalizador, ya que, es una sustancia no toxica, abundante, insoluble, económico,

capaz de absorber compuestos químicos de alto nivel tóxico como el NO_2 , convirtiéndolas en menos dañinas para el ambiente y la salud del ser humano (M. Chen & Liu, 2010).

Por su carácter innovador, los pavimentos fotocatalíticos, están llamados a ser la última generación de pavimentos, ya que aportan un valor añadido a la sociedad, especialmente en tramos urbanos donde la contaminación es más incitada y además aún no se ha implementado dentro de los proyectos en Ecuador.

Cada vez, se busca realizar proyectos más grandes en un tiempo determinado que satisfagan las necesidades del ser humano y consecuentemente, aumenten el desarrollo económico del lugar, por esta razón, la construcción de obras viales siendo un indicador del crecimiento de pueblos, ciudades y países en todo el mundo, es una herramienta importante en la industria de la construcción, ya que potenciando sus procesos, desarrollando sus procedimientos y patrones de gestión encaminados a mejorar la productividad de los recursos utilizados en este sector, conllevará a buscar nuevas tecnologías, por ejemplo, materiales de construcción que sean amigables con el medio ambiente.

Planteamiento del problema

Macro

El crecimiento de la población en zonas urbanas y la economía, en conjunto con el desarrollo de distintas actividades como la agroindustria, el incremento vehicular, la industria petrolera y los servicios, conllevan a un consumo intenso de combustibles fósiles que al mismo tiempo elevan volúmenes de contaminantes, que pueden afectar a la salud humana y a los ecosistemas (Romero Placeres et al., 2006).

Por tanto, debilitar este problema forma una elevada preocupación mundial, debido a la alta concentración de contaminantes atmosféricos del grupo de los óxidos de

nitrógeno causantes de riesgos de enfermedades para la salud de la población en todo el mundo, tales como: aumento del riesgo de infecciones respiratorias, cáncer de pulmón, enfermedades cardíacas y derrames cerebrales que afectan en la mayoría a poblaciones vulnerable, adultos mayores, niños y mujeres. Según la Organización Panamericana de Salud (2016), cerca de 7 millones de muertes prematuras fueron a causa de la contaminación del aire ambiental.

Por otro lado, más de 150 millones de personas en América Latina viven en ciudades que exceden las Guías de Calidad del Aire de la OMS (2015), debido al gran crecimiento del sector automotriz en las grandes ciudades y las medidas actuales adoptadas para luchar contra la contaminación del aire, por ejemplo, motores más eficientes, combustibles verdes, mismas que no son suficientes para cumplir con los estándares de calidad del aire establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

Meso

Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2018), en Ecuador el parque automotor matriculado creció en más de 1,4 millones de vehículos en una década, lo que situó la cifra por sobre los 2,4 millones de unidades, donde el transporte público en su mayoría opera a diésel. Este tipo de combustión produce afectaciones a la salud, ya que el 43,5% de las muertes en Quito se origina en enfermedades cardiovasculares y el 18,6 % en enfermedades respiratorias, que están relacionadas con temas de calidad del aire.

Por otro lado, la Agencia Nacional de Tránsito menciona que, entre enero y octubre del año 2018, 26 863 vehículos fueron matriculados como nuevos, en cambio, según la Agencia Metropolitana de Tránsito, en el período del 2019, 32 431 carros se sumaron a las calles de la capital, es decir, más del 20,7%.

Según Carlos Coba, representante de la Asociación Ecuatoriana Automotriz (2018), Ecuador no ha tenido un mayor avance en la disminución de la contaminación vehicular, y considera que no se relaciona con un tema económico, ya que el país cuenta con un parque automotor de más de 2'200 000 vehículos, pero de estos, 218 000 tendrían más de 35 años. Generalmente se estima que el 35% de los vehículos que circulan en el país sería altamente contaminantes debido a su antigüedad.

Micro

El problema en el cantón Quito, especialmente el sector de El Trébol, es una zona con alto índice de contaminación ambiental, generada por la gran concentración y demanda de vehículos que circulan por el lugar, donde se puede observar una capa de color gris que es producida por la acumulación de gases tóxicos, esto se debe a que dicho sector es el centro principal de la ciudad de Quito, que sirve de conexión para el embarque y desembarque de los medios de transporte principalmente público, que arriban desde diferentes puntos de la ciudad y del valle de los Chillos.

Además, la contaminación al aire emitida por el transporte público contiene dióxidos de nitrógeno (NO₂), que es producido a través de los escapes de motores de diésel y gasolina, que son compuestos químicos tóxicos y esto ocurre durante la aceleración para ponerse en circulación o mientras se encuentran detenidas por segundos, los choferes de dichas unidades realizan pequeñas aceleraciones las cuales produce que el smog salga en mayor cantidad, esta a su vez se concentra en la capa nebulosa contaminando el aire y por ende el oxígeno que respiran las personas (Suntasig Padilla, 2016).

En la actualidad, no se presenta muchas alternativas de procesos de construcción en la elaboración de pavimentos para evitar la contaminación ambiental, por este motivo, se propone el diseño y aplicación de un pavimento asfáltico drenante fotocatalítico, cuyas

características le permite la capacidad de reducir la concentración de NO₂, ocasionados por la utilización de motores de combustión interna del tráfico vehicular, acompañada de un balance ecológico y descontaminante por el proceso de oxidación que genera el dióxido de titanio (TiO₂).

Justificación

La presente investigación tiene el fin de implementar nuevos materiales y elementos alternativos de construcción que ayude a reducir la contaminación ambiental, tales como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles, para devolver a la tierra parte de ese proceso natural de filtración promoviendo el uso de una nueva tecnología ecológica, limpia y amigable con el medio ambiente, en la construcción de vías.

Por lo tanto, desarrollar esta investigación es de gran importancia, ya que aportará a la población de las zonas urbanas con altos índices de contaminación, el uso de un material capaz de descontaminar el aire y mantener la vía en perfecto estado.

Por otro lado, el propósito de la investigación es evaluar la viabilidad técnica de incorporar el dióxido de titanio como material para la elaboración de pavimentos drenantes, además, conocer las características físicas y mecánicas que adquiere el pavimento al unir un compuesto químico, y que mediante el análisis de resultados de los diferentes ensayos propuestos para esta investigación, permitirán encontrar las respectivas conclusiones y recomendaciones sobre este nuevo elemento para la construcción vial.

La efectividad de las propiedades fotocatalíticas empleada en materiales de construcción, está demostrada en diferentes investigaciones y aplicaciones a nivel nacional e internacional, mismas que han obtenido resultados aceptables; por tal razón,

tener proyectos como este, es importante para el país ya que contribuye con las investigaciones que se han venido haciendo durante algunos años atrás sobre la implementación viable de estos materiales amigables con el medio ambiente, con la salud humana y con la calidad de las obras.

Y que al determinar la factibilidad de la inclusión de dióxido de titanio para la elaboración de muestras de pavimentos drenantes fotocatalíticos, se generará un avance investigativo, que favorecerá no solo en la construcción vial, sino que se encontrará una solución que permita disminuir la contaminación ambiental producida por los vehículos que año tras año aumenta.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un pavimento drenante fotocatalítico mediante la inclusión superficial de dióxido de titanio, aplicado en zonas urbanas de altos índices de contaminación de óxido de nitrógeno, para la reducción, transformación y conducción del contaminante ambiental, con énfasis a la implementación de un corredor vial ecológico.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material pétreo y el material bituminoso, para una mezcla asfáltica drenante de calidad, conforme los procedimientos descritos en las normas vigentes.
- Caracterizar el dióxido de titanio y un componente anhídrido ideal, mediante los procedimientos descritos en las normas vigentes, para formar una mezcla óptima.
- Analizar la formula maestra de la mezcla asfáltica drenante, con el uso de los agregados extraídos de una cantera específica para este estudio.

- Medir la degradación de partículas contaminantes a partir de la activación del efecto fotocatalítico por medio de la luz ultravioleta, exponiendo las muestras de pavimento asfáltico drenante a un grado de contaminación de NO₂.
- Evaluar la existencia de residuos nocivos en el agua drenada y recolectada de las muestras de pavimento asfáltico drenante, ocasionado por la activación del efecto fotocatalítico.

Marco teórico.

Definición de pavimento

El pavimento es una estructura que está formada por capas superpuestas de materiales procesados ubicadas por encima del terreno natural, el cual distribuye las cargas aplicadas por el automotor a la subrasante, su superficie brinda comodidad y seguridad cuando se circule sobre ella, proporciona un servicio de calidad al momento de manejar, un bajo nivel de ruido, una adecuada resistencia al deslizamiento y niveles de reflejo de luz adecuados (Sotil, 2012).

Según Huamán (2013), el pavimento es la estructura que reposa sobre la subrasante, el cual comprende diferentes capas de distinta calidad, cada material, cada espesor irá de acuerdo con el diseño del proyecto y construido con el propósito de soportar cargas (estáticas y móviles) en todo el tiempo de vida útil.

Clasificación del pavimento

Para la clasificación de pavimentos se debe tomar en cuenta la distribución de las cargas recibidas de la carpeta de rodadura a la subrasante. Existen diversos factores por el cual se remplace una o varias capas, por ejemplo, el tráfico, las características del suelo de fundación, la calidad de los materiales, los costos de construcción, mantenimiento y rehabilitación (Leguía & Pacheco, 2016).

Se puede diferenciar 3 tipos de pavimentos: asfálticos, hidráulicos y mixtos, que principalmente se diferencian por el componente estructural que presentan.

Pavimento flexible

Esta estructura típica del pavimento, llamada también pavimento asfáltico, está formada en la capa superior por una carpeta asfáltica, por capas adyacentes de base y subbase mismas que contribuye con un soporte estructural, todas las capas anteriores sobre la subrasante (Leguía & Pacheco, 2016).

Figura 1

Estructura típica del pavimento flexible



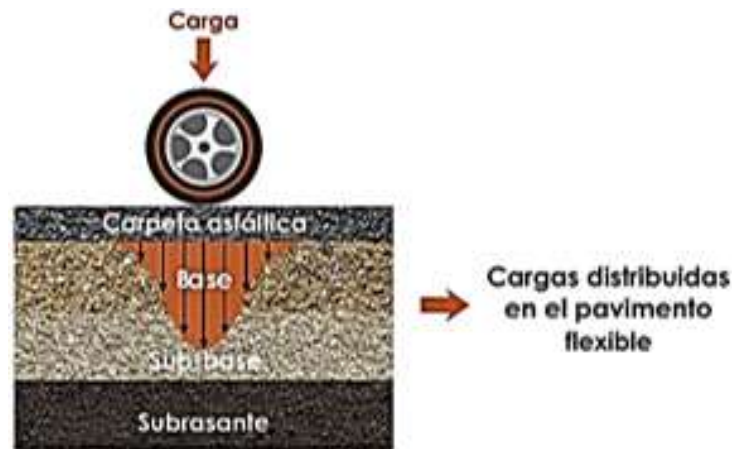
Nota: Presentado por (Loría, 2019)

Su periodo de vida útil varía entre los 10 a 15 años, teniendo un costo bajo en comparación al pavimento rígido, para que pueda cumplir con su función se deberá realizar mantenimiento periódicamente (Leguía & Pacheco, 2016).

La carpeta asfáltica, es donde está sometida las cargas de las ruedas del automotor, el cual permite que la distribución de las tensiones y pequeñas deformaciones generadas en la estructura, de tal forma que las capas inferiores (la base y la subbase) absorban dichas tensiones sin que la estructura falle (Armijos & Christian, 2009).

Figura 2

Distribución de la carga en el pavimento flexible



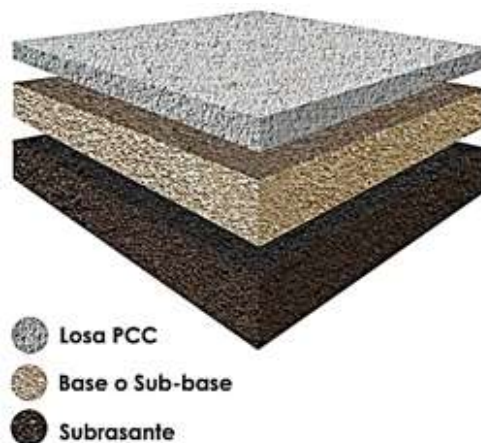
Nota: Presentado por (Loría, 2019)

Pavimento Rígido

Llamado también pavimento hidráulico, se compone de losas de concreto de cemento portland que puede o no presentar acero de refuerzo, la losa está ubicada sobre la capa base o subbase y sobre la subrasante (Leguía & Pacheco, 2016).

Figura 3

Estructura típica del pavimento rígido

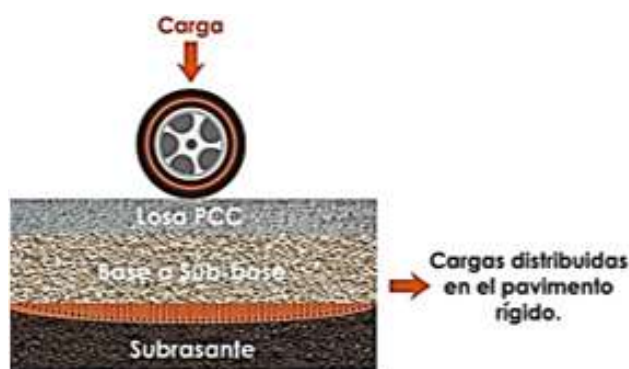


Nota: Presentado por (Loría, 2019)

La losa de concreto de cemento portland es donde se someten las cargas de las ruedas del automotor y permite que la distribución de las tensiones y pequeñas deformaciones generadas en la estructura, sean absorbidas por la subrasante directamente, es por eso que la base o subbase puede o no estar colocada, ya que estructuralmente esta no brinda ningún aporte (Armijos & Christian, 2009).

Figura 4

Distribución de la carga en el pavimento rígido



Nota: Presentado por (Loría, 2019)

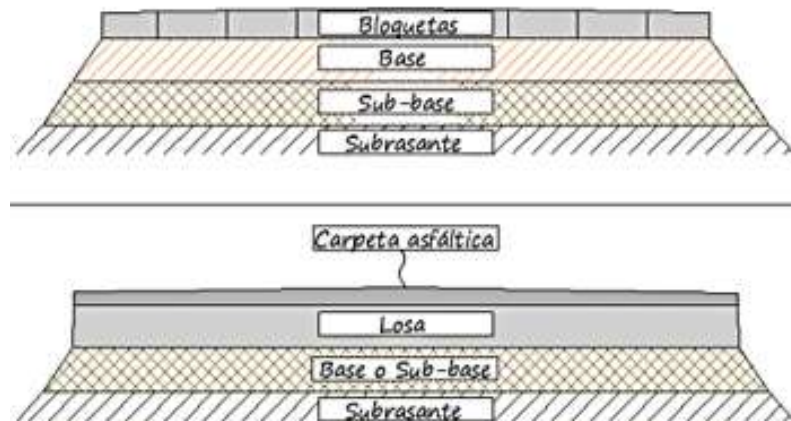
Al momento de comparar entre pavimentos, el periodo de vida de servicio varía entre los 20 a 40 años y su mantenimiento es menor orientado al sistema de juntas de losas, en cambio su costo inicial es más elevado que el pavimento flexible (Leguía & Pacheco, 2016).

Pavimentos mixtos

Llamado también pavimento híbrido, es combinación del pavimento flexible y pavimento rígido, en el cual se colocan bloques de concreto prefabricado en lugar de la carpeta asfáltica. Este pavimento ayuda a disminuir la velocidad límite de los vehículos, ya que los bloques producen una leve vibración al momento que el automotor circula por ella y obliga al conductor a conservar la velocidad apropiada para garantizar su seguridad y comodidad (Leguía & Pacheco, 2016).

Figura 5

Estructura típica del pavimento mixto



Nota: Presentado por Velásquez, 2009

Conformación del pavimento flexible

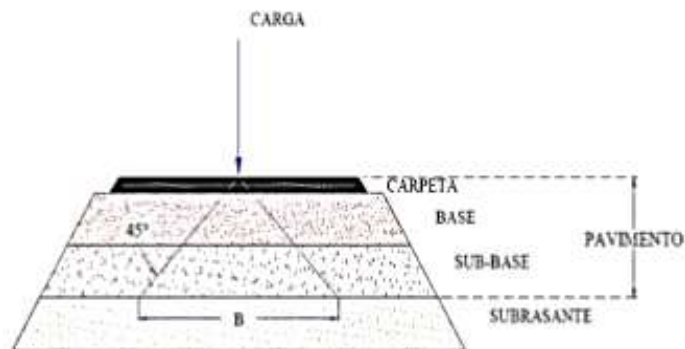
Subrasante

Es la capa inferior de la vía, el cual soporta toda la estructura de pavimento y que está ubicada hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito vehicular. La capa puede estar conformada en corte o relleno, al tener una buena compactación debe tener las pendientes especificadas y secciones transversales asignadas en los planos finales de diseño (Coronado Iturbide, 2002).

Una de las funciones de la subrasante es disipar las cargas que son transferidas desde la carpeta asfáltica hasta la capa inferior del cuerpo del pavimento, cabe recalcar que mientras mejor sea la calidad del suelo, el espesor del pavimento será menor (Tang Mondragón, 2019).

Figura 6

Transferencia de cargas a capas inferiores



Fuente: Nota: Presentado por (Tang Mondragón, 2019)

Subbase

Es la capa de pavimento con espesor definido, en donde los materiales deben cumplir determinadas especificaciones, las cuales se colocan sobre una subrasante aprobada y poder soportar la capa base, esta puede o no ser construida dependiendo la capacidad soportante que tiene la capa subrasante (Nevi, 2013).

La subbase está destinada a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la carpeta asfáltica de pavimento, haciendo que la subrasante pueda absorber vibraciones inherentes y no afecten por ningún motivo a la subbase, también es encargada de controlar la elasticidad y los cambios de volumen que pueda dañar al pavimento (Nevi, 2013).

Base

Es la capa de la estructura de pavimento formada por material triturado parcial y/o totalmente, que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. Esta capa necesita un mejoramiento (estabilización), además de la compactación para poder resistir las cargas del tránsito sin que se deforme y de forma adecuada ser transmitida a las capas inferiores (subbase, subrasante) (Nevi, 2013).

Debe usarse los materiales de más alta calidad ya que las especificaciones para los mismos son más exigentes que para los materiales de la subbase, ya que esta capa es la más importante de la estructura del pavimento (Guzmán & Ulloa, 2007).

Según Bañón & Beviá, (2000), menciona que existen diferentes tipos de bases y cada una utilizan diferente tipo de material debido a la demanda del tráfico:

- **Bases granulares.** Conformada por material granular sin utilizar algún tipo de aglomerante para su adherencia.
- **Bases granulares estabilizadas.** Formada por material pétreo, el cual se le añade un aglomerante (cal, cemento) que ayuda a mejorar su resistencia y aumentar su rigidez. La base más utilizada es la de grava-cemento, aunque también existen otras como la grava-ceniza, grava-emulsión, grava-escoria, suelo-cemento, etc.
- **Bases bituminosas.** Formadas a base de mezclas bituminosas en caliente o en frío, con dosificaciones más pobres que las empleadas en las capas que conforman pavimento. Aun así, son bases de muy buena calidad.
- **Bases especiales.** Formada por materiales obtenidos a través de un proceso industrial, por ejemplo, residuos industriales, escoria de alto horno, etc.

Capa de rodadura o carpeta asfáltica

Es la capa ubicada en la parte más superficial del pavimento que se coloca sobre la capa base y su principal objetivo es la protección estructural de pavimento, impermeabilizando la superficie en su totalidad evitando así las filtraciones del agua de la lluvia que terminaría saturando las capas inferiores impermeabilizando la superficie (Humpiri, 2015).

Según Bañón & Beviá (2000), señala un sinnúmero de exigencias en el cual la capa debe estar sometida :

- Debe ser resistente, a las fuertes presiones verticales de contacto ejercitadas por los neumáticos de los vehículos (hasta 15 kg/cm², considerando impactos) y absorber los esfuerzos tangenciales que provoca el frenado en los vehículos.
- Debe ser impermeable, impidiendo que el agua ingrese a las capas inferiores que son susceptibles a la presencia del líquido, su textura superficial debe facilitar el drenaje de las aguas pluviales.
- Debe ser antideslizante, ofreciendo un coeficiente de resistencia al deslizamiento entre neumático y carretera (tanto longitudinal como transversal), que pueda garantizar la seguridad de los conductores, principalmente en situaciones meteorológicas adversas.

Mezclas asfálticas

Definición

Llevan también el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de tal forma que los agregados pétreos quedan cubiertos por una lámina continua del ligante. Fabricadas en centrales fijas o móviles, se transportan en volquetas, al proyecto en donde se lo se extienden y se compactan utilizando el equipo y maquinaria adecuada que facilita la ejecución del proceso (Kraemer, 2009).

Clasificación de mezclas asfálticas

Al momento de clasificar las mezclas asfálticas, Bañón & Beviá (2000) considera varios parámetros que den a establecer las diferencias entre cada una de ellas:

- **Por fracciones de agregados pétreos.** Estos son mástic (filler + betún), mortero (árido fino + mástic), macadam (árido grueso + betún), hormigón (árido grueso + mortero).
- **Por temperatura de puesta de obra.** Se separan en frío (temperatura ambiente) o en caliente (altas temperaturas).
- **Por la proporción de vacíos en la mezcla.** Estas se dividen en densas (menores a 6%), semidensas (entre 6% a 12%), abiertas (mayores a 12%), porosas (mayores a 20%).
- **Por el tamaño máximo del agregado pétreo.** Gruesas o gravas ($T_{\text{máx}} > 8\text{mm}$), finas o arenas ($T_{\text{máx}} \leq 8\text{mm}$).
- **Por la estructura del agregado pétreo.** Estos son clasificados en sin esqueleto mineral o con esqueleto mineral.
- **Por la granulometría.** Se puede dividir en continuas y discontinuas.

El agregado pétreo se puede clasificar de las siguientes formas:

Por su origen

Para Herrera & Pla (2009), son agregados pétreos que se extraen de pétreos artificiales, procesados y manufacturados por el ser humano o por fuentes naturales:

- **Naturales.** Están localizados en yacimientos, canteras; para ser utilizados solo es necesario seleccionarlos, refinarlos y clasificarlos por su tamaño.
- **Artificiales o manufacturados.** Están localizados en macizos rocosos, para obtener el material se debe emplear procedimientos de detonación con explosivos, seguidamente del anterior proceso, se limpian, trituran y clasifican para luego utilizarlos.
- **Industriales.** Son materiales que circulan de forma secuencial por procesos distintos procesos de elaboración y producción, el origen del material puede ser producto de desechos, procedentes de demolición, etc.

Por su tamaño

Los materiales obtenidos tras el proceso de extracción y tratamiento son separados y clasificados por su tamaño de la siguiente manera (Bañón & Beviá, 2000):

- **Agregado grueso o grava.** Material retenido en el tamiz #4 de tamaño entre 7,6 cm y 4,76 mm y conforma el esqueleto mineral en cualquier material bituminoso.
- **Agregados finos.** Material pasante del tamiz #4 y retenido en el tamiz #200, de tamaño entre 4,76 mm y 0,074 mm, este material es utilizado para ocupar en los huecos existentes al hacer una mezcla compactada.

- **Relleno mineral.** Material ultrafino pasante del tamiz #200 de tamaño menor a 0,074 mm, estos materiales se obtienen del proceso del lavado de los agregados triturados.

Por su naturaleza

Según Gutiérrez de López (2003), los agregados naturales derivan de las rocas, por medio del fraccionamiento natural como la abrasión, el intemperismo y se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Ígneas.** Son rocas que se forman por el enfriamiento y la consolidación por magma fundido.
- **Metamórficas.** Son rocas que al someterse a grandes presiones y temperaturas sufren cambios en los minerales, este fenómeno se llama recristalización.
- **Sedimentarias.** Son rocas formadas por pedazos de rocas preexistentes que se transportan por agua, viento o hielo hasta el área de depósito.

Tabla 1

Grupo de agregados empleados en las carreteras

CLASE/Grupo		Propiedades	Ejemplos	
Ígneas	Básicas	BASALTOS	- Rocas máficas (oscuras) - Alta resistencia mecánica - Bajo desgaste al pulido - Buena adhesividad	Basalto, andesita, diabasa, ofita, lamprófido y traquita
		GABROS	- Buen comportamiento mecánico en carreteras - Durables y resistentes - Relativa escasez, zonificadas	Gabro, diorita, gneis básico, peridotita y sienita
	Ácidas	GRANITOS	- Abundantes en la Península - Pueden presentarse alteradas - Rocas abrasivas, poco pulibles - Escasa adhesividad a los ligantes - Presentan cierta fragilidad	Granito, cuarzodiorita, gneis, aplita granodiorita y pegmatita
		PÓRFIDOS	- Textura adecuada para firmes - Bajo desgaste al pulimento - Problemas de adhesividad	Pórfidos, dacita y riolita

CLASE/Grupo		Propiedades	Ejemplos
SEDIMENTARIAS	Básicos	<ul style="list-style-type: none"> - Muy abundantes en España - Muy susceptibles al pulido - Buena adhesividad - Fácil extracción y tratamiento 	Caliza, dolomía y mármoles
	Ácidos	<ul style="list-style-type: none"> - Muy resistentes al pulimento - Presentan un elevado desgaste - Buena adherencia a ligantes - Muy escasos en la Península 	Arenisca, arcosa, molasa, grauvaca, tobas y conglomerados
		<ul style="list-style-type: none"> - Muy duras y quebradizas - Buena resistencia al desgaste - Dan áridos lajosos y cortantes - Muy susceptibles al pulimento 	Pedernal, sílex, cornubianita y ftanita
		<ul style="list-style-type: none"> - Muy duras y resistentes - Difícil extracción y machaqueo - Pueden presentar alteraciones - Escasísima adhesividad 	Cuarcita, cuarzoarenita y cuarzo
METAM	ESQUISTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Formas lajosas y alteradas - Elevado peso específico - Válidos si no contienen mica 	Esquistos, filitas y pizarras

Nota: Elaborado por (Bañón & Beviá García, 2000)

Por su adhesividad

Es de suma importancia la adhesividad de los agregados pétreos con los ligantes asfálticos, debido a que se presentan fenómenos fisicoquímicos en la superficie de los agregados empleados en la capa firme (Rodríguez, 2011).

- **Ácidos.** Presentan un alto contenido en sílice y determina una gran similitud del agregado por el agua (hidrofilia) y una polaridad negativa. La adhesividad entre los agregados silíceos y el ligante asfáltico no es buena.
- **Básicos.** Presenta una escasez de hidrofílicos que los silíceos, cargándose positivamente con la presencia del agua. Tiene mejor adhesividad, presentando una gran atracción por los ácidos libres con los ligantes.

Obtención de los agregados pétreos

La norma INEN 695 (2010) da a conocer dos procedimientos para el muestreo de agregados: muestreo de una banda transportadora, muestreo de una pila.

Para desarrollar la investigación, los agregados pétreos provienen de la planta asfáltica de la Constructora Terán y para su muestreo se utilizó el segundo método presentado por la norma, ya que el material se encuentra apilado por tamaños de agregado (agregado 3/4" y 3/8" y arena).

Figura 8

Planta de almacenamiento de agregados pétreos de la Constructora Terán



Para la obtención de una muestra representativa de agregado fino se remueve la capa externa y se toma muestras del interior aleatoriamente, esto evitará que se tome material segregado o que estén contaminados con agentes del ambiente.

Figura 9

Obtención del agregado pétreo (muestreo en pila)



Material bituminoso

Asfalto

Es un material con una resistencia alta a los álcalis, ácidos y sales; cuya composición tiene betunes e impurezas insolubles en sulfuro de carbono, el cual, debe superar el 5% con respecto a su proporción (Bañón & Beviá, 2000).

Según la Universidad Mayor de San Simón (2004), el asfalto es una sustancia plástica que ayuda con la mezcla de áridos, dándole una flexibilidad controlada, ya que al aplicarle calor puede disolverse fácilmente a comparación en temperaturas atmosféricas normales, la sustancia permanece sólida o semisólida.

Caracterización del asfalto

El Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.01.22047 (2005), caracteriza al asfalto por su grado de viscosidad, por su grado de penetración y por su desempeño.

Por su grado de viscosidad

El principio fundamental es la determinación de la viscosidad absoluta a 60 °C y establecer como resultado o consistencia obtenida el grado AC que le corresponda y verificar los requisitos para ese grado (Salazar, 2011).

Tabla 2

Clasificación del asfalto por su viscosidad a 60 °C

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m ²	D-2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm ² /s	D.2170	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, mínimo	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:		D-1754						
Viscosidad, 60°C, máx.	N s/m ²	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100 ^A	100	75	50	40	25

Nota: Elaborado por (Salazar, 2011)

Por su grado de penetración

Cuanto mayor sea el grado de penetración más blando será el cemento asfáltico, es el principio básico para realizar la clasificación del asfalto mediante el ensayo de penetración a 25°C (Salazar, 2011).

Tabla 3

Clasificación del asfalto por su grado de penetración

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	GRADO DE PENETRACIÓN									
			40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
			Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s	---	D-5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta	°C	D-92	232	---	232	---	232	---	218	---	177	---
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min	cm	D-113	100	---	100	---	100	---	100	---	100 ^A	---
Solubilidad en tricloroetileno	%	D-2042	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---
Penetración retenida después de la prueba de horno sobre película delgada	%	D-5 Después de realizar D-1754	55+	---	52+	---	47+	---	42+	---	37+	---
Ductilidad 25°C, 5 cm/min, después de prueba de horno sobre película delgada	cm	D-113 Después de realizar D-1754	---	---	50	---	75	---	100	---	100 ^A	---

Nota: Elaborado por (Salazar, 2011)

Por su grado de desempeño

Determina la resistencia a deformaciones o agrietamientos dadas por temperaturas bajas o por fatiga para distintas condiciones de trabajo (Salazar, 2011).

Tabla 4

Clasificación del asfalto por su grado de desempeño

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	GRADO DEL DESEMPEÑO						
		PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
		-34 -40 -46	-10 -16 -22 -28 -34 -40 -46	-16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34	-10 -16 -22 -28 -34
Promedio 7-días Temperatura Máxima de Diseño de Pavimento	°C	<46	<52	<58	<64	<70	<76	<82
Temperatura Mínima de Diseño de Pavimento ¹⁾	°C	>-34>-40>- 46	>-10>-16> -22>-28>-34>- 40>-46	>-16>-22>- 28>-34>-40	>-10>-16> -22>-28>- 34>-40	>-10>-16> -22>-28>- 34>-40	>-10>-16> -22>-28>-34	>-10>-16> -22>-28>-34
Aglutinante Original								
Temperatura de Punto de Inflamación, Mínima	°C	230						
Viscosidad, 3 Pa.s, Temperatura de Prueba, máxima	°C	135						
Cizalla Dinámica ²⁾ G'/sen δ, mín. 1.10 kPa. de 25-mm, Plato 1-mm de Espacio, Temp. de Prueba a 10-rad/s	°C	46	52	58	64	70	76	82
Horno sobre película delgada rodante (Método de Prueba D-2872)								
Pérdida de masa, máxima	%	1.0						
Cizalla Dinámica: G'/sen δ, mín. 2.20 kPa, Plato de 25-mm, 1-mm de Espacio, Temp. de Prueba a 10 rad/s	°C	46	52	58	64	70	76	82

Nota: Elaborado por (Salazar, 2011)

Propiedades de los asfaltos

El asfalto tiene propiedades físicas que son de suma importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de vías; propiedades químicas únicas, el cual, lo hacen un material muy versátil para la construcción de vías (Galván, 2015).

A continuación, se mencionan las propiedades químicas y físicas del asfalto.

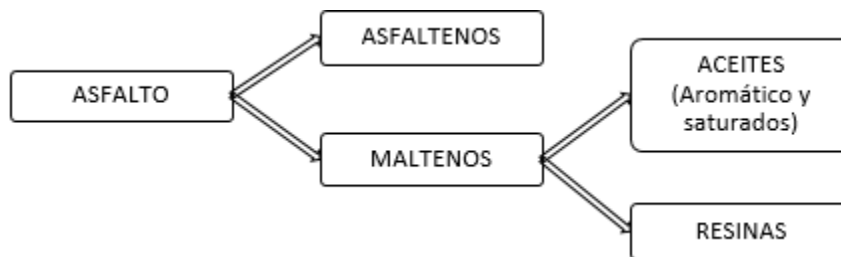
Propiedades químicas del asfalto

Galván (2015) indica que, el asfalto básicamente está compuesto por diversos hidrocarburos y ciertas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto se disuelve en un solvente llamado heptano, separándose en dos grupos principales:

- **Asfáltenos.** De color negro o pardo oscuro que dan color y dureza al asfalto y no se disuelven en el heptano.
- **Máltenos.** Líquidos viscosos compuestos por resinas y aceites, que se disuelven en el heptano.

Figura 10

Conformación del asfalto



Nota: Elaborado por (Galván, 2015)

Propiedades físicas del asfalto

Las propiedades más destacables de los asfaltos desde el punto de vista técnico para la construcción de carreteras son las siguientes (Bañón & Beviá, 2000):

- **Adhesividad.** El asfalto puede adherirse con facilidad a una partícula mineral. Es de mucha importancia esta característica para las mezclas asfálticas, donde el asfalto y el agregado forman un conjunto homogéneo.

- **Viscosidad.** Es la resistencia que oponen los agregados a separarse, esto se debe a los rozamientos internos que suceden en el centro del fluido.
- **Susceptibilidad térmica.** Debido a la temperatura, la viscosidad del asfalto presenta variaciones. A mayor temperatura el asfalto puede manejarse con mayor facilidad y a temperatura ambiente, presenta una mayor estabilidad.
- **Plasticidad.** Debido a diferentes estados físicos y temporales de carga definirán el comportamiento mecánico del asfalto. Un asfalto poco plástico no resistirá a deformaciones grandes sin que se provoquen aberturas.
- **Envejecimiento.** Debido a la acción oxidante del aire, radiaciones solares y presencia de humedad, hace que el asfalto pierda la adhesividad y sus propiedades reológicas.

Clasificación de los materiales asfálticos

Es de nuestro interés los asfaltos de pavimentación, y pueden clasificarse bajo cuatro tipos generales (Molina, 2010):

- **Asfalto rebajado.** Material compuesto por asfalto y solvente, utilizado comúnmente para la elaboración de mezclas en frío.
- **Emulsiones asfálticas.** Material asfáltico líquido estable, se compone por la unión del asfalto y el agua por medio de una solución jabonosa.
- **Asfaltos sopladados con aire.** Sometido al tratamiento de soplado de aire a temperaturas altas para proveer características para la ejecución de trabajos, por ejemplo, aplicaciones hidráulicas, materiales para cubrir, etc.
- **Asfalto AC.** Cemento asfáltico que se obtiene del proceso de destilación del petróleo. Conocido también como asfalto no modificado.

- **Asfalto modificado.** Cemento asfáltico que se combina con algún polímero o sustancia química para mejorar sus propiedades físicas.

Esta investigación se centrará en el último ítem, siendo el asfalto seleccionado para el proyecto de diseño.

Asfaltos modificados

Los asfaltos modificados se utilizan en las mezclas asfálticas de alto rendimiento para mejorar sus propiedades físicas, con la finalidad de evitar deformaciones y fatigas.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, incrementando la adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto el cual, se aplica directamente al material asfáltico, antes de ser mezclado con el material pétreo y así reducir la susceptibilidad y el agrietamiento de las capas asfálticas cuando se presenta variaciones de temperatura (Agnusdei, 2000).

Beneficios de la modificación del Asfalto

En el libro de Montejo (2002), indica los principales beneficios que se obtiene con la modificación del asfalto:

- Mayor elasticidad que mejora la resistencia al agrietamiento por la fatiga, disipa los esfuerzos y recupera su forma original.
- Mejora el daño por humedad y la adherencia, dándole resistencia a los problemas del desgranamiento o desprendimiento.
- Mejorar la cohesión, mejorando la relación de los agregados para el inicio de los tratamientos superficiales.
- Mejora la duración de la mezcla, alargando su vida útil.

Aplicaciones de los asfaltos modificados

Cuando en las mezclas asfálticas, las propiedades del asfalto requerido para el diseño no son los suficientes, se debe usar necesariamente los asfaltos modificados y en los donde comúnmente se los utilizan son (Menéndez, 2009):

- **Mezclas drenantes.** Tiene un porcentaje elevado proporciones de vacíos en la mezcla (mayor al 20%) y su proporción de agregado fino es baja (menor al 20%), esto hace que el ligante debe tener una cohesión buena para evitar que la mezcla se disgregue. Asimismo, el ligante requiere una elevada viscosidad para proveer una capa de ligante gruesa, con la cual se envuelva los agregados y evitar los efectos del envejecimiento.
- **Microaglomerados en caliente.** Son capas de rodadura de espesor muy reducido y su aplicación es sobre pavimentos estructuralmente buenos, donde se pueda restaurar la resistencia al deslizamiento.
- **Mezclas bituminosas altamente resistentes para capa de rodadura.** Es requisito que estas mezclas tengan una buena resistencia a deformaciones plásticas y fatiga.
- **Tratamientos superficiales.** Se utiliza en vías de alto tráfico y/o zonas climáticas con temperaturas extremas, ya que el ligante tiene una buena cohesión y susceptibilidad térmica, con el fin de evitar la exudación del ligante durante el verano o la pérdida de gravilla en el invierno.

Obtención del material asfáltico

El asfalto tipo AC-20, clasificado por su viscosidad, es el que se utilizará para la elaboración de las briquetas y muestras rectangulares, el cual se obtuvo con la

colaboración de la Constructora Terán. Este asfalto es el que se utiliza en el Ecuador y su producción y distribución lo realiza la refinería de Esmeraldas.

Mezcla Asfáltica drenante

Especificaciones técnicas de los materiales y la mezcla asfáltica

Agregados

Es necesario que los agregados cumplan con ciertas especificaciones para que puedan ser usados en el diseño de la mezcla asfáltica drenante, que se detalla a continuación:

Tabla 5

Especificaciones para los agregados pétreos

ENSAYO	ESPECIFICACIÓN	NORMA
Abrasión (Máquina de los Ángeles)	40%	INEN 860 / ASTM C 131
Gravedad específica y absorción	---	INEN 856 / ASTM C 127 INEN 857 / ASTM C 128
Equivalente de arena	> 40%	INV E-133 / ASTM D2419
Granulometría	---	INEN 696 / ASTM C136

Nota: Elaborado por (MOP-001-F, 2002)

Las porciones de agregados gruesos y finos deberán cumplir con la graduación de la faja granulométrica de la norma colombiana INVIAS, artículo 453.

Asfalto

La normativa (MOP-001-F, 2002), presenta ciertos requerimientos que el asfalto debe cumplir y poder ser utilizado en la mezcla asfáltica.

Tabla 6*Especificaciones para el asfalto*

ENSAYO	ESPECIFICACIÓN	NORMA
Penetración (1/10mm)	60 mín.	INEN 917 / ASTM D5
Ductilidad (cm)	> 100 cm	INEN 916 / ASTM D113
Punto de reblandecimiento (°C)	48 - 57 °C	INEN 920 / ASTM D36
Punto de inflamación (°C)	232 mín.	INEN 808 / ASTM D92
Gravedad específica (gr/cm ³)	≥ 1	ASTM D70

Nota: Elaborado por (MOP-001-F, 2002)

Definición de mezclas asfálticas drenantes

Las mezclas asfálticas drenantes tienen un porcentaje de vacíos alto, el cual permite que se filtre el agua a través de ella de una forma rápida y ser evacuada hacia las cunetas u otro elemento drenante, evitando su acumulación en la superficie, inclusive bajo precipitaciones intensas y prolongadas (Kennedy & Hudson, 1968).

Son mezclas asfálticas calientes que se utilizan en la capa de rodadura, las cuales tienen un porcentaje elevado huecos de aire (20% a 25%) interconectados entre sí, impidiendo la formación de mantos de agua en la capa de rodadura cuando llovizna, con el fin de evitar la visibilidad y pérdida de pista en los conductores (Muñoz, 2001).

Características de la mezcla asfáltica drenante

Estas mezclas poseen ciertas características que hacen que su comportamiento sea diferente al de las mezclas convencionales. A continuación se presenta una serie de ventajas del uso de una mezcla asfáltica drenante (Recasens, 2006):

- Superficie de rodadura drenante cómoda, capaz de absorber el ruido del motor.

- Elevada resistencia al deslizamiento bajo lluvia y altas velocidades, capaz de eliminar o reducir el fenómeno de hidroplaneo.
- Eliminación del fenómeno de reflexión de la luz, mejorando la visibilidad del conductor.
- Reducción del agua proyectada por el paso de los vehículos y mejora de la visibilidad con la superficie mojada.
- Elevada resistencia a las deformaciones plásticas.

Así como existen ventajas que le resalta a este tipo de mezclas asfálticas, también existe una serie de limitaciones que deben ser tomadas para su uso y mantenimiento correcto (Ruiz, 2000).

- Los huecos de las mezclas asfálticas drenantes tienden a colmatarse por la acumulación de polvo, arena, materia orgánica u otros durante su vida útil
- El costo directo de su construcción y su mantenimiento es mayor con respecto a una mezcla asfáltica convencional, ya que necesariamente debe construirse con asfaltos modificados y agregados de buena calidad, superiores a lo normal.
- El diseño geométrico de una mezcla asfáltica drenante debe ser riguroso, cuando es utilizada como carpeta de rodadura, esta se extenderá sobre una capa impermeable y estructuralmente estable.
- El agua que escurre por la mezcla asfáltica drenante debe ser evacuada a través de drenajes laterales, esto implica la construcción obligatoria de canales y otras obras de arte.

Diseño de la mezcla asfáltica drenante

Para el diseño de este proyecto, el tipo de mezcla asfáltica dependerá de la temperatura de puesta en obra (mezclas en caliente), estas deben cumplir requisitos establecidos para su rendimiento, resistencia a cargas ambientales y de tráfico. Así como su colocación debe ser relativamente fácil, proporcionando una superficie de conducción segura y suave (Doré & Zubeck, 2009).

Las mezclas asfálticas en caliente forman el tipo más general que son empleados en vías urbanas como en carreteras convencionales, son utilizadas en las capas de rodadura y en las capas inferiores de los firmes (Kraemer, 2009).

Según Zúñiga (2015), la mezcla asfáltica en caliente es una combinación entre los agregados pétreos con un ligante, cuyas cantidades determinaran las propiedades físicas de las mezclas.

El calificativo “en caliente” hace referencia a la temperatura en el momento que se coloca en la obra, que está entre los 150°C a 200°C, haciendo que el ligante obtenga una viscosidad baja para una mejor trabajabilidad y docilidad del material (Bañón & Beviá, 2000).

Proceso general para el diseño de mezclas asfálticas en caliente

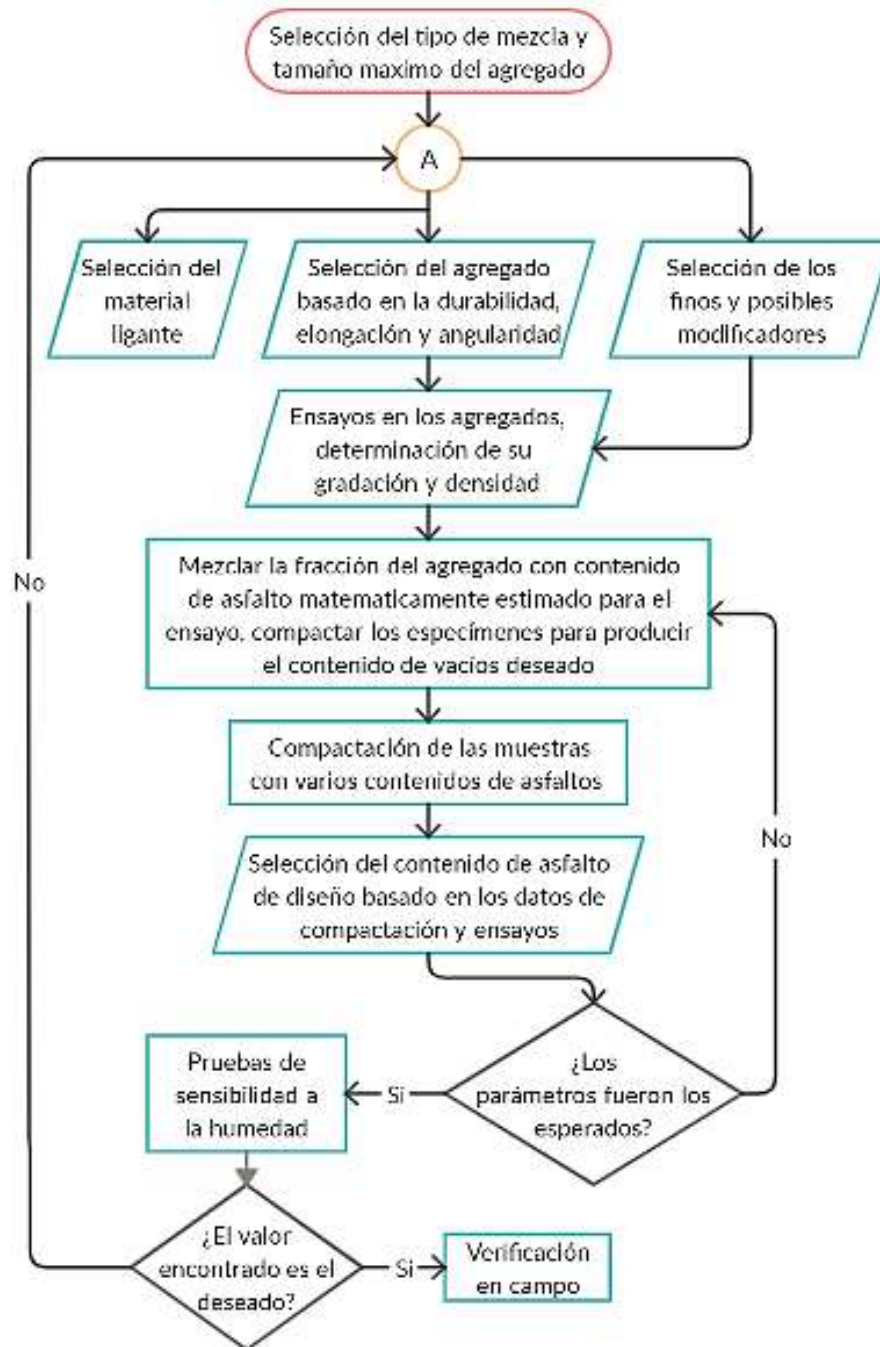
El diseño empieza con la selección de un tipo de HMA apropiado y un tamaño de agregado máximo. Los factores que se consideran para el uso final de la mezcla son: volumen y velocidad del tráfico, proporción de vehículos pesados. y velocidad de tráfico. En algunos casos, otros factores, como la reducción de ruido y la permeabilidad a la humedad (Doré & Zubeck, 2009).

Para el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica incluyen: selección de materias primas adecuadas, desarrollo de mezclas asfálticas que posteriormente se desarrollan

los ensayos y análisis de probetas compactadas hasta conseguir una mezcla asfáltica anhelada, el cual se detalla su proceso en la siguiente figura.

Figura 11

Proceso general para el diseño de una mezcla asfáltica



Nota: Elaborado por (Doré & Zubeck, 2009)

Descripción de los métodos de diseño

Método Marshall

Bruce Marshall, ingeniero en mezclas asfálticas del Departamento de Vías del Estado de Mississippi es el desarrollador de este método y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos hizo mejoras al procedimiento de prueba Marshall a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, desarrollando un nuevo criterio en el diseño de mezclas asfálticas. Al inicio, el método sería aplicado para mezclas asfálticas en caliente, para agregados de tamaño máximo a 25,4 mm (1 pulgada) o menor y puede usarse para el diseño en laboratorio, así como, para el control en campo de las mezclas asfálticas en caliente (Cáceres, 2007).

El Método Marshall ayuda a la determinación del contenido óptimo del asfalto para una combinación de agregados, estableciendo densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben cumplir en el transcurso de la elaboración de la mezcla asfáltica (ASPHALT Institute, 2007).

Para realizar el método se utiliza probetas de 101,6 mm (4 pulgadas) de diámetro y un espesor de 63,5 mm (2,5 pulgadas) de espesor. Se elabora una serie de probetas con la misma combinación de agregados, pero con diferente contenido de asfalto para cada una, su preparación seguirá un procedimiento específico para el calentado, mezclado y compactado de la mezcla asfáltica (ASTM D1559, 1989).

Método del Cántabro

Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer en 1979, iniciaron las investigaciones para formar una metodología en la elaboración de dosificaciones en laboratorio para mezclas asfálticas, el cual desarrollaron dos ensayos (Normativa Española, 2000):

- **Cántabro**, el ensayo de pérdida por desgaste en la máquina de los Ángeles, para la caracterización mecánica.
- **Permeámetro de carga variable LCS**, para la caracterización hidráulica de porcentajes de vacíos, en laboratorio o en campo.

El ensayo Cántabro puede realizarse tanto en estado seco, como en húmedo, simulando en laboratorio la acción abrasiva del tránsito y la influencia del agua, lo que permite el estudio y dosificación de estas mezclas. La pérdida de peso de la probeta, respecto de su peso inicial, medido en porcentaje es el resultado del ensayo, tomando en cuenta que mientras mayor sea la calidad y el porcentaje de los componentes que constituyen la mezcla, la cohesión va a ser mayor, y las pérdidas por desgaste serán mínimas.

Cántabro Seco. La Norma NLT-352 (1986), describe el proceso que debe seguirse, empleando la máquina de los Ángeles. El procedimiento puede emplearse tanto en laboratorio, como para el control en obra. Se aplica en mezclas bituminosas fabricadas en caliente y de granulometría densa, cuyo tamaño es inferior a 25 mm. El ensayo es realizado a una temperatura de 25°C, lo cual permite valorar indirectamente la cohesión y trabazón, así como la resistencia a la desintegración de la muestra ante los efectos abrasivos del medio ambiente y el desgaste del pavimento originado por el tránsito.

Cántabro Húmedo. La Norma NLT-362 (1992), es un ensayo que nos permite valorar la pérdida de cohesión, que se produce por la acción del agua en la mezcla y el efecto que producen los ligantes modificados en la mejora de esta propiedad.

El procedimiento consiste en determinar la pérdida al “Cántabro Húmedo” de mezclas que han permanecido sumergidas en agua 4 días a 49 °C o 24 horas a 60°C. Pérdidas altas o un índice de aumento de las mezclas, respecto al ensayo del “Cántabro

Seco” también alto será indicativo, de una falta de resistencia de la mezcla a la acción del agua.

Las recomendaciones más usuales para mezclas drenantes utilizadas en capas de rodadura establecen los siguientes valores máximos y mínimos:

- % de Huecos > 20%
- Pérdida del Cántabro Seco (25 °C) < 25%
- Pérdida al Cántabro tras inmersión (24 horas, 60 °C) < 35 %

Sistemas urbanos de desarrollo sostenible (SUDS)

Desarrollo sostenible

Según la Comisión del Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (1987), el desarrollo sostenible satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

El desarrollo sostenible avanza con el tiempo, con la idea de preservar los recursos naturales y teniendo en cuenta que estos son limitados, en la actualidad el medioambiente ha reaccionado ante la acción producida por las actividades del ser humano, a partir de la revolución industrial, la actividad humana ha agravado el calentamiento global a través de la acumulación acelerada de gas del efecto invernadero en la atmosfera (Vargas, 2009).

El aspecto clave de este enfoque se encuentra en mantener el equilibrio intergeneracional: asegurar que las generaciones futuras cuenten con al menos las mismas oportunidades que las generaciones presentes (Vargas, 2009).

En la siguiente figura muestra la esencia del desarrollo sostenible, el cual debe ser equitativo (sociedad y economía), viable (economía y medio ambiente) y vivible (medio ambiente y sociedad).

Figura 12

Aspectos que involucra el desarrollo sostenible



Nota: Presentado por: (Vargas, 2009)

Construcción sostenible

Según Bieber (2009), la Construcción Sostenible la define como aquella que tiene respeto y compromiso con el medio ambiente, el cual implica el uso eficiente de la energía, del agua, los recursos y materiales no perjudiciales para el medioambiente, reduciendo los impactos ambientales resultando más saludable.

Las ciudades actuales están desarrollando una construcción sostenible en los últimos tiempos de la siguiente manera:

- Durante el proceso constructivo de una edificación se opta por la clasificación de residuos por medio del reciclaje y reusó de materiales.

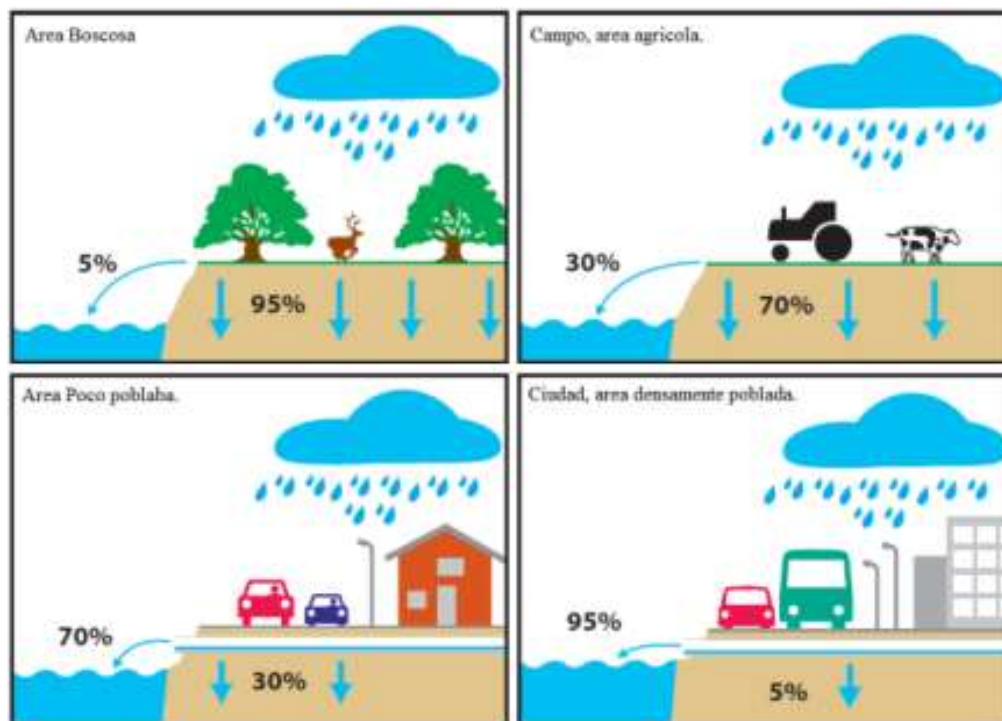
- La construcción de sistemas de almacenamiento de agua de lluvia en zona urbana para evitar que se conviertan en aguas residuales innecesarias en las plantas de tratamiento.

Técnicas de drenaje sostenible

Se estima que en una zona natural sin urbanizar el 95% del agua que se gestiona, se infiltra en el suelo y sólo un 5% produce escorrentía; en una zona de baja urbanización como en zonas rurales y residenciales fuera de las ciudades, la infiltración disminuye hasta un 30% y un 70% de escorrentía; para una zona urbana de gran ocupación poblacional, la infiltración es despreciable y esto genera que la escorrentía sea de un 95%, siendo necesario un drenaje óptimo y lograr un entorno óptimo de habitabilidad (Rodríguez Hernández, 2008).

Figura 13

Influencia de la urbanización en el drenaje natural



Nota: Presentado por (Castro, 2011)

Las técnicas de drenaje sostenible describen las principales acciones para una recolección eficiente de agua de lluvia, este recurso es de suma importancia en estos tiempos de sequías producidas por el calentamiento global y además ver las ventajas contra los sistemas tradicionales.

Se toma la clasificación que realizó Rodríguez Hernández (2008), en donde muestra las distintas clasificaciones en las diferentes instituciones:

Best Management Practice (BMPs): Clasifica las prácticas y mecanismos de control de la contaminación de la escorrentía superficial urbana de la siguiente forma:

- Mecanismos de infiltración:
 - ♦ Depósitos y estanques de infiltración.
 - ♦ Lechos, zanjas y pozos de infiltración.
 - ♦ Tuberías perforadas de infiltración.
 - ♦ Pavimentos porosos.
- Mecanismos de filtración:
 - ♦ Depósitos filtrantes.
 - ♦ Filtros de arena y/o turba
- Mecanismos de control por medio de vegetación:
 - ♦ Canal de drenaje de estabilización con cubierta vegetal.
 - ♦ Franja filtrante.
- Mecanismos de detención y retardo:
 - ♦ Pequeños sumideros y controles especiales.
 - ♦ Estanque seco de detención extendida.

- ♦ Estanque húmedo (depósito de retención).
- ♦ Humedales artificiales.
- ♦ Almacenamiento en el sistema de drenaje (en línea y/o fuera de línea).

Environmental Alliance¹² (UK) (2001): Se realiza la siguiente clasificación:

- Técnicas de control en origen:
 - ♦ Pavimentos porosos.
 - ♦ Zanjas de infiltración.
 - ♦ Depósitos de infiltración.
- Sistemas de conducción permeable:
 - ♦ Drenes filtrantes o franceses.
 - ♦ Cunetas de hierba o cunetas verdes.
- Sistemas de tratamiento pasivo:
 - ♦ Franjas filtrantes o depósitos de detención.
 - ♦ Estanques de retención.
 - ♦ Humedales.

CIRIA C697 (2001): Realiza una clasificación más simplificada de los Sistemas Urbanos de Desarrollo Sostenible (SUDS):

- Superficies permeables y drenes filtrantes.
- Franjas filtrantes y cunetas verdes.
- Mecanismos de infiltración.
- Depósitos y estanques

Rodríguez Hernández (2008) indica que, al haber analizado las principales clasificaciones existentes y como síntesis de las mismas, en la siguiente tabla presenta la clasificación propuesta para las técnicas de drenaje sostenible, en esta clasificación se engloban doce técnicas agrupadas en cuatro categorías.

Tabla 7

Clasificación propuesta de las técnicas de drenaje sostenible

Categoría dentro del drenaje sostenible		Técnicas de drenaje sostenible
Sistemas urbanos de drenaje Sostenible(SUDS)	A. Medida Preventivas	1. Legislacion
		2. Formacion
		3. Inversion
	B. Sistemas de infiltracion	4. Superficies permeables
		5. pozos de infiltracion y zanjas de infiltracion
	C. Sistemas de captacion y transporte	6. Depositos de infiltracion
		7. Drenes filtrantes
		8. Cunetas verdes
		9. Franjas filtrantes
		10. Depositos de detencion
	D.Sistemas de tratamiento pasivo	11. Estanques de retencion
		12. Humedales artificiales

Nota: Presentado por (Rodríguez Hernández, 2008)

La primera categoría corresponde a las medidas preventivas que deben ser consideradas en cualquier diseño o aplicación del drenaje urbano. Las tres categorías restantes recogen las soluciones puramente constructivas, consideradas propiamente como sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

Para el presente trabajo se utilizará la técnica de la superficie permeable como sistema de infiltración, para el sistema de captación y transporte se utilizará la técnica de los drenes filtrantes; estas dos categorías comprenden al sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS).

Pavimentos asfálticos drenantes

Uno de los sistemas de drenaje alternativos son los pavimentos drenantes, los cuales son básicamente una mezcla de agregados gruesos uniformemente gradados, con muy bajo contenido de arena y una mezcla bituminosa, logrando un porcentaje de vacíos entre 20% y 25% (Reyes, 2002).

Estos pavimentos son una parte esencial del desarrollo urbano, sin embargo, son los generadores de los excesos de caudal debido a su capa impermeable, que normalmente vienen contaminados con metales pesados e hidrocarburos. Estos excesos de caudal y de contaminantes se pueden evidenciar con mayor impacto, aguas abajo o en ecosistemas naturales ya que se recibe la mayor cantidad de agua y las propiedades que presenta (Lucke et al., 2013)

Debido a esta acumulación de aguas contaminadas se debe buscar técnicas alternativas al drenaje urbano que logren filtrar y evitar la acumulación de aguas y contaminantes.

Tipos de pavimentos asfálticos drenantes

Para el sistema urbano de desarrollo sostenible (SUDS), la formación de este pavimento, es necesario materiales altamente impermeables combinados con ranuras o materiales permeables, cumpliendo con la principal función, el cual es la conducción del agua a través de la capa superficial hacia las capas inferiores del pavimento en su totalidad (Woods-Ballard et al., 2007).

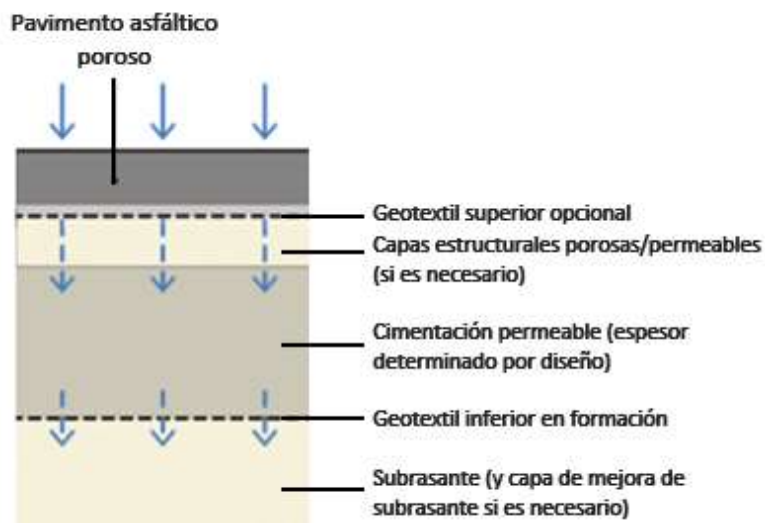
Pavimento tipo A – Infiltración total

Infiltra toda la lluvia pasando a la subestructura donde se almacenará temporalmente que seguidamente se infiltrará por debajo del suelo. No existirá un sistema de alcantarillado, pero posiblemente exista la demanda de desbordamientos de

emergencia para cualquier tipo de evento que se presente durante su vida útil (Woods-Ballard et al., 2007).

Figura 14

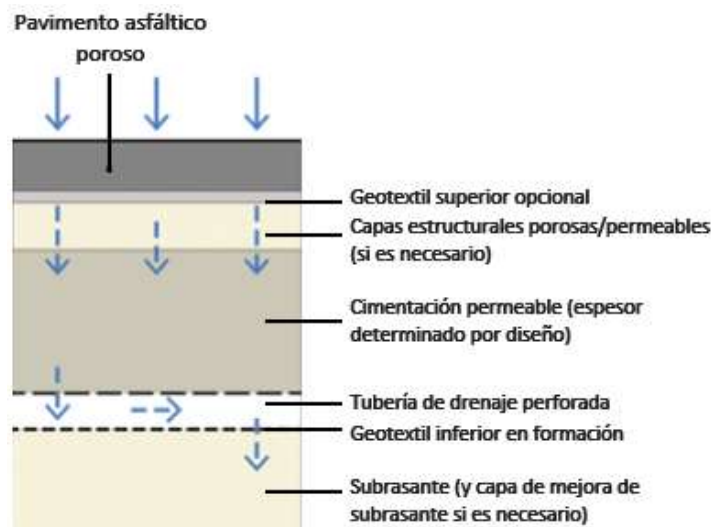
Pavimento permeable Tipo A - Infiltración total



Nota: Publicado por (Woods-Ballard et al., 2007)

Pavimento tipo B – Infiltración parcial

El pavimento tipo B, tiene un sistema de drenaje que recepta la cantidad de lluvia excedente que el subsuelo no pueda infiltrar, ya sea directo por medio de la subbase o transportadas por tuberías perforadas dentro o debajo de la misma como se puede observar en la siguiente figura, la malla geotextil también es utilizada como recolector y conductor de agua por debajo de la subbase, para reducir los riesgos de la estabilidad del suelo se debe evitar aglomeración de agua por la superficie de la subrasante (Woods-Ballard et al., 2007).

Figura 15**Pavimento permeable Tipo B - Infiltración parcial**

Nota: Publicado por (Woods-Ballard et al., 2007)

Pavimento tipo C – Sin infiltración

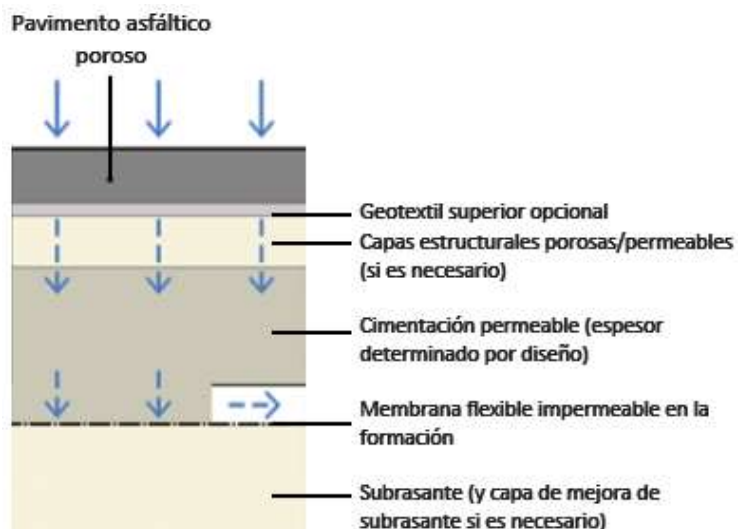
Para el pavimento tipo C, todo el elemento es envuelto por una membrana impermeable y flexible colocada sobre la subrasante, esto ayuda a que el agua filtrada por la capa de la subbase se condujera a un recolector por medio de tuberías perforadas (Woods-Ballard et al., 2007).

A continuación, se da a conocer en que situaciones se puede utilizar este tipo de pavimento (Woods-Ballard et al., 2007):

- Cuando el suelo tiene una baja permeabilidad o baja resistencia.
- El nivel freático del suelo se localiza a 1 metro de la subbase.
- Para la recolección del agua y volver a darle un nuevo uso.
- Existencia de lugares contaminados, con el fin de minimizar la movilización de agentes contaminantes.

Figura 16

Pavimento permeable: Tipo C – sin infiltración



Nota: Publicado por (Woods-Ballard et al., 2007)

Métodos de diseño del pavimento asfáltico

Método AASHTO 93

La metodología AASHTO fue conocido en su principio como AASHO, desarrollada en los Estados Unidos en el estado de Illinois en el año de 1956, el cual se basaba en realizar un ensayo en escala real durante dos años con el fin de desarrollar tablas, gráficos y fórmulas que representen las relaciones deterioro-solicitación de las diferentes secciones ensayadas (Corredor, 2008).

En el año de 1993, la versión de la AASHTO se mejoró, al introducir conceptos mecanicistas para la adecuación de algunos parámetros a condiciones diferentes que dominaban en el ensayo original (Salamanca, 2014).

Este método es fundamentado en el número de ejes equivalentes de 18 kips en el carril de diseño (W_{18}), el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_o + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}(MR) - 8,07$$

Ec. 1

Donde:

- MR = Módulo resiliente de la subrasante.
- $W_{18}(N)$ = Número de ejes simples equivalentes en el carril de diseño.
- S_o = Factor por el error en la estimación de tráfico y del comportamiento de la vía.
- SN = Número estructural.
- ΔPSI = Diferencia entre el índice de servicio final y el inicial.
- Z_R = Desviación de la distribución normal.

Para el diseño de pavimentos asfálticos flexibles por el método AASHTO 93 se consideran los siguientes factores:

Ejes equivalentes

Es necesario determinar el valor de W_{18} , para encontrar el espesor de cada una de las capas de pavimento.

$$W_{18} = ESAL's \times 365 \times F_D \times F_C \times \left(\frac{(1+g)^n - 1}{g} \right)$$

Ec. 2

Donde:

- ESAL's = tránsito promedio diario.
- F_C = factor de distribución por carril.

- F_D = factor de distribución por dirección.
- g = tasa de crecimiento anual.
- n = periodo de diseño en años.

Tabla 8

Factor de distribución por dirección (F_D)

Número de Carriles en ambas direcciones	F_D (%)
2	50
4	45
6	40

Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Tabla 9

Factor de distribución por carril (F_C)

Número de carriles de cada dirección	F_C (%)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 o más	50 – 75

Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Confiabilidad (R)

La confiabilidad es una relación entre la seguridad de la estructura construida se desempeñe de forma satisfactoria durante el periodo de vida útil, debido a esto se toma un coeficiente de confiabilidad dependiendo el tipo de vía.

Tabla 10*Niveles de confiabilidad (R)*

Función de la carretera	Urbana	Rural
Corredores arteriales (malla esencial)	85 – 89,90	80 – 99,90
Colectores (autopista RI – RII, clase I – II)	80 – 99	75 – 95
Otros	50 – 80	50 – 80

Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Ya definida la confiabilidad se procede al cálculo del del valor de la desviación de la distribución normal (Z_R), en la siguiente tabla se muestra los valores de la desviación según el porcentaje de confiabilidad.

Tabla 11*Valores de Z_R para diferentes grados de confiabilidad*

Confiabilidad	Z_R
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Serviciabilidad (ΔPSI)

La serviciabilidad hace referencia a la suficiencia que posee el pavimento a la hora de servir al tránsito para el cual fue diseñado, el ΔPSI es el índice de servicio presente que puede variar entre 5; donde 0 es el valor mínimo que se concede a una vía imposible de circular y 5 es el valor máximo para una vía que es perfecta.

Según la AASHTO (1993), mediante estudios determinó que el valor adecuado de serviciabilidad inicial para pavimentos flexibles es de 4,2.

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

Ec. 3

donde:

- P_o = Índice de servicio inicial.
- P_t = Índice de servicio final, en la siguiente tabla se muestra el índice de serviciabilidad de cada tipo de vía.

Tabla 12

Índice de serviciabilidad final (P_t)

P_t	Clasificación
3.00	Autopista
2.50	Colectores
2.25	Calles comerciales e industriales
2.00	Calles residenciales y estacionamientos

Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Desviación estándar del sistema (S_o)

Es un factor por error en la estimación de tráfico y del comportamiento de la vía, este valor toma en cuenta las distintas variaciones como por ejemplo (Rondon & Reyes, 2015):

- Variación de las propiedades de los materiales.

- Variación en la estimación de la circulación vehicular.
- Variación de las propiedades de la subrasante.
- Variación de las condiciones climáticas.
- Variación de la calidad de la construcción.

Tabla 13

Desviación estándar (So)

Proyecto de pavimento	So	
	Flexible	Rígido
Construcción nueva	0,45	0,35

Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Módulo resiliente (MR)

La importancia del módulo resiliente se enfoca en la caracterización del material por su respuesta a cargas cíclicas que representan el paso del tráfico vehicular sobre la estructura de dicho pavimento, conocer las características resilientes de cada material es fundamental, ya que, la mayoría de veces el pavimento presenta problemas antes de llegar a su esfuerzo máximo de corte, determinado por el ensayo de CBR.

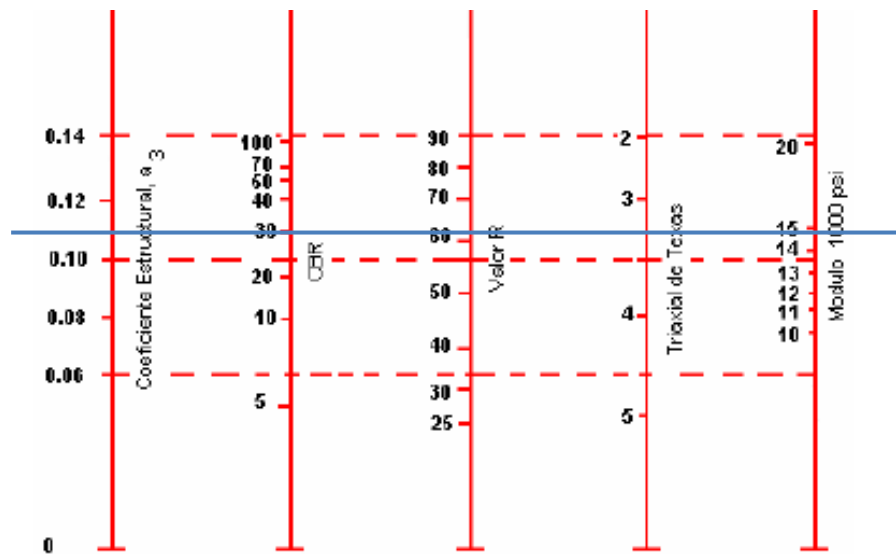
Para el cálculo de módulo resiliente de la subrasante, se requiere conocer el valor del suelo (CBR) y utilizarla en la siguiente ecuación:

$$MR = 2555 \times CBR^{0,61} \quad \text{Ec. 4}$$

Con la ayuda de la siguiente figura, se determina el coeficiente estructural de la subbase granular (a_3) utilizando el CBR de dicha capa.

Figura 17

Valores del coeficiente estructural (a_3) para subbase granular

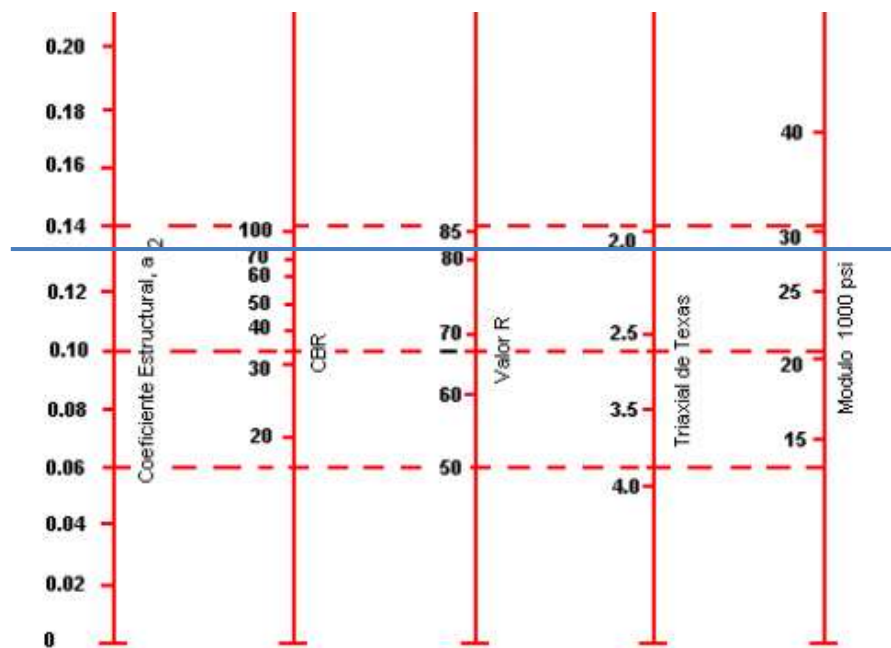


Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Para el caso del coeficiente de la base granular (a_2), se utiliza la siguiente figura.

Figura 18

Valores del coeficiente estructural (a_2) para base granular.



Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

La guía AASHTO 93 presenta la siguiente fórmula para el cálculo del módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica.

$$E_1 = 860 \times \frac{EM}{FL} \times 10^{0,035 \times (30 - T)} \quad \text{Ec. 5}$$

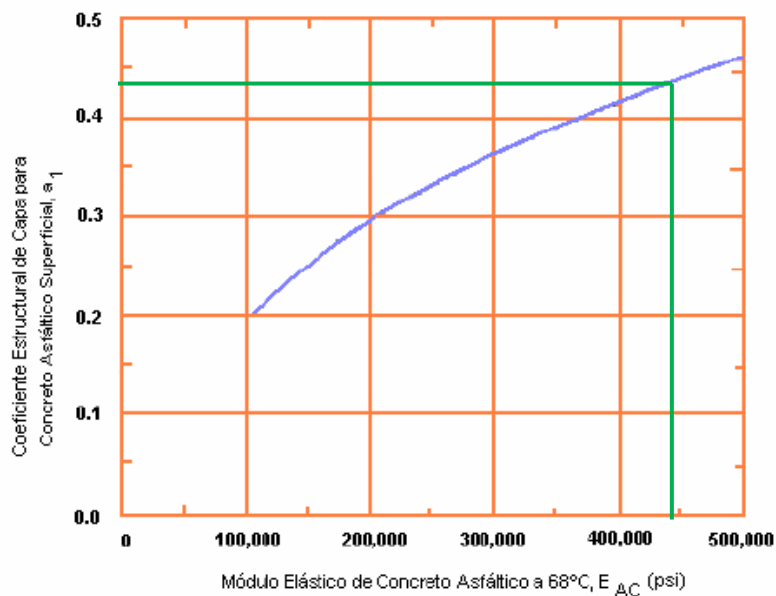
Donde:

- E_1 = Módulo elástico de la capa asfáltica (MPa).
- EM = Estabilidad Marshall (KN).
- FL = Flujo o deformación Marshall (mm).
- T = Temperatura de cálculo (°C).

Para la obtención del valor del coeficiente estructural (a_1) para la carpeta de rodadura se debe utilizar el monograma de la siguiente figura.

Figura 19

Valores del coeficiente estructural (a_1) para la carpeta de rodadura



Nota: Presentado por (AASHTO, 1993)

Número estructural (SN)

A cada módulo se asigna un valor de coeficiente estructural de capa que permite el cálculo del número estructural mediante la siguiente ecuación:

$$SN = a_1d_1 + a_2d_2m_2 + a_3d_3m_3 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- a_i = Coeficiente estructural de la capa i.
- d_i = Espesor de la capa i.
- m_i = Coeficiente de drenaje de la capa i.

Para el cálculo de cada espesor de capa con el que está compuesto el pavimento flexible, utilizaremos las siguientes ecuaciones:

$$d_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad \text{Ec. 7}$$

$$d_2 = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \times m_2} \quad \text{Ec. 8}$$

$$d_3 = \frac{SN_3 - SN_2^*}{a_3 \times m_3} \quad \text{Ec. 9}$$

Drenaje

El drenaje es uno de los factores principales para el diseño de los pavimentos flexibles, ya que al retenerse el agua en su superficie sufre deterioro en su estructura, debido a este inconveniente, el pavimento drenante cumple con un nivel alto en el tema de drenaje. El método AASHTO 93, presenta los niveles de drenaje para el diseño en la siguiente tabla.

Tabla 14*Niveles de drenaje*

Calidad del drenaje	Término para la remoción del agua
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Aceptable	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	El agua no drena

Nota: Tomado de (AASHTO, 1993)

Para obtener el valor del coeficiente de drenaje, dependerá de la calidad de drenaje y el tiempo de exposición que conforma la estructura del pavimento a nivel de humedad próximo a la saturación. A continuación, en la siguiente tabla se muestra dichos coeficientes.

Tabla 15*Coeficiente de drenaje para la base y la subbase*

Calidad de drenaje	Porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Buena	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Aceptable	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

*Nota. Presentado por (AASHTO, 1993)***Método THE SUDS MANUAL**

Los sistemas de drenaje urbano sostenibles están diseñados para maximizar los beneficios que se obtienen del agua superficial que proviene de las precipitaciones o el afloramiento de aguas subterráneas, mediante los SUDS, se tiene una administración, calidad y servicio responsable del agua y apto para la biodiversidad (Ballard et al., 2015).

El manual SUDS recomienda el sistema de gestión de agua apropiado para un rango de condiciones de la subrasante como se puede apreciar en la siguiente figura.

Tabla 16

Coefficiente de drenaje para la base y la subbase

Orientación sobre la selección del tipo de sistema de gestión de agua				
Características del suelo		TIPO A	TIPO B	TIPO C
		Infiltración total	Infiltración Parcial	Sin Infiltración
Permeabilidad de la subrasante definido por el coeficiente de permeabilidad k (m/s)	1E-6 a 1E-3	✓	✓	✓
	1E-8 a 1E-6	×	✓	✓
	1E-10 a 1E-8	×	×	✓
Nivel freático menor a 1 metro		×	×	✓
Condiciones del suelo tales que la infiltración de agua no es recomendada (terrenos inestables)		×	×	✓

Nota. Presentado por (Ballard et al., 2015)

Tasa de infiltración en la superficie porosa

La tasa de infiltración superficial debe ser mayor que la intensidad de lluvia de diseño, esto evitará el encharcamiento de las aguas superficiales y el cálculo de la tasa de flujo de entrada debe incluir toda la escorrentía anticipada de áreas adyacentes, para encontrar la tasa de infiltración es necesario determinar la intensidad de un evento de lluvia para un periodo de retorno requerido.

A partir de los registros pluviográficos denominados pluviogramas o diagramas de precipitación acumulada a lo largo del tiempo se calcula la intensidad de precipitación correspondiendo a 24 horas de registro continuo y a una altura equivalente a 10 mm de precipitación (INAMHI, 2012).

Para la obtención de la intensidad de precipitación se utilizará la ecuación planteada por Aparicio (1994):

$$I_{TR} = \frac{k \times Id_{TR}}{t^n} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- I_{TR} = Intensidad de precipitación para cualquier periodo de retorno en mm/h.
- Id_{TR} = Intensidad diaria para un periodo de retorno dado en mm/h.
- TR = Período de retorno.
- t = Tiempo de duración de la lluvia en minutos.
- k, m, n = Constantes de ajuste determinado aplicando mínimos cuadrados.

Profundidad máxima de almacenamiento

Según Woods-Ballard et al; (2007), el diseño del sistema de infiltración para un evento de lluvia particular se relaciona con la máxima profundidad de agua que debe ser almacenada por un pavimento asfáltico poroso, se asegura que la lluvia infiltrará a través de la superficie debido a las características de los materiales que la componen.

La máxima profundidad de agua se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{\max} = \frac{d}{n} \times [R \times (I - k)] \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- H máx. = Profundidad máxima de agua que puede ser almacenada en el pavimento poroso.
- d, I = Duración e intensidad de lluvias con el periodo de retorno requerido en la ubicación del sitio (h, m/h).

- R = Relación entre el área de drenaje y la zona de infiltración, R 1 para pavimentos porosos.
- n = Porosidad de la mezcla (volumen de vacíos/volumen total).
- k = Coeficiente de infiltración del suelo (m/h).

Para el valor de k, se tomará de la siguiente tabla.

Tabla 17

Valores relativos de permeabilidad

Permeabilidad relativa	Valores de K (cm/s)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 \times 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	1×10^{-1} a 1×10^{-3}	Arena, arena fina
Poco permeable	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	1×10^{-5} a 1×10^{-7}	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 \times 10^{-7}$	Arcilla

Nota: Presentado por (Terzaghi y Peck,1980) y citado por (Chávez Villalva, 2017)

Salida de la estructura del pavimento

Para que el almacenamiento en la base o subbase funcione de manera efectiva, el sistema requiere controles de flujo para evitar riesgo de construcción inapropiada e inundaciones potenciales, para el cálculo del sistema de drenaje se usó la siguiente ecuación de Cedergren (1974):

$$q = 2 \times C \times I \quad \text{Ec. 12}$$

$$q = k \times \frac{h}{b} \times 2 \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

- q = Intensidad máxima de lluvia (m/s).
- k = Coeficiente de permeabilidad de la subrasante (m/s).

- h = Profundidad máxima de agua almacenada en la base o subbase (m).
- $2b$ = Distancia entre las tuberías (m).
- I = Intensidad de lluvias con el periodo de retorno requerido en la ubicación del sitio (mm/h).
- C = Relación de infiltración, (0,33 – 0,50) para pavimentos asfáltico.

Para el cálculo de la capacidad de flujo de la subbase se usó el Método Racional, detallado en la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{c \times I \times A}{360} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

- Q = Capacidad de flujo de la subbase (m³/s).
- I = Intensidad de la lluvia de diseño (mm/h).
- A = Área de diseño (Ha).
- c = Coeficiente de escorrentía

Para el coeficiente de escorrentía se obtendrá de la siguiente tabla.

Tabla 18

Valores de reseña para el coeficiente de escorrentía (c) en diversos tipos de superficies

Tipos de Superficie	C
Cubierta metálica o teja vidriada.	0.95
Cubierta con teja ordinaria o impermeabilizada.	0.9
Pavimentos asfálticos en buenas condiciones	0.85-0.9
Pavimentos de hormigón.	0.8-0.85
Empedrados (juntas pequeñas).	0.75-0.8
Empedrados (juntas ordinarias).	0.4-0.5
Pavimentos de macadam.	0.25-0.6
Superficies no pavimentadas.	0.1-0.3
Parques y jardines.	0.05-0.25

Nota: Presentado por (Chow, 1988) y citado por (Oficina Regional de Ciencia, 2013)

Pavimentos fotocatalíticos

Contaminación de naturaleza química

Los contaminantes del aire son los causantes de daños al medio ambiente y a la salud humana. La alta demanda de vehículos, la generación de energía y la combustión de calefacción del espacio, son contaminantes principales que además de permanecer en los alrededores de sus fuentes originarias, estos pueden viajar distancias largas produciendo contaminantes secundarios por medio de reacciones químicas, por ejemplo la lluvia ácida (Katzman, 2006).

Para dar solución a la contaminación del aire, se debe realizar un tratamiento a los contaminadores más cercanos desde su fuente de generación, los materiales fotocatalíticos en su actualidad, son añadidos a las capas superficiales de pavimentos, fachadas y a materiales de construcción que, al cambiarse con la radiación solar, dichos contaminantes realizan el proceso de oxidación y desalojados de la superficie por la lluvia (M. Chen & Liu, 2010).

Óxidos de nitrógeno

Entre el grupo de los óxidos de nitrógeno (NO_x) abarca el monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno, en la atmósfera exclusivamente puede ser descubierta el monóxido de dinitrógeno (N₂O), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), ya que los demás gases son inestables, se descomponen y transformándose en cualquiera de los anteriores (Orozco Barrenetxea et al., 2003).

Dichos gases cumplen ciertas características y diferentes comportamientos, por ejemplo, el N₂O es un gas no tóxico, incoloro que no interfiere en procesos fotoquímicos, el NO es un gas tóxico e incoloro que interfiere en procesos fotoquímicos, produciendo

un equilibrio de interconversión entre NO y NO₂, por otro lado el NO₂ es un gas toxico de color pardo-rojizo, que interfiere en procesos fotoquímicos (Skalska et al., 2010).

Este tipo de gases se encuentra en gran cantidad, dando lugar a la formación de contaminantes secundarios que son peligrosos, como por ejemplo el ozono (O₃) es un gas incoloro que arroja fuertes olores destruyendo la capa de ozono y el ácido nítrico (HNO₃) es un componente de la lluvia acida de color amarillento, todo esto a altas concentraciones producen daños a la salud y la vegetación (Wang & Mauzerall, 2004).

Proceso de Oxidación avanzada (POA)

Los POA's son procesos fisicoquímicos que producen cambios en la estructura química de los contaminantes, generándolos mediante un proceso fotoquímico adicionado la luz solar o por otro tipo de energía, que son usados en la oxidación de la materia orgánica (Terán Solíz, 2016).

Tabla 19

Clasificación de los distintos Procesos de Oxidación Avanzada

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización	Ultravioleta de vacío
Ozonización con O ₃ / H ₂ O ₂	UV/ H ₂ O ₂
Procesos fenton Fe+2/ H ₂ O ₂	UV/O ₃
Oxidación electroquímica	UV/ O ₃ / H ₂ O ₂
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones.	Fotocatálisis solar Homogénea: foto-fenton y relaciones Heterogénea: fotocatalisis con TiO ₂
Plasma no térmico. Oxidación en agua subcrítica y supercrítica.	
Irradiaciones gamma.	

Nota. Presentado por (Terán Solíz, 2016)

En el grupo de los POA's se encuentra la fotocatalisis heterogénea que es producido por la reacción catalítica en donde se involucra la absorción directa o indirecta

de energía ultravioleta por medio de un sustrato o fotocatalizador, este tipo de proceso tiene mucho interés en la parte investigativa, ya que emplea los rayos del sol y no necesita ningún tipo de reactivo químico que se pueda adicionar (Terán Solíz, 2016).

Fotocatálisis Heterogénea

La fotocatalisis es el procedimiento con el cual un compuesto o sustancia es activada químicamente por medio de los rayos (UV) que resulta una reacción de oxidación-reducción, este proceso es idéntico a la fotosíntesis en las plantas (Ohama & Van Gemert, 2011).

Por medio de la fotocatalisis heterogénea, los gases contaminantes que están presentes en el aire como el NO_x, CO, SO_x, compuestos orgánicos volátiles y clorados, se transforman en nitratos y nitritos inofensivos que son desalojados por medio de la lluvia (Maury Ramirez & De Belie, 2010).

Dióxido de titanio – TiO₂

El TiO₂ es un óxido metálico que se localiza en 3 formas cristalográficas como anatasa, brookita y rutilo, siendo el rutilo la forma más estable termodinámicamente, a diferencia, de la anatasa que presenta mayor efectividad fotocatalítica (Maury Ramirez & De Belie, 2010).

Tabla 20

Propiedades físicas del Dióxido de Titanio (TiO₂)

PROPIEDAD	RUTILO	ANATASA	BROOKITA
Peso molecular (g/mol)	79,89	79,89	79,89
Sistema cristalino	Tetragonal	Tetragonal	Ortorrómico
Volumen	62,07	136,25	257,38
Volumen molar (m ³ /mol)	18693	20156	19377
Densidad (kg/m ³)	4274	3895	4123

Fuente: Presentado por (Rodríguez García, 2012)

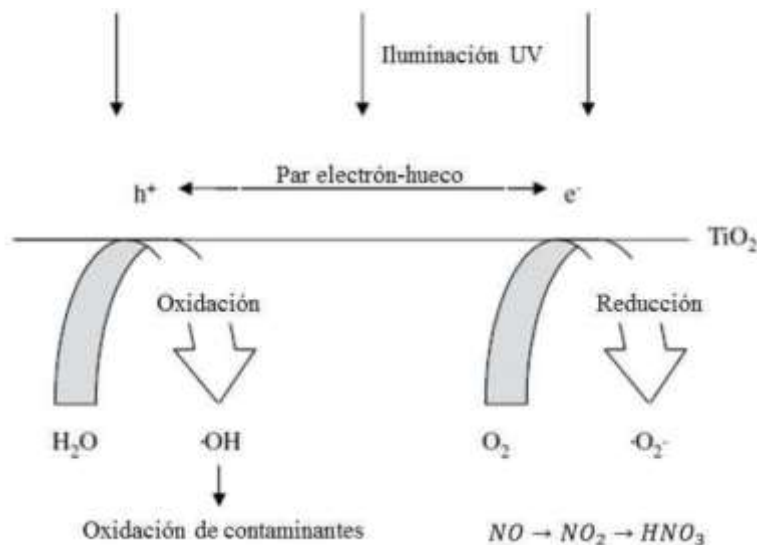
Este compuesto son empleados para la descomposición fotocatalítica de los contaminantes del aire, generación de biosensores, purificación del agua, ya que, el material presenta una estabilidad química grande, no es toxico y de bajo presupuesto (Ma et al., 2014).

Fotocatálisis del dióxido de titanio

Siendo el TiO_2 el catalizador, se genera el proceso de fotocatalisis cuando la energía solar se convierte en energía química, produciendo una foto-excitación en los electrones ubicados en la banda de valencia del catalizador, este cambio hace que el electro se transporte hacia la banda de conducción del TiO_2 , donde no hay electrones, el hueco generado por el electrón en la banda de valencia, al reaccionar con moléculas donantes (H_2O), produce un radical hidroxilo, cuando el oxígeno reacciona con los electrones se produce un radical súper óxido.

Figura 20

Mecanismo de oxidación de NO a través de TiO_2



Fuente: Presentado por (J. Chen & Poon, 2009)

Dado que durante este proceso se generan reacciones de oxidación y reducción se genera la eliminación de agentes contaminantes. Proceso mediante el cual estos dos agentes (hidroxilo y súper oxido) han demostrado su capacidad para remover agentes contaminantes orgánicos y otros inorgánicos, como se puede apreciar en la Figura 20 (Maury Ramirez & De Belie, 2010).

Aplicación en materiales de construcción

En el inicio de la década de los 80, comenzó la aplicación de nanopartículas fotocatalíticas de TiO_2 en materiales de construcción, de ahí en adelante ha surgido investigaciones de dos efectos derivados de la actividad fotocatalítica de recubrimientos basados en TiO_2 , el efecto de descontaminación del aire que producen los gases efecto invernadero y el efecto de autolimpieza (Lisbona Garcia, 2016).

El pavimento, al adicionarle el dióxido de titanio obtiene propiedades fotocatalíticas, logrando contribuir a la eliminación de contaminantes emitidos por el tráfico rodado gracias a su proceso de oxidación y descomposición, también ayuda a disminuir la capacidad de calentamiento en la superficie del pavimento, lo que lograría ciudades más frescas (Segura Montoya & Camelo Manzanares, 2019).

A continuación, se exponen las tecnologías de pavimentos asfálticos fotocatalíticos, ampliamente estudiadas por ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas) (Faraldos et al., 2012):

Capas de rodadura, a partir del empleo de mezclas bituminosas drenantes como soporte y percolación de lechadas especiales:

Este tipo de pavimentos tiene dos fases de preparación. En su primera fase es colocada una mezcla asfáltica porosa de espesor de 4 centímetros de espesor con una proporción de vacíos entre el 20 y el 25%. En su segunda fase se percola sobre la mezcla

asfáltica una lechada especial, a partir de dióxido de titanio, cemento, agua, carga mineral y fibras, con objeto de rellenar los huecos de la mezcla asfáltica.

Empleo de sprays (pulverizados) sobre superficies de rodadura existentes:

Los pavimentos existentes una vez pulverizados con spray, a partir de compuestos fotocatalíticos, a diferencia de la anterior tecnología, no requieren ninguna modificación en la estructura del firme, produciendo una reducción en costos.

Esta tecnología permite la aplicación del producto fotocatalítico directamente en el pavimento existente y/o sobre cualquier otra superficie al margen de la capa de rodadura, este tipo de sprays con propiedades fotocatalíticas presentan propiedades de adhesividad con el soporte y de durabilidad para resistir el desgaste debido a las cargas de tráfico y a los fenómenos meteorológicos.

Efectos del TiO₂ en los pavimentos

Efecto Autolimpiable

La propiedad de autolimpieza depende totalmente de la eficiencia de oxidación de las moléculas orgánicas, las cuales retienen muchas partículas atmosféricas y polvos, esto se logra mediante las reacciones redox de los radicales de oxígeno basados en los rayos UV producidos en la superficie del fotocatalizador TiO₂, para la formación de los radicales OH se requiere de agua y oxígeno los cuales son proporcionados por la misma atmósfera, mientras que la radiación UV es necesaria para activar el TiO₂ la cual se encuentra contenida en la luz solar que llega a la superficie de la Tierra (M. Chen & Liu, 2010).

Por lo tanto, el efecto de autolimpieza no es más que la eliminación de los componentes que manchan el pavimento asfáltico que usualmente son elementos orgánicos pigmentados (hidrocarburos o ácidos grasos) e inorgánicos (polvo simple o

partículas sólidas inorgánicas), actuando los primeros como el adhesivo que fijan a los segundos, la fotocatalisis elimina los componentes orgánicos descomponiéndolos en agua y dióxido de carbono, en cuanto a los inorgánicos son disueltos y eliminados por el agua empleada para lavar dicha superficie (lluvia) (Abella Rodríguez, 2015).

Efecto de descontaminación

Al hablar de la descontaminación del aire que proporcionan los pavimentos asfálticos que contienen TiO_2 , no es más que la capacidad de medir la contaminación a través de la oxidación fotocatalítica de los NO_x en nitratos. Los NO_x son responsables de la niebla tóxica fotoquímica y junto con los óxidos de azufre (SO_x) generan las lluvias ácidas, los cuales ocasionan problemas respiratorios a las personas y daños en la vegetación.

En química atmosférica el término NO_x (ex-óxido de nitrógeno) es empleado para indicar la suma de los NO y los dióxidos de nitrógenos NO_2 , donde los NO provienen directamente de fuentes contaminantes (combustión de hidrocarburos) que al introducirse en la atmósfera terrestre reaccionan con el ozono (O_3) y se transforman en NO_2 (Wiesner et al., 2009).

El proceso fotocatalítico que se lleva a cabo sobre la superficie de los pavimentos asfálticos fabricados con TiO_2 , dan inicio a reacciones de óxido-reducción que transforman los óxidos de nitrógenos en sales solubles de nitrato de calcio los cuales son fácilmente eliminados por el agua de lluvia en cuanto los compuestos orgánicos volátiles se transforman en dióxido de carbono y agua (Abella Rodríguez, 2015).

Capítulo III:

Caracterización de los agregados, material bituminoso y dióxido de titanio

Descripción General

Para realizar el diseño de una mezcla asfáltica drenante, se debe elaborar el mismo procedimiento de una mezcla asfáltica densa, ya que es similar su diseño. Los materiales requeridos para los distintos ensayos son los siguientes: agregados pétreos y asfalto, una de las diferencias que se debe considerar es que, la mezcla asfáltica drenante tiene un índice alto de vacíos en comparación con la mezcla tradicional.

Este capítulo se realizó la caracterización del agregado pétreo (grosso y fino), material bituminoso y del dióxido de titanio que se utilizó para diseñar la mezcla asfáltica; cabe mencionar que el país no cuenta con una norma sobre el diseño y evaluación del comportamiento de la mezcla asfáltica drenante, por lo tanto, se utilizó la normativa INVIAS.

Además, se explica también de forma breve cada ensayo que se va a realizar para el agregado pétreo, asfalto y dióxido de titanio, utilizando las normas AASHTO, ASTM e INEN, dando así, un enfoque amplio sobre el diseño de la mezcla asfáltica drenante.

Ensayos para los agregados pétreos

En el Capítulo 2, se dio a conocer las especificaciones que debe cumplir el agregado pétreo que se utilizó para el diseño de la mezcla asfáltica drenante, el cual fue de un agregado procesado de tamaño máximo nominal 3/4".

Los ensayos realizados para cada proporción de agregado que se utilizó en la mezcla asfáltica drenante fueron:

- Análisis granulométrico de áridos finos y gruesos.

- Equivalente de arena.
- Desgaste en máquina de los Ángeles, abrasión.
- Gravedad específica y absorción del agregado grueso.
- Gravedad específica y absorción del agregado fino.

Análisis granulométrico de áridos finos y gruesos (INEN 696) / (ASTM C136)

La función de este ensayo dio a conocer la gradación de materiales que fueron usados como agregados, con el cual, se determinó la distribución de las partículas según los tamaños y proporcionó los datos necesarios para el control de la producción de las mezclas asfálticas.

Equipos y materiales

- Horno de temperatura uniforme $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ($230\text{ °F} \pm 9\text{ °F}$).
- Tamices de malla cuadrada.
- Agitador eléctrico de tamices.
- Balanza de precisión de 0,1 gr.
- Bandejas y taras.

Procedimiento

Una cantidad de muestra de agregado grueso seco fue separada, según como lo indica la especificación que está detallada en la siguiente tabla.

Tabla 21

Cantidad de muestra para ensayo granulométrico

Tamaño máximo nominal, aberturas cuadradas		Tamaño de la muestra de ensayo mínimo	
Mm	Pulg	Kg	Lb
9,5	$\frac{3}{8}$	1	2
12,5	$\frac{1}{2}$	2	4
19,0	$\frac{3}{4}$	5	11
25,0	1	10	22
37,5	1 $\frac{1}{2}$	15	33
50	2	20	44
63	2 $\frac{1}{2}$	35	77
75	3	60	130
90	3 $\frac{1}{2}$	100	220
100	4	150	330
125	5	300	660

Nota: Elaborado por (ASTM C136, 2006)

Se deben seleccionar los tamices necesarios, cada uno con sus aberturas adecuadas y hacer que pasen las muestras por cada uno de estos, cada tamaño de la muestra de ensayo debe ser secado previamente para obtener la información necesaria y formar la curva granulométrica de diseño:

- ♦ Para el agregado 3/4" se pesó 5 kg de muestra.
- ♦ Para el agregado 1/2" se pesó 2 kg de muestra.
- ♦ Para el agregado fino se pesó 400 gr de muestra.

Los tamices con la muestra se colocaron en el agitador mecánico por un periodo de 2 minutos y/o hasta que la cantidad de agregado pétreo pasante entre tamices no supere el 1%.

Por último, se pesó las cantidades que son retenidas en cada tamiz y se procedió a realizar la curva granulométrica respectiva. Con los datos obtenidos, se elaboraron y determinaron las curvas características de cada tamaño de agregado.

Resultado

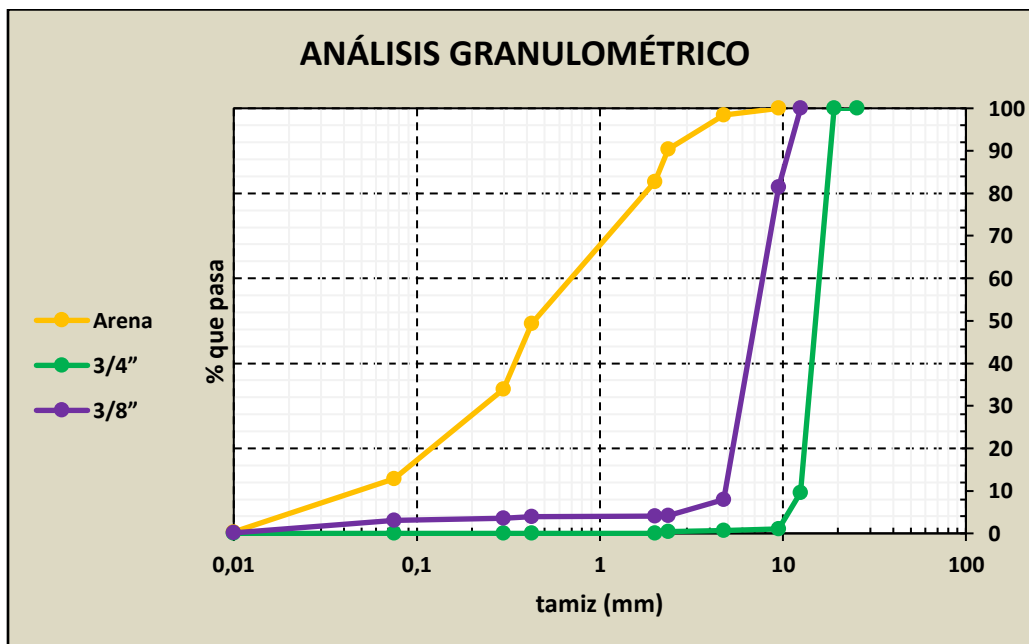
Tabla 22

Granulometría de agregado de 3/4", 3/8" y arena

Tamices		% que pasa		
		Grava		Finos
mm	Plg	3/4"	3/8"	Arena
76,1	3	100	100	100
51,8	2	100	100	100
38,1	1 1/2	100	100	100
25,4	1	100	100	100
19,0	3/4	100	100	100
12,5	1/2	9,54	100	100
9,51	3/8	1,03	81,46	100
4,76	#4	0,64	7,95	98,37
2,36	#8	0,41	4,14	90,39
2	#10	0	4,08	82,72
0,425	#30	0	3,93	49,41
0,297	#50	0	3,59	33,98
0,075	#200	0	3,04	12,85
0,01	< #200	0	0,12	0,35

Figura 21

Granulometría de los agregados pétreos de 3/4", 3/8" y arena



En la normativa MOP-001-F (2002) existen 3 tipos de agregados A, B, C. Los agregados extraídos de la Constructora Terán están en la clasificación A, donde el agregado debe presentar las siguientes características: fragmentados sólidos, resistentes y limpios, libres de polvo, arcilla u otro tipo de material extraño.

Equivalente de arena (INV E-133) / (ASTM D2419, 2014)

La función del ensayo es obtener un valor empírico a la cantidad de material fino presente en la muestra, el ensayo permitió determinar de forma rápida y durante su producción o colocación las variaciones de la calidad del agregado.

Se realizó tres veces el ensayo para obtener valores promedios de los resultados.

Equipos y materiales

- Probetas graduadas de dimensiones: 30 ± 1 mm de diámetro interior y 400 mm de alto aproximadamente.
- Agregado fino, pasante del tamiz #4
- Tapón macizo de caucho o de goma
- Tubo flexible de plástico
- Tubo irrigador
- Recipiente metálico
- Embudo de boca ancha
- Agua
- Cronometro
- Reactivo (Cloruro de calcio)

Procedimiento

Se debe obtener por lo mínimo, 1500 gr de muestra que pasa por el tamiz #4 (4,75 mm), tomando en cuenta que la muestra sea lo más uniforme. Verter la muestra junto con el agua y el cloruro de calcio en la probeta hasta que llegue a una altura de $100 \text{ mm} \pm 2,54 \text{ mm}$.

Tomar una porción de muestra con el recipiente metálico de 50 gr. de capacidad y enrasar, seguidamente se vierte en la probeta con la ayuda de un embudo, golpeando los bordes inferiores de la probeta con la palma de la mano con el fin de liberar el aire de su interior y dejar reposar por alrededor de 10 minutos.

Tapar la probeta con un tapón de caucho, agitar 100 ciclos manualmente la probeta en posición horizontal con un desplazamiento de $230 \pm 25 \text{ mm}$ durante 1 minuto, desprendiendo la arena de fondo.

Se debe lavar las paredes de la probeta para que las partículas que se encuentran adheridas se deslicen hasta la parte inferior produciendo la decantación, dejar reposar por $20 \text{ minutos} \pm 15 \text{ segundos}$ seguidamente tomar la medida de la parte superior de la arcilla.

Para finalizar, se introduce dentro de la probeta la varilla con el disco y el sobrepeso, dejándola caer con mucho cuidado hasta que llegue sobre la arena y anotar la lectura de la ranura del tornillo.

Ecuación y Resultados

La norma INV E-133 (2013), presenta las siguientes formulas para el cálculo de la equivalencia de arena.

$$C = A - B$$

Ec. 15

$$D = \left(\frac{C}{A} \right) \times 100$$

Ec. 16

Donde:

- A = Lectura de arena
- B = Lectura de arcilla
- C = Nivel de arcilla
- D = Equivalente de arena

Tabla 23*Cálculo de equivalente de arena*

Simbología	Descripción	Valor		
A	Lectura de arena (plg)	12,50	12,40	12,70
B	Lectura de arcilla (plg)	3,29	3,20	3,47
C	Nivel de arcilla (plg)	9,21	9,20	9,23
D	Equivalente de arena	73,680	74,194	72,677
	Promedio		73,52	

Desgaste en la máquina de los Ángeles, abrasión (INEN-860) (ASTM-C131)

La función de este ensayo permitió determinar el valor de la pérdida de masa de los agregados grueso de tamaño menor a 37,5 mm, al hacer una combinación entre el desgaste, el impacto y el quebrantamiento dentro del tambor donde se encuentran un determinado número de esferas de acero.

Equipos y materiales

- Agregado grueso de 3/4" y 3/8"
- Balanza con precisión de ± 0,1 gr.

- Horno con temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Esferas de diámetro de 46,38 mm y peso 390 gr.
- Tamices
- Máquina de los Ángeles
- Bandejas

Procedimiento

El agregado debe estar previamente lavado y secado al horno a una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, con el fin de impedir la presencia de agregado fino que pueda afectar con la precisión del ensayo y mantener el peso del agregado constante.

La cantidad de muestra para los tamaños máximos nominales de los agregados de 3/4" y 3/8" que se utilizará en el ensayo se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 24

Gradación de las muestras de ensayo

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm) (aberturas cuadradas)		Masa por tamaños indicada (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	---	---	---
25,0	19,0	1 250 ± 25	---	---	---
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
9,5	6,3	---	---	2 500 ± 10	---
6,3	4,75	---	---	2 500 ± 10	---
4,75	2,36	---	---	---	5 000 ± 10
	Total	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Nota: Presentado por (ASTM C131, 2006)

Tomando las consideraciones de la Tabla 22, se determinó el número de esferas que se utilizó en la máquina de los Ángeles.

Tabla 25

Número de esferas de acuerdo a su degradación

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Nota: Presentado por (ASTM C131, 2006)

Se colocan las esferas en el interior de la máquina de los ángeles seguidamente de la muestra fría y procede hacer girar el cilindro a una velocidad entre 188 y 208 rad/min (30 y 33 rpm) completando las 500 revoluciones.

Se retira la muestra de la máquina de los Ángeles, se descarga el material y se procede a separar la muestra a través del tamiz No.12, se rechaza el material que pasa por este tamiz y el material retenido se lava y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener una masa constante y se anota el peso registrado.

Ecuación y Resultados

La norma INEN 860 (2011), presenta la ecuación para cálculo del porcentaje de desgaste de los agregado grueso:

$$C = A - B \quad \text{Ec. 17}$$

$$D = \left(\frac{C}{A} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

- A = Peso del agregado antes del ensayo.
- B = Peso del agregado que no se desgastó después del ensayo.
- C = Perdida por desgaste del agregado.

- D = Desgaste del agregado.

Tabla 26

Cálculo del desgaste de agregado grueso

Simbología	Descripción	Valor
A	Peso del agregado del ensayo (gr)	5000,00
B	Peso del agregado no desgastado después del ensayo (gr)	3449,52
C	Perdida por desgaste del agregado (gr)	1550,48
D	Desgaste del agregado (%)	31,01 %

Gravedad específica y absorción para agregados finos (INEN 856)

Este ensayo tiene como función, determinar la densidad de una porción sólida y representar el valor promedio de la muestra. El valor de absorción se utilizó para la determinación de los cambios de peso del agregado fino, en consecuencia, a la cantidad de agua absorbida por los poros de dicho agregado.

El peso específico aparente es la relación que existe entre el peso al aire de un sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente. La finalidad de este ensayo fue obtener la densidad de una cantidad de material sólido y representarlo mediante un valor.

Equipos y Materiales

- Agregado fino
- Balanza con precisión de $\pm 0,1$ gr
- Horno con temperatura constante de 110 ± 5 °C
- Recipientes metálicos

- Dispositivo de suspensión
- Tamices
- Bandejas
- Picnómetro o matraz aforado

Procedimiento

Se toma una cantidad de agregado fino de 1,2 kg aproximadamente, el 50% del agregado (500 ± 10 gr) se utilizará para la determinación de la absorción del agregado. El agregado es lavado de cualquier impureza que pueda existir y se seca en el horno a una temperatura constante de 110 ± 5 °C hasta que su valor sea constante.

La cantidad de agregado debidamente fría, se la sumerge en agua durante 24 ± 4 horas a temperatura ambiente. Una vez terminado el tiempo se escurre el agua (tener cuidado en que no se pierda el material más fino) y se deja secar al ambiente (recomendable un lugar que llegue directamente el sol), se debe agitar y controlar constantemente para que se seque uniformemente.

Para la determinación de la densidad del agregado se utilizó el método gravimétrico el cual se utiliza la mitad sobrante del material (500 ± 10 gr) y se la introduce en el picnómetro, seguidamente, se añade agua hasta aproximadamente un 90% de su capacidad y se somete a una bomba de vacíos alrededor de 10 minutos o hasta que no salga el aire, con el fin de desintegrar las burbujas de aire.

Por último, se desaloja todo el agregado del picnómetro con el mayor cuidado para no perder nada del material, se seca al horno a una temperatura constante de 110 ± 5 °C hasta obtener un peso constante.

Ecuación y Resultados

La norma INEN 856 (2010), da a conocer las fórmulas para el cálculo de la gravedad específica (densidad relativa) y el porcentaje de absorción del agregado fino:

- ♦ Gravedad específica seca al horno (SH).

$$SH = \frac{A}{(B + S - C)} \quad \text{Ec. 19}$$

- ♦ Gravedad específica saturada superficialmente seca (SSS).

$$SSS = \frac{S}{(B + S - C)} \quad \text{Ec. 20}$$

- ♦ Gravedad específica aparente.

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(B + A - C)} \quad \text{Ec. 21}$$

- ♦ Porcentaje de absorción.

$$\text{Absorción, \%} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

- A = Peso del agregado seco al horno.
- B = Peso del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración.
- C = Peso del picnómetro lleno con agregado y agua, hasta la marca de calibración.
- S = Peso de la muestra superficialmente seca.

Tabla 27*Gravedad específica del agregado fino*

Simbología	Descripción	Valor
A	Peso del agregado secado al horno (gr)	478,50
B	Peso del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración (gr)	1216,00
C	Peso del picnómetro lleno con agregado y agua, hasta la marca de calibración (gr)	1514,40
S	Peso del agregado superficialmente seco (gr)	500,10
SH	Gravedad específica Bulk	2,372
SSS	Gravedad específica saturada	2,479
Gravedad específica aparente		2,657
Absorción (%)		4,51 %

Gravedad específica y absorción para agregados gruesos (INEN 857)

Este ensayo permitió determinar la densidad relativa y la absorción de una porción sólida de agregado grueso particulares de la muestra de diseño.

Se determinó los pesos específicos aparente y nominal, el porcentaje de absorción del agregado con partículas de tamaño igual o mayor a 4,75 mm (Tamiz No.4), los cuales fueron sumergidos por 24 horas en agua. En la Tabla 28 se muestra las cantidades mínimas para realizar el ensayo según el tamaño máximo nominal del agregado pétreo.

Tabla 28*Cantidad de muestra necesaria*

Tamaño máximo nominal, mm (pulg)	Masa mínima de la muestra de prueba, kg (lb)
12.5 (1/2) o menos	2 (4.4)
19.0 (3/4)	3 (6.6)
25.0 (1)	4 (8.8)
37.5 (1 1/2)	5 (11)
50 (2)	8 (18)
63 (2 1/2)	12 (26)
75 (3)	18 (40)
90 (3 1/2)	25 (55)
100 (4)	40 (88)
125 (5)	75 (165)

*Nota: Presentado por (ASTM C127, 2001)***Equipos y Materiales**

- Agregado grueso de 3/4" y 3/8".
- Balanza con precisión de $\pm 0,1$ gr.
- Horno con temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Dispositivo de suspensión.
- Tamices
- Bandejas
- Canastilla metálica con abertura de 4,75 mm.
- Tanque de inmersión con apreciación de $\pm 0,1$ gr.

Procedimiento

Al tener la cantidad de 2 kg o mayor de agregado grueso, pasarlo por el tamiz No.4 para separar cierta cantidad de agregado fino que pueda contener en el recipiente.

Se lava el agregado para liberar de las impurezas que pueda existir y se seca en el horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que la masa sea constante.

Una vez que la muestra esté completamente fría, debe ser sumergida en el agua por un periodo de 24 ± 4 horas a temperatura ambiente, al haber pasado el tiempo necesario, se procede a escurrir toda el agua y de manera superficial también con la ayuda de un paño absorbente. Una vez se pesa la muestra en estado superficial saturada seca, consiguiendo la cantidad mínima de 2 kg.

Para el ensayo se tomó dos muestras de agregado, de $3/4''$ y $3/8''$, las cuales fueron colocadas en el interior de la canastilla metálica por 15 minutos aproximadamente, esperando que se estabilice el valor y se toma el peso sumergido en agua a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ en el tanque de inmersión.

Ecuaciones y Resultados

La norma INEN 857 (2010), despliega las siguientes fórmulas para el cálculo de la gravedad específica (densidad relativa) y el porcentaje de absorción del agregado grueso.

- ♦ Gravedad específica.

$$SH = \frac{A}{(B - C)} \quad \text{Ec. 23}$$

- ♦ Gravedad específica saturada superficialmente seca (SSS).

$$SSS = \frac{B}{(B - C)} \quad \text{Ec. 24}$$

- ♦ Gravedad específica aparente.

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(A - C)} \quad \text{Ec. 25}$$

- ♦ Porcentaje de absorción.

$$\text{Absorción, \%} = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Ec. 26

Donde:

- A = Peso del agregado seco al horno.
- B = Peso del agregado superficialmente seco.
- C = Peso del agregado sumergido.

Tabla 29

Gravedad específica del agregado grueso

Simbología	Descripción	Valor
A	Peso del agregado secado al horno (gr)	2030,00
B	Peso del agregado superficialmente seco (gr)	2103,60
C	Peso del agregado sumergido (gr)	1264,20
SH	Gravedad específica Bulk	2,418
SSS	Gravedad específica saturada	2,506
	Gravedad específica aparente	2,651
	Absorción (%)	3,63 %

Ensayos en el asfalto

En Ecuador, el MTOP (Ministerio de Transporte y Obras Públicas) es encargada de realizar las especificaciones técnicas del ligante asfáltico que se usan en las mezclas asfálticas, los cuales determinan los requisitos que deben cumplir los asfaltos y productos asfálticos que se aplican en los trabajos de pavimentación.

En el país se produce el asfalto tipo AC-20 y sus especificaciones técnicas son requerimientos de calidad que se establecen mediante procedimientos estipulados que servirán para la evaluación de las propiedades requeridas y el comportamiento del asfalto.

Para determinar el asfalto se realizaron los siguientes ensayos:

- Ductilidad (cm).
- Gravedad específica.
- Punto de inflamación (°C).
- Punto de reblandecimiento.
- Penetración, 25°C, 100g, 5seg (1/10mm).

Penetración (INEN-917) / (ASTM D5)

El ensayo tiene como función obtener la consistencia del asfalto, el cual es expresada por la distancia vertical que atraviesa una aguja normada, que cae libremente sobre la muestra calentada previamente en baño maría a una temperatura determinada.

El ensayo se realizó a una temperatura de 25°C, con una carga de 100 gr durante 5 segundos. Mientras más blando es, mayor será la penetración.

Equipos y Materiales

- Asfalto tipo AC-20.
- Horno con temperatura constante.
- Penetrómetro para asfalto.
- Aguja de penetración, vástago y peso.
- Recipientes metálicos cilíndricos de fondo plano (diámetro de 55 mm, altura de 35 mm).

- Termómetro
- Contador eléctrico
- Máquina para baño maría

Procedimiento

Se calienta el asfalto en el horno con una temperatura constante de 140°C sin excederla y así no cambie las propiedades y características del mismo.

El asfalto precalentado, se vierte en los recipientes con precaución que no ingrese burbujas de aire, hasta una altura que no se desborde y se deja enfriar la muestra alrededor de hora y media a temperatura ambiente.

La máquina para el baño maría debe ser precalentada a una temperatura de 25 °C, la muestra debidamente enfriada es introducida al baño maría hasta que adquiera la temperatura de 25 °C por un tiempo de 60 a 90 minutos, se saca la misma del baño dentro de un recipiente con agua que contenga la temperatura y proceder a realizar el ensayo.

Se coloca la muestra en el equipo, se precisa la aguja y la carga de 50 gr, todo en conjunto suma 100 gramos.

La aguja debe ser ajustada hasta que toque la superficie de la muestra sin penetrarla y se encera el indicador de lectura y se aplica la carga en un tiempo de 5 segundos. Para finalizar, se toma el valor de la distancia que está expresada en decimas de milímetros en el equipo.

Es de suma importancia realizar por lo menos 3 penetraciones por cada muestra, en distintos puntos de la superficie con una distancia de punto a punto de 10 mm uno del otro, se debe evitar realizar penetraciones en el centro de la muestra. El dato final será el promedio de los valores cercanos conseguidos.

Resultados

Tabla 30

Resultados del ensayo de penetración en el asfalto

Lectura	Muestra	
mm/10	P1	P2
1	71	69
2	68	64
3	65	65
4	66	64
5	65	66
6	64	70
7	69	65
8	67	68
Promedio	66,88	66,38
Total	66,63	

Punto de reblandecimiento (INEN 920) / (ASTM D36)

El ensayo permitió determinar de manera indirecta la consistencia y la temperatura de viscosidad del asfalto en condiciones específicas. Al incrementar la temperatura gradualmente, el asfalto tiende a ser más blando y menos viscoso. Este método es utilizado para materiales bituminosos donde su punto de reblandecimiento oscile entre temperaturas de 30 a 200 °C.

Equipos y Materiales

- Asfalto AC-20 con aditivo.
- Mechero de gas y soporte.
- Horno con temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Hielo
- Agua

- Dos anillos de bronce
- Guías de centrado
- Matraz de precipitado de 1000 ml
- Base de montaje para anillos de bronce
- Esferas metálicas con un peso de 3,50 gr
- Termómetro

Procedimiento

Calentar las muestras de asfalto en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, hasta que esté fluido para verter dentro del anillo de bronce con un ligero exceso, es de suma importancia que el anillo de bronce debe tener una capa de aceite para evitar la adherencia del asfalto, los mismos que fueron anticipadamente calentados a la misma temperatura del asfalto, se deja enfriar por al menos 30 minutos a temperatura ambiente.

Se monta el equipo, colocando los anillos con el asfalto y las guías con las esferas sobre los anillos dentro del matraz de vidrio, seguidamente debe ser llenada el matraz con agua destilada a una altura entre los 101,6 a 108 mm con una temperatura estable de 5 ± 2 °C, (utilizar hielo de ser necesario) y mantenerlo por un periodo de 15 minutos.

Se calienta el matraz de vidrio que contiene las muestras con un mechero, hasta que la temperatura se eleve de manera gradual en 5 °C/minuto. El valor marcado por el termómetro deberá irse anotando en el momento que cada esfera rodeada de asfalto toca el fono de la placa de bronce

Resultados

Tabla 31

Toma de temperatura a las muestras de asfalto

Esfera de acero	Temperatura (°C)
#1	48,90
#2	49,20
Promedio	49,05

Índice de penetración (INV E-724)

Con el resultado obtenido del ensayo de penetración y del punto de reblandecimiento, se procede a calcular el índice de penetración, el cual indica la susceptibilidad del asfalto a una temperatura determinada e identifica el comportamiento del mismo.

Ecuaciones y resultados

La norma INV E-724 (2013), presenta las siguientes fórmulas para calcular el índice de penetración del material asfáltico.

$$A = \frac{50 \times \log\left(\frac{800}{P}\right)}{T_{AB} - 25} \quad \text{Ec. 27}$$

$$IP = \frac{20 - 10 \times A}{1 + A} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

- P = Penetración en 0,1 mm a 25 °C.
- T_{AB} = Punto de reblandecimiento (°C).
- IP = Índice de penetración.

Tabla 32*Resultado del índice de penetración*

Ensayo	Resultado
Penetración (mm/10)	66,63
Punto de reblandecimiento (°C)	49,05
Índice de Penetración	- 0,75

La norma INV E-724 (2013) en función del índice de penetración (IP), existen tres tipos de cementos asfálticos y comparando con el resultado obtenido en el ensayo, es de -0,74 que significa que, es un cemento asfáltico de mediana susceptibilidad a la temperatura, la mayoría de este tipo se maneja en la construcción de vías.

Ductilidad (INEN 916) / (ASTM D113)

La función del ensayo determina la ductilidad del asfalto, midiendo la distancia que se estira el material antes que suceda la ruptura, a una cierta velocidad y temperatura específica.

Equipos y Materiales

- Molde de bronce.
- Asfalto AC-20 con aditivo.
- Baño de Agua para la preparación de las muestras.
- Máquina de ensayo de ductilidad.
- Termómetro.
- Horno con temperatura constante de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Aceite antiadherente para los moldes.
- Agua a una temperatura de 25°C .

- Tamices
- Espátula

Procedimiento

Se debe calentar la muestra de asfalto en el horno a una temperatura constante de 110 °C hasta que este líquida y poder verter con mayor facilidad sobre los moldes, los mismo que debieron estar engrasados con anticipación y apoyados sobre una superficie plana para que no se distorsionen ni se desprendan las muestras al realizar el ensayo.

Dejar que se enfríe la muestra a temperatura ambiente en un periodo de 35 ± 5 minutos, en seguida retirar el exceso del asfalto con la ayuda de una espátula caliente y quedar al ras con el molde.

Llenar el agua en el equipo, calentarla hasta que llegue a una temperatura de 25 °C y mantenerla constante, debidamente estabilizada la temperatura del agua se procede a colocar las muestras, las cuales se sumergen al menos a 2,5 cm y dejar reposar 90 ± 5 minutos.

Separar los lados de los moldes de forma cuidadosa sin deformar la muestra. Fijar debidamente los anillos a los extremos de cada uno de los ganchos de la máquina de ensayo e ir separando los anillos con una velocidad constante de 50 mm/minuto, hasta que la briqueta se rompa y medir su distancia total en el momento que se provocó la rotura.

Resultados

Tabla 33

Determinación del ensayo de ductilidad

Muestra	Distancia recorrida (cm)
1	112

Muestra	Distancia recorrida (cm)
2	107
Promedio	109,5

Punto de inflamación copa abierta de Cleveland (INEN 808) / (ASTM D92)

La función del ensayo es determinar la temperatura crítica, en donde, el asfalto libera vapores inflamables. Si la temperatura se eleva demasiado, se debe tomar precauciones al momento de manipular y utilizarla en obra.

Equipo y Materiales

- Asfalto AC-20 con aditivo.
- Equipo manual, copa abierta Cleveland.
- Termómetro
- Horno con temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Soporte
- Mechero de gas

Procedimiento

La muestra del asfalto es calentada a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta que tenga la consistencia líquida, seguidamente, se vierte en la copa Cleveland hasta la altura marcada por el aparato.

La copa es colocada en el soporte y con la ayuda del mechero se procede a dar calor, el mechero debió ser calibrado con anticipación para que tenga el incremento de temperatura de 14 a 17 °C por minuto, cuando la temperatura aproximada llegue a 28 °C menor al punto de inflamación.

La velocidad de incremento de la temperatura cambia 5 a 6 °C por minuto y se pasa el mechero por encima de la muestra de asfalto en intervalos de temperatura de 2 °C hasta que se observe una llama en algún punto de la superficie de la muestra.

Para finalizar, se debe registrar el valor del punto de inflamación con la lectura del termómetro, tener cautela de no confundir la verdadera llama con un halo azulado de llama del ensayo.

Resultados

Tabla 34

Determinación del punto de inflamación

Muestra	Temperatura °C
Pto. De inflamación	287

Gravedad específica de asfalto (ASTM D70)

Para este ensayo se utilizó el asfalto AC-20 y es necesario conocer su gravedad específica, el cual puede variar no muy significativamente dependiendo del tipo de almacenaje y la temperatura.

La gravedad específica es la relación del peso de un volumen del asfalto y el peso de un volumen igual de agua, los dos a temperatura de 25 °C.

Equipo y Materiales

- Baño de agua a 25 ± 1 °C en recipiente de aluminio.
- Horno
- Picnómetro con tapón de 25 ml.
- Balanza con precisión de ± 0.1 gr.
- Termómetro digital

Procedimiento

El picnómetro debe estar perfectamente limpio y seco más el tapón, pesarla y anotar el dato.

Para la calibración del picnómetro se lleva a baño de agua a una temperatura de 25 °C, hasta que esté totalmente sumergido (liberando el cuello), seguidamente, echar agua destilada a una altura donde empiece el cuello del picnómetro, colocar la tapa del picnómetro con precaución, sin dejar ingresar aire. Se deja reposar por unos 30 minutos hasta que todo el conjunto alcance una temperatura estable de 25 °C.

Se retira del baño de agua y se seca el exceso de agua del exterior del picnómetro, se pesa y se apunta el dato obtenido.

El asfalto debe estar calentándose en el horno a una temperatura de 110 °C, hasta que presente un estado fluido. Derramar el asfalto dentro del picnómetro seco, alrededor de las 3/4 partes de su capacidad, sin tocar las paredes ni el cuello, evitando así la formación de burbujas de aire.

Se deja enfriar el picnómetro con la muestra de asfalto hasta que esté a una temperatura ambiente y pesar el picnómetro con la muestra. Se lleva el picnómetro con la muestra de asfalto y agua destilada a un baño de agua a 25°C, se coloca el tapón evitando ingresar burbujas de aire y dejar reposar por 30 minutos hasta que tenga una temperatura estable, se retira el picnómetro quitando el exceso de agua y se toma el peso.

Ecuaciones y resultados

La norma ASTM D70 (2009), presenta la siguiente fórmula para calcular la gravedad específica.

$$Gravedad\ específica = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$$

Ec. 29

Donde:

- A = Peso del picnómetro + tapón.
- B = Peso del picnómetro + agua destilada + tapón.
- C = Peso del picnómetro + asfalto + tapón.
- D = Peso del picnómetro + asfalto + agua destilada + tapón.

Tabla 35

Cálculo de la gravedad específica del asfalto

Simbología	Descripción	Valor
A	Peso del picnómetro + tapón (gr)	16,32
B	Peso del picnómetro + agua destilada + tapón (gr)	41,10
C	Peso del picnómetro + asfalto + tapón (gr)	25,15
D	Peso del picnómetro + asfalto + agua destilada + tapón (gr)	41,46
Γ	Gravedad específica (gr/cm³)	1,04

Caracterización del dióxido de titanio y su componente anhídrido

La caracterización del dióxido de titanio, se tomó los valores obtenidos de los ensayos realizados por la empresa proveedora de dicho producto, como se puede evidenciar en la Tabla 36, a su vez en la Tabla 37 se muestra los métodos de prueba que se realizó al dióxido de titanio con su respectiva normativa y los límites aceptables para cada resultado.

Tabla 36*Ficha técnica del dióxido de titanio*

Nombre del producto	DIÓXIDO DE TITANIO ANASTASA USP sin recubrimiento		
Características	POLVO DE BLANCO A LIGERAMENTE COLORADO		
Peso molecular	79.88 gr/mol	Sistema cristalino	Tetragonal
Densidad aparente	48 lb/pie ³	Punto de fusión	1843°C
Volumen molar	18693 m ³ /mol	Punto de ebullición	2972°C
Formula molecular	TiO ₂	Nombre del color	Pigmento blanco 6
Color de índice	77891	Normas	USP40 – NF 35

*Nota: Presentado por (La Casa de los Químicos,2020)***Tabla 37***Propiedades físicas del dióxido de titanio*

Descripción	Valor
Gravedad específica	3,84 gr/ml
Punto de fusión	1843 °C
Punto de inflamación	Inaplicable
Punto de ebullición	2 500 – 3 000 °C
Índice de refracción	2,496

Nota: Presentado por (Agripac,2020)

Para el componente anhidrido se utilizó una resina de poliuretano transparente, ya que por tener una gran resistencia y compatibilidad con materiales (hormigón, piedra natural y sintética, pavimento), se las utiliza en exteriores como en carreteras y suelos exteriores. En la siguiente tabla se muestra las propiedades del producto con sus respectivos valores obtenidos de los ensayos, cada una con su normativa

Tabla 38*Ficha técnica de la Resina de Poliuretano*

PROPIEDADES	VALOR
Densidad a 23 °C ISO 1675	1,15 g/cm ³
Viscosidad a 23°C ISO 2555	2.000 - 2.300 cps
Densidad comp. A a 23 °C ISO 1675	1,25 g/cm ³
Densidad comp. B a 23 °C ISO 1675	1,00 g/cm ³
Viscosidad comp. A a 23°C ISO 2555	3.000 - 3.500 cps
Viscosidad comp. B a 23°C ISO 2555	500 - 600 cps
Contenido en sólidos ISO 1768	± 70%
Porcentaje de la mezcla	1:6,14
COV (componentes orgánicos volátiles)	A:250 g/l B:230 g/l
Pot life a 23 °C	> 1 hora
Adherencia al hormigón a 23 °C	> 1,5 MPa
Elongación ISO 527-3	± 50%
Rango de temperatura de soporte	8 °C - 30 °C
Rango de temperatura ambiental	8 °C -35 °C
Rango de temperatura de servicio	-20 °C - 80°C
Tiempo de repintado a 23 °C y 60% HR	2 -48 horas
Secado a 23 °C y 60% HR	± 2 horas
Transitabilidad a 23 °C	± 24 horas
Secado total para el llenado de piscinas a 23 °C	7 días
Modos de aplicación	brocha, rodillo o equipo "airless" (siempre en capas finas)
Contenido admisible máximo de cloro de limpieza	0,2 - 0,5 mg cloro/l agua
Dilución (en aplicaciones con equipo mecánico)	DESMOSOLVENT (máximo 5-7%)

Nota: Presentado por (TECNOTOP 2CP & V.17, 2021)

Capítulo IV:

Elaboración y ensayos de las briquetas, muestras rectangulares del pavimento flexible drenante fotocatalizador

Elaboración de briquetas

La preparación y compactación de las briquetas de mezcla asfáltica en caliente se lo realizó con la norma ASTM D6926 (2016).

Equipos y materiales

- Ensamble del molde para espécimen.
- Extractor de espécimen.
- Martillos de compactación manual o con manija fija.
- Pedestal de compactación.
- Soporte para molde.
- Horno con temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Aparato mezclador.
- Contenedores para calentar agregados.
- Termómetro tipo blindado o dial para temperatura comprendidas entre 10°C y 210°C .
- Espátula
- Cucharón
- Tamices
- Balanza con precisión de $\pm 0,1$ gr.

- Guantes
- Marcadores para señalar

Procedimiento

Las dimensiones de los cilíndricos serán: 101,6 mm (4") de diámetro y 63,5 mm (2 1/2") de altura, se trabajará con una cantidad de muestra de 1 kg, pesando sucesivamente la fracción de cada tipo de agregado pétreo hasta lograr la cantidad pretendida.

Preparación de la mezcla

Las cantidades de agregado pétreo se pesan cada uno por separado y seguido se secan en el horno hasta que tengan un peso constante. Ya determinado la mezcla de agregados pétreos, los porcentajes de asfalto para el diseño, la compactación y las temperaturas de las muestras.

Se calienta la mezcla de agregados y el asfalto en el horno con una temperatura de 120 a 130 °C, el asfalto debe tener una viscosidad, el cual, permita su manejabilidad.

En un recipiente apto para realizar la mezcla se coloca el agregado, seguidamente, el porcentaje de asfalto, según la cantidad calculada en la relación al peso de los agregados.

El recipiente con la muestra se calienta hasta que llegue a una temperatura de mezclado de 130 a 140 °C y se debe mantener controlado para el proceso de mezclado hasta que la masa esté homogénea. Durante el mezclado la temperatura debe ser constante, ya que, si excede del rango dado, el asfalto pierde sus características y afectará los resultados.

Compactación de la muestra

Antes de colocar la muestra en los moldes, estos se deben ser calentados a una temperatura entre (95 a 150) °C, engrasar y colocar un papel cubierto de aceite en su asiento, para que la muestra no se pegue en el molde.

A diferencia de las mezclas densas, para las mezclas drenantes se compacta con 50 golpes por cara como indica la norma INV E-760 (2013).

Ensayo de las briquetas de asfalto

Se realizará los diferentes ensayos a las briquetas con un porcentaje de asfalto de 4%, elaborando 3 briquetas por cada ensayo.

Los ensayos a realizarse son:

- Análisis de vacíos
 - Densidad Bulk
 - Densidad RICE
- Ensayo de Permeabilidad
- Ensayo Marshall
- Ensayo del Cántabro seco y húmedo

Todos los ensayos mencionados son descritos de forma más detallada (procedimiento, ecuaciones y cálculos realizados).

Análisis de vacíos

El cálculo del porcentaje de vacíos en una mezcla drenante, se lo realizó siguiendo el proceso que indica la norma INV E-736 (2013), la mezcla asfáltica densa una vez

compactada, los vacíos con aire son menores al 10% y para la mezcla asfáltica abierta son iguales o mayores a 10% después de ser compactadas.

Gravedad específica máxima teórica – RICE (ASTM D2041)

La gravedad específica máxima teórica, se calculó en una muestra suelta, la densidad se obtuvo al compactar la mezcla asfáltica, la cual se consiguió una masa formada por áridos y ligantes en la que no existen los huecos.

Equipos y materiales

- Picnómetro de vidrio
- Balanza con precisión de $\pm 0,1$ gr.
- Baño de agua con temperatura constante $25 \pm 1^\circ\text{C}$.
- Espátula
- Franela
- Bomba de vacío
- Termómetro digital

Procedimiento

Para calibrar el picnómetro, se lo llena con agua destilada hasta el borde a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, una vez ya llenado por completo se procede a pesar el conjunto.

Se calienta la muestra sin compactar, hasta una temperatura en que las partículas se desprendan manualmente, teniendo cuidado en no fracturar el agregado, se pesa la muestra, el cual, se lo llamará como A.

La muestra es colocada en el picnómetro, la cual es cubierta con agua a temperatura de 25°C, con la ayuda de la máquina de vacíos se extraerá el aire atrapado en las aberturas de la mezcla durante 10 minutos.

Cuando se haya extraído todo el aire atrapado, se destapa el picnómetro y se lo llena con agua destilada a 25°C, se debe hacerlo con cuidado para que el aire no se vuelva a incrustar en la mezcla. Se registra el peso, previamente el exterior del picnómetro debe ser secado por completo.

Ecuaciones y cálculos

La norma ASTM D2041 (2019) presenta la fórmula para el cálculo de la gravedad específica máxima teórica.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

- A = Peso de la muestra seca al aire, gr.
- D = Peso del picnómetro lleno de agua destilada a 25°C, gr.
- E = Peso del picnómetro lleno de agua destilada + la muestra a 25°C, gr.

Tabla 39

Cálculo de la gravedad específica máxima teórica para 4% de asfalto

Simbología	Descripción	Valor
A	Peso de la muestra seca al aire (gr)	1226,8
D	Peso del picnómetro lleno de agua destilada (gr)	2696,8
E	Peso del picnómetro lleno de agua destilada + la muestra (gr)	3426,5

Simbología	Descripción	Valor
SSS = A+D-E	Peso de la muestra con superficie saturada seca	497,1
Gem	Gravedad específica máxima teórica	2,468

Gravedad específica de Bulk (ASTM D2726)

Este ensayo ayudó a la determinación de la gravedad específica bulk y la densidad de las muestras de mezclas asfálticas compactadas.

Equipos y materiales

- Calibrador o pie de rey.
- Balanza con precisión de $\pm 0,1$ gr.

Procedimiento

Para la densidad de Bulk, se calcula diferente al procedimiento de las mezclas densas, para este caso se determinará con la relación de la masa y el volumen de cada muestra.

Se realiza la medición del diámetro y la altura en 4 sitios diferentes de la briqueta de mezcla asfáltica drenante, se sacará el promedio con los valores obtenidos del diámetro y la altura. Posteriormente, para el cálculo del volumen, se utilizará la fórmula geométrica del volumen del cilindro.

Para obtener la gravedad específica de Bulk, estará dada por la relación entre la densidad de Bulk obtenida anteriormente y el peso específico de agua a 25°C (0,99707 gr/cm³).

Ecuaciones y resultados

$$Volumen = \frac{\pi \times d^2}{4} \times h \quad \text{Ec. 31}$$

$$Densidad\ bulk = \frac{masa}{volumen} \quad \text{Ec. 32}$$

$$Geb = \frac{Densidad\ bulk}{\gamma\ agua\ 25^\circ C} \quad \text{Ec. 33}$$

Tabla 40

Cálculo de la gravedad específica Bulk para 4% de asfalto (MUESTRA #1)

MUESTRA # 1		
Descripción	Simbología	Valor
Altura (cm)	h1	6,74
	h2	6,78
	h3	6,75
	h4	6,72
	h prom	6,75
Diámetro (cm)	d1	10,11
	d2	10,15
	d3	10,16
	d4	10,14
	d prom	10,14
Masa muestra seca (gr)		1025,50
Volumen muestra seca (cm ³)		544,89
Densidad bulk (gr/cm ³)		1,882
Gravedad específica bulk	Geb	1,888

Tabla 41

Cálculo de la gravedad específica Bulk para 4% de asfalto (MUESTRA #2)

MUESTRA # 2		
Descripción	Simbología	Valor
Altura (cm)	h1	6,89
	h2	6,75
	h3	6,86
	h4	6,78
	h prom	6,82

MUESTRA # 2		
Descripción	Simbología	Valor
Diámetro (cm)	d1	10,20
	d2	10,12
	d3	10,15
	d4	10,17
	d prom	10,16
Masa muestra seca (gr)		1031,65
Volumen muestra seca (cm ³)		552,92
Densidad bulk (gr/cm ³)		1,866
Gravedad específica bulk	Geb	1,871

Tabla 42

Cálculo de la gravedad específica Bulk para 4% de asfalto (MUESTRA #3)

MUESTRA # 3		
Descripción	Simbología	Valor
Altura (cm)	h1	6,67
	h2	6,72
	h3	6,79
	h4	6,77
	h prom	6,74
Diámetro (cm)	d1	10,14
	d2	10,12
	d3	10,15
	d4	10,10
	d prom	10,13
Masa muestra seca (gr)		1029,60
Volumen muestra seca (cm ³)		542,74
Densidad bulk (gr/cm ³)		1,897
Gravedad específica bulk	Geb	1,903

Cálculo de porcentaje de vacíos

Para el cálculo de vacíos con aire con respecto al volumen total, la norma INV E-736 (2013) presenta la siguiente formula:

$$Va = \left(1 - \frac{Geb}{Gem} \right) \times 100$$

Ec. 34

Donde:

- V_a = Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada respecto al volumen del espécimen.
- G_{em} = Gravedad específica máxima teórica.
- G_{eb} = Gravedad específica bulk de espécimen compactado.

Tabla 43

Cálculo de porcentaje de vacíos para briquetas

Muestra 4% asfalto	Gravedad específica Bulk	Gravedad máxima teórica	% Vacíos
A	1,888		23,50 %
B	1,871	2,468	24,19 %
C	1,903		22,89 %
Promedio			23,53 %

Prueba de permeabilidad

En el Ecuador no existe normativa para verificar la permeabilidad de la mezcla asfáltica drenante, pero se puede realizar un proceso suplementario con el fin de comprobar que los poros de la mezcla estén interconectados simultáneamente y cumplan la función primordial que es el drenaje del agua.

Se coloca 100 ml de agua sobre la briketa anteriormente humedecida y tomar el tiempo que se demora el agua al atravesar la muestra de asfalto, el cual, no puede superar los 15 segundos, para que el ensayo sea eficiente se debe cubrir las caras laterales de las muestras de pavimento asfáltico drenante.

Tabla 44

Datos conseguidos de la prueba de permeabilidad

Muestra 4% asfalto	Temperatura del agua (°C)	Tiempo de escurrimiento (s)
A	21	8,03
B	22	8,12
C	21	7,97
D	20	8,05

Ensayo del cántabro seco (NLT – 352)

En la norma colombiana describe el proceso para determinar el valor de las pérdidas por el desgaste empleando la máquina de los Ángeles, el cual, permite valorar de forma empírica la resistencia a la disgregación de la mezcla asfáltica abierta, ante los efectos de la abrasión y succión que provoca la acción del tráfico.

Equipos y materiales

- Máquina de los Ángeles.
- Balanza con precisión de $\pm 0,1$ gr.
- Horno de temperatura uniforme $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

Procedimiento

La temperatura del ensayo está entre los 15 a 30 °C, con una tolerancia de $\pm 1\text{ °C}$. Se pesa cada una de las briquetas con diferente porcentaje de asfalto, este valor será llamado como P1, antes de ser ensayadas, las muestras deben mantener su temperatura por un lapso de 6 horas.

La biqueta se la introduce a la máquina de los Ángeles sin las esferas y se hace girar el tambor 300 vueltas a una velocidad de 188 a 208 rad/min (30 a 33 rpm). Para

finalizar el ensayo, se saca la briqueta del tambor y se pesa de nuevo, obteniendo un valor que se lo llamará P2.

Ecuaciones y resultados

Mediante la siguiente formula, se calculó la perdida por desgaste de cada briqueta.

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

- P = Valor por pérdida de desgaste.
- P1 = Peso inicial de la muestra.
- P2 = Peso final de la muestra.

El proceso se repite para cada una de las briquetas, los cálculos realizados se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 45

Perdida por desgaste de las mezclas asfálticas (Ensayo cántabro seco)

No. briqueta	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Desgaste (%)	Promedio
P1	1033,54	837,68	18,95 %	
P2	1030,85	796,54	22,73 %	20,86 %
P3	1031,13	815,62	20,90 %	

Ensayo del cántabro húmedo (NLT - 362)

Este ensayo ayudó a la comprobación de la adhesividad entre los agregados y el ligante. A diferencia del ensayo del cántabro seco, esto se logró sumergiendo las briquetas al agua a una temperatura de 60 °C por 24 horas antes de ser introducidas al bombo de la máquina de los Ángeles.

Equipos y materiales

- Máquina de los Ángeles.
- Balanza con precisión de $\pm 0,1$ gr.
- Máquina para baño maría.

Procedimiento

Ya terminado el periodo de las briquetas sumergidas en el agua, se las retira y se deja secar hasta que alcance la temperatura de 20 a 25 °C durante 24 horas.

Una vez que se hayan secado las briquetas durante las 24 horas, el siguiente proceso será idéntico al ensayo de cántabro seco, las muestras son pesadas antes y después del ensayo. Con los resultados obtenidos se calcula el porcentaje de desgaste que sufrió la biqueta.

Ecuaciones y resultados

La ecuación será la misma que se utilizó para el ensayo de cántabro seco y sus resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 46

Perdida por desgaste de las mezclas asfálticas (Ensayo cántabro húmedo)

No. biqueta	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Desgaste (%)	Promedio
D1	1031,63	715,74	30,62%	
D2	1027,14	727,73	29,15%	28,51%
D3	1029,73	764,37	25,77%	

Ensayo Marshall (ASTM D1559)

Este ensayo determina la resistencia a la deformación plástica de las briquetas ante la aplicación de una carga, usando el aparato Marshall. El ensayo se lo realizó para el porcentaje de asfalto del 4%.

Equipos y materiales

- Máquina para baño maría.
- Medidor de deformación.
- Medidor de estabilidad.
- Máquina de compresión.
- Mordazas.
- Termómetro digital.

Procedimiento

Las briquetas son calentadas a baño maría a una temperatura de 60 °C aproximadamente 40 minutos, las cuales deberán ser colocadas con una diferencia de 1 minuto en el agua.

Pasado el tiempo, sacar las briquetas de agua maría. Colocar la biqueta lo más centrado posible en la mordaza inferior y empalmar la mordaza superior que anteriormente debieron ser calentadas a 21 °C, seguidamente debe ser colocada el deformímetro en las varillas guías del equipo.

Figura 22*Equipo Marshall*

La carga debe ser aplicada con una velocidad constante de 2" por minuto hasta que alcance la carga máxima, con el cual deforme la briqueta y anotar los valores dados.

Resultados

En la siguiente tabla se presenta los resultados obtenidos del ensayo Marshall.

Tabla 47*Resultados del ensayo Marshall*

Asfalto	Estabilidad	Flujo
4 %	lb	(1/10")
A1	1548,36	14,66
A2	1469,13	13,67
A3	1554,95	14,33
Promedio	1524,15	14,22

Elaboración de muestras rectangulares (mezcla asfáltica)

Se elaboran muestras asfálticas drenantes de forma cuadrangular, que fueron usadas para inclusión del contenido de dióxido de titanio en diferentes porcentajes de forma superficial (3%, 5%, 8%, 10%).

Los moldes de madera tienen una dimensión de 15 cm por cada lado y una altura de 5 cm, las características de manipulación del molde deben ser iguales que los moldes para el ensayo Marshall.

La dosificación para las muestras rectangulares, se determinó la cantidad de 2000 gr. Finalmente, para calcular el número de golpes que se debe aplicar sobre las muestras rectangulares y obtener una buena compactación, con la siguiente formula:

$$\# \text{golpes}_{\text{MUESTRA RECTANGULAR}} = \frac{\text{Área}_{\text{MUESTRA RECTANGULAR}} \times \# \text{golpes}_{\text{BRIQUETAS}}}{\text{Área}_{\text{BRIQUETAS}}} \quad \text{Ec. 36}$$

Se compactará con 140 golpes cada cara de la muestra rectangular, garantizando así una buena compactación y dejar enfriar la muestra por un lapso de 6 horas y luego desencofrar cuidadosamente.

Ensayo de las muestras rectangulares (mezcla asfáltica)

Colocación de la emulsión de base acuosa de TiO₂ sobre las muestras Rectangulares

Para la preparación de la microemulsión de base acuosa, se utilizó un ligante acrílico (resina de poliuretano transparente) que cumple con la función de un aditivo para dar adherencia entre las partículas, el agua como un solvente. Se agregará el dióxido de titanio en diferentes tipos de porcentajes (3%, 5%, 8%, 10%), con respecto a una relación equitativa de agua:aditivo (1:1).

Cálculos

Los cálculos se realizaron para asperjar en 3 muestras rectangulares de mezcla asfáltica drenante.

Tabla 48*Diseño de la emulsión acuosa*

Ingrediente	Proporción	Peso Húmedo
Agua	1,00	250 gr
Resina	1,00	250 gr
TOTAL		500gr

Tabla 49*Cantidad de TiO₂ para cada emulsión*

Dióxido de Titanio (TiO₂)	
Porcentaje	Peso
3%	15 gr
5%	25 gr
8%	40 gr
10%	50 gr

Procedimiento

Una vez obtenido los pesos calculados, procedemos a mezclar en el siguiente orden: agua, resina y TiO₂ micropulverizado; con el apoyo de un aparato mezclador, para que no existan partículas aglomeradas entre sí, este procedimiento se lo realizó para cada porcentaje de TiO₂.

Figura 23*Proceso de mezclado*

Para asperjar la emulsión en las muestras rectangulares utilizaremos el sistema de spray por aire comprimido, el cual comprende de la unidad que genera el aire comprimido (compresor), pistola de boquilla fina y manguera. Aplicando una capa de 40 μm de espesor a cada una de sus caras, eso da una equivalencia de carga de 40 gr/m^2 este proceso se lo repite para cada mezcla con diferente porcentaje de TiO_2 .

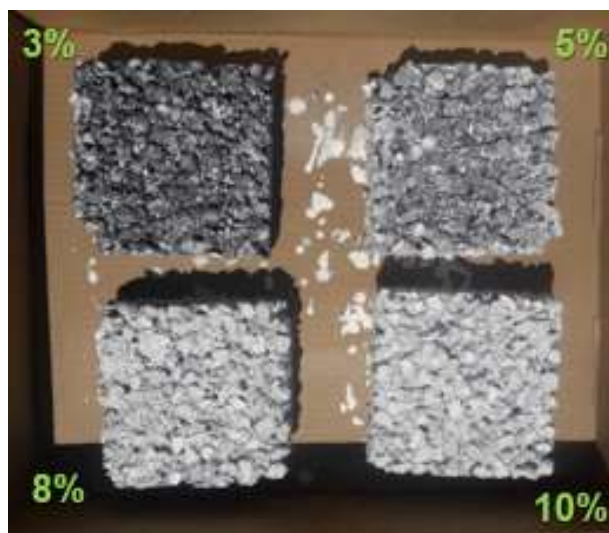
Figura 24

Aspersión de la emulsión acuosa sobre las muestras



Figura 25

Muestras rectangulares asperjadas la emulsión acuosa con 3%, 5%, 8% y 10% de TiO_2



Prueba de descontaminación

La eficacia contra el dióxido de nitrógeno será evaluada en una cámara hermética con dimensiones (100x100x60) cm, colocando cada una de las muestras rectangulares con diferente porcentaje de TiO₂ en el interior una junto a la otra.

Figura 26

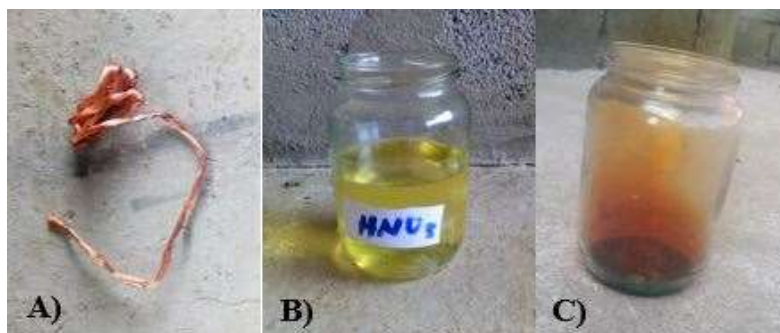
Cámara hermética con muestras asfálticas porosas fotocatalíticas en su interior



En la cámara se implementa una lámpara de rayos ultravioleta como una fuente de luz, para que el dióxido de titanio se activara con longitudes de onda de radiación UV-A (320 a 400 nm), en el recipiente de vidrio se ubicará pedazos de cobre (Cu) y al mezclarlo con el ácido nítrico (4HNO₃) comenzará la reacción que producirá el dióxido de nitrógeno, un gas de color pardo-rojizo.

Figura 27

A) Cobre, B) Ácido nítrico, C) Disolución del cobre y ácido nítrico



Al realizar la reacción en el interior de la cámara, seguidamente se cierra sin dejar salir el gas, logrando establecer una concentración de contaminantes en el aire que será medido con un analizador de gases. En un lapso de 1 hora, las muestras rectangulares drenantes fotocatalíticas deberán absorber todo el gas contaminante.

Como se puede apreciar en la siguiente figura, el analizador de gases empieza a medir la cantidad de óxidos de nitrógeno que existe en el interior del cubeto hermético.

Figura 28

Reacción del Cu y el 4HNO₃ dentro del cubeto hermético



El analizador de gases muestra resultados de los contaminantes analizados, especialmente el valor de mayor importancia para la investigación que es el NO₂ y mediante la siguiente ecuación, se transforma las unidades de concentración de parte por millón (ppm) a microgramos por metro cubico (µg/m³).

$$\mu\text{g} / \text{m}^3 = \frac{\text{ppm} \times \text{PM}}{24,5} \times 10^3$$

Ec. 37

Donde:

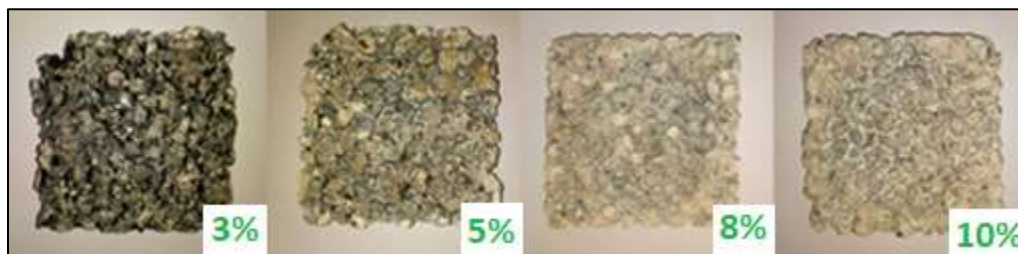
- ppm = Concentración del contaminante por volumen por unidad de volumen de aire.
- PM = Peso molecular del agente contaminante conocido.

$$PM_{NO_2} = 46,0055 \text{ gr} / \text{mol}$$

Las muestras rectangulares toman un color amarillento sobre su superficie por efecto de la contaminación del dióxido de nitrógeno, el cual, son expuestas a la luz solar por el día y por la noche introducidos a un esterilizador germicida de luz UV durante 2 días, tomando lecturas diariamente. La radiación solar realizará la activación del fotocatalizador impregnado en las muestras asfálticas drenantes, así se logra ejecutar el proceso de oxidación y eliminación de los contaminantes.

Figura 29

Muestras contaminadas con NO₂



Prueba de autolimpieza

Por último, se roseará agua en la superficie de cada muestra como se muestra en la siguiente figura, este será la parte final del proceso fotocatalítico que es el desalajo de los contaminantes por intermedio de la lluvia, la cual será drenada, recolectada en envases que fueron previamente preparados, este proceso se lo repite para cada muestra con porcentaje (3%, 5%, 8%, 10%) de TiO₂.

Figura 30

Aspersión de agua en el pavimento asfáltico drenante fotocatalizador

**Figura 31**

Recolección del agua drenada por el pavimento asfáltico drenante fotocatalizador



Seguidamente las muestras serán analizadas para verificar que los gases nocivos se convirtieron en compuestos pasivos para la salud.

Los equipos y personal técnico empleados para la medición de la calidad del agua deben cumplir con ciertos requerimientos exigidos por la Environmental Protection Agency (EPA, 2001), Standard Methods for The Examination of Water and Waste Water (Federation & Association, 2005), de igual manera cumplir con las exigencias de las Normas Ecuatorianas.

Capítulo V:

Resultados y discusión

Resultados de los ensayos

En esta sección se plasmará los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos para el agregado pétreo, el asfalto que son provenientes de la Constructora Terán, así como para las muestras asfálticas porosas, el cual dichos resultados serán comparados con las normas INVIAS, MOP, ASTM, INEN, ASSTHO, según lo requerido por cada una. Así como de las pruebas fotocatalíticas que se sometieron las mezclas asfálticas drenantes con la inclusión de dióxido de titanio en diferentes porcentajes.

Agregados pétreos

Se realizaron diferentes ensayos para la caracterización de los agregados, que ayuda a determinar si el material es óptimo para realizar el diseño de la mezcla asfáltica porosa, el cual se puede observar los resultados en la siguiente tabla.

Tabla 50

Resultados de cada ensayo de los agregados pétreos

ENSAYO	CANTIDAD	NORMA	RESUL.	OBSER.
Abrasión (Máquina de los Ángeles)	40%	INEN 860 / ASTM C 131	31,01%	OK
Gravedad específica y absorción de agregados finos y gruesos	---	INEN 856 / ASTM C 127	4,51%	OK
		INEN 857 / ASTM C 128	3,63%	OK
Equivalente de arena	> 40	INV E-133 / ASTM D2419	73,52	OK

Como se puede observar en la anterior tabla, los agregados pétreos cumplen con todas las especificaciones de las distintas normas establecidas.

Asfalto

Para obtener un buen asfalto debe cumplir especificaciones que determina la norma (Nevi, 2013), el cual se presenta los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos en la siguiente tabla.

Tabla 51

Resultados de cada ensayo del asfalto

ENSAYO	CANTIDAD	NORMA	RESUL.	OBSER.
Penetración (1/10mm)	mín. 60.	INEN 917 / ASTM D5	66,63	OK
Ductilidad (cm)	> 100 cm	INEN 916 / ASTM D113	109,5	OK
Punto de reblandecimiento (°C)	48 - 57 °C	INEN 920 / ASTM D36	49,05	OK
Punto de inflamación (°C)	mín. 232	INEN 808 / ASTM D92	287	OK
Gravedad específica (gr/cm ³)	≥ 1	ASTM D70	1,04	OK

Formula de trabajo

La obtención de la fórmula de trabajo para el diseño de mezclas asfálticas porosas, se realiza la combinación de cada una de las granulometrías (3/4", 3/8", arena), completando la faja granulométrica y poder estabilizarla.

Para lograr dicha estabilización de la faja granulométrica que cumpla con los límites especificados por la norma INVIAS, así como, para el diseño y la elaboración de las briquetas con mezcla asfáltica porosa, se utilizó porcentajes individuales para cada agregado pétreo con una cantidad total de 1000 gramos.

Tabla 52

Cantidad de agregados para elaboración de la mezcla asfáltica porosa

Agregado Pétreo		
Tamaño	%	Cantidad
3/4"	26 %	260 gr
3/8"	58 %	580 gr
#4 (Arena)	16 %	160 gr
TOTAL		1000 gr

Figura 32

Faja granulométrica estabilizada para mezcla asfáltica porosa

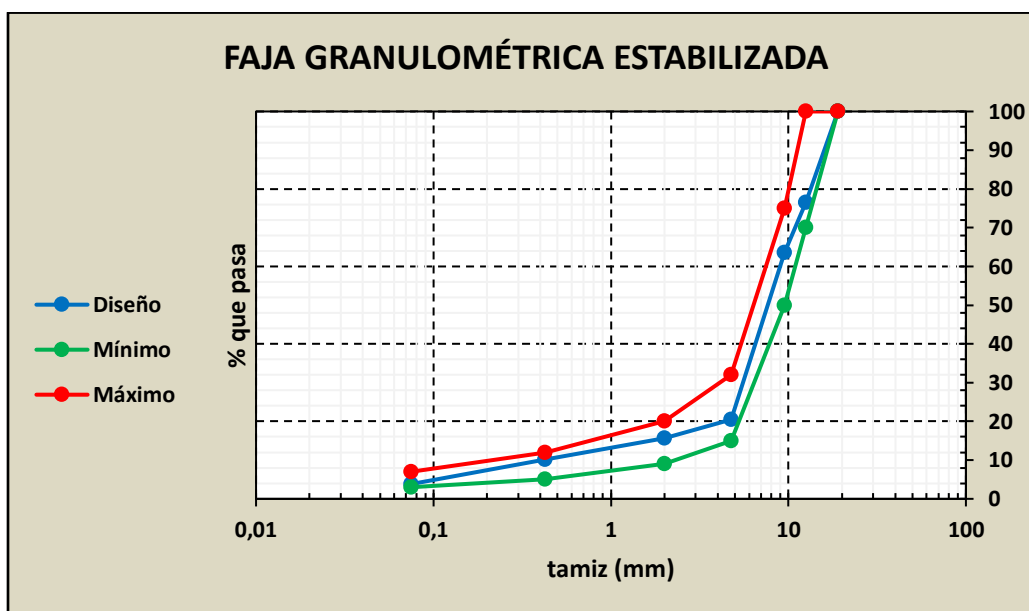


Tabla 53

Estabilización granulométrica con agregados pétreos de la Constructora Terán

Tamiz		Granulometría para mezcla asfáltica abierta		
mm	plg.	Límite Mínimo	Límite Máximo	Diseño
19	3/4	100	100	100
12,50	1/2	70	100	76,48
9,51	3/8	50	75	63,51
4,76	#4	15	32	20,52

Tamiz		Granulometría para mezcla asfáltica abierta		
mm	plg.	Límite Mínimo	Límite Máximo	Diseño
2	#10	9	20	15,60
0,425	#40	5	12	10,19
0,075	#200	3	7	3,82

Contenido optimo del asfalto

Tomando en cuenta investigaciones anteriores, donde se reitera utilizar un contenido de asfalto menor al 4,3% y según la normativa INVIAS indica, que el contenido de asfalto mínimo a utilizar en una mezcla asfáltica porosa no debe exceder el 4,5%, con el cual, cada briqueta para esta investigación se realizó con un porcentaje de 4% de asfalto, seguidamente se expondrán a diferentes ensayos con el fin de corroborar dichos resultados.

Ensayo de análisis de vacíos

Tabla 54

Resultados de Ensayo de Análisis de vacíos.

# muestra	Rango INV E-736	% Vacíos	Observaciones
A 4% asfalto	20 - 25%	23,53%	CUMPLE

El porcentaje de vacíos obtenido en el ensayo cumple con el porcentaje del contenido de vacíos que establece la normativa que oscila del 20 al 25%, este resultado es de mucha importancia para el diseño de una mezcla asfáltica porosa.

Ensayos del cántabro seco y húmedo

Como se puede observar en la siguiente tabla, los ensayos de Cántabro Seco y Húmedo están dentro del rango de aceptación establecida por cada norma.

Tabla 55*Resultados de Ensayo Cántabro Seco y Húmedo*

# Muestra	Normativa	Ensayo	Observaciones
A 4% asfalto	Rango	Cántabro	
	NLT - 352	Seco	CUMPLE
	máx. 25%	20,86%	
4% asfalto	Rango	Cántabro	
	NLT - 362	Húmedo	CUMPLE
	máx. 35%	28,51%	

Ensayo Marshall

La metodología Marshall funciona principalmente para el diseño de mezclas asfálticas tradicionales y en Ecuador no existe una técnica propia para la caracterización de mezclas asfálticas porosas, sin embargo en la normativa Nevi (2013), muestra ciertos requisitos para mezclas asfálticas abiertas.

Tabla 56*Resultados de Ensayo Marshall*

# Muestra	Estabilidad Promedio (lb)	Flujo Promedio (1/100")
A 4% asfalto	1524,15	14,22

Resultado de los ensayos de las muestras rectangulares (mezcla asfáltica)***Prueba de descontaminación***

En la siguiente tabla muestra los valores obtenidos del ensayo, las cantidades de NO₂ que absorbieron las muestras de pavimento asfáltico drenante fotocatalizador.

Tabla 57

Resultados de cantidad NO₂ en el interior del cubeto hermético

Simbología	Descripción	Ensayo	
		No. 1	No. 2
t	Tiempo de duración del ensayo (minutos).	45	60
ppm	Concentración del contaminante por volumen por unidad de volumen de aire (ppm).	0,100	0,105
PM	Peso molecular del agente contaminante conocido (gr/mol).	46,0055	
µg/m³	Concentración del contaminante por peso por unidad de volumen del aire.	187,78	197,17

Según Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (2018), la concentración máxima permitida en una hora para el NO₂ es de 200 µg/m³.

Una vez obtenido las lecturas diarias de cada muestra durante el ensayo se puede observar la degradación del dióxido de nitrógeno, actuando con eficacia la muestra con el 10% de dióxido de titanio, siendo el que elimina la mayor parte al tercer día.

Tabla 58

Resultados de degradación del NO₂

Registro fotográfico del contaminante de NO₂ en pavimento asfáltico drenante con inclusión de TiO₂				
Registro	mp - 3%	mp - 5%	mp - 8%	mp - 10%
22/8/2020 12:35 18°C				

Registro fotográfico del contaminante de NO ₂ en pavimento asfáltico drenante con inclusión de TiO ₂				
Registro	mp - 3%	mp - 5%	mp - 8%	mp - 10%
23/8/2020 15:30 19°C				
24/8/2020 14:00 18°C				

Prueba de autolimpieza

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos de los ensayos con cada porcentaje de TiO₂ (3%, 5%, 8% 10%) sobre la calidad de agua.

Tabla 59

Resultados de ensayos para la determinación de la calidad del agua

% TiO ₂	pH (20°C)	Nitritos	Nitratos	Sulfatos
		mg/l	mg/l	mg/l
3%	7,15	0,05	25,49	10,63
5%	6,62	0,09	38,57	20,81
8%	5,93	0,13	50,57	28,85
10%	5,71	0,14	78,80	33,09
Límite Permisible	6,5 – 8,5	< 0,10	< 50,00	< 400
Norma	EPA	EPA	EPA	OMS

MÉTODO

- pH (20°C) PEE/LA/10 INEN ISO 10523
 - Nitritos Standard Methods 4500 NO₂⁻ B
 - Nitratos Standard Methods 4500 NO₃⁻ D
 - Sulfatos Standard Methods 4500 SO₄²⁻ E
-

Capítulo VI:

Diseño del pavimento asfáltico drenante fotocatalizador

Descripción del área de estudio

El intercambiador “El Trébol” está ubicado en el centro oriente de la ciudad de Quito, cantón Quito, en el sector conocido como el Censo. Esta obra vial es de gran importancia, ya que descongestiona el tráfico vehicular en sentido norte a sur de Quito y al Valle de Los Chillos o viceversa.

Figura 33

Intercambiador “El Trébol”



Nota: Presentado por elcomercio.com

La ubicación geográfica del sitio de estudio se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 60

Coordenadas del intercambiador “El Trébol”

COORDENADAS	
UTM WGS84	777.899,66 m E
	9'974.315,72 m N
Geográficas	0° 13' 55,33" S
	78° 30' 12,2" W

El vigente estudio se enfoca en el diseño de un pavimento permeable fotocatalítico, el cual ayudará a la descontaminación del aire, provocado por el smog emitido de vehículos que transcurren por dicho lugar y a la evacuación de agua debido a las fuertes lluvias en distintas temporadas del año, evitando inundaciones.

Figura 34

Inundación en el intercambiador “El Trébol”



Nota: Presentado por (eluniverso.com)

Diseño del pavimento flexibles preliminar por el método AASHTO 93

Ejes Equivalentes

Se emplearon datos proporcionados por el Departamento de Factibilidad de la MTOP sobre el conteo vehicular de la Av. General Rumiñahui sector “El Trébol” del año 2017, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 61

TPD Av. General Rumiñahui, Sector “El Trébol”

	Tipo de Vehículo	No. de vehículos/día
	Liviano	17375
2DA	Bus o camión de 2 ejes MEDIANO	428
2DB	Bus o camión de 2 ejes GRANDE	1212

Tipo de Vehículo		No. de vehículos/día
3A	Camión de 3 ejes	4

Nota: Elaborado por (Departamento Factibilidad-MTOP, 2017)

Para realizar la proyección vehicular al 2020 se necesita la tasa de crecimiento vehicular anual, estos datos son proporcionados por el Departamento de Factibilidad del MTOP en la siguiente tabla.

Tabla 62

Tasa de crecimiento vehicular (%)

Periodo	Liviano	Bus	Camión
2013 – 2018	4,47	2,22	2,18
2018 – 2023	3,97	1,97	1,94
2023 – 2028	3,57	1,78	1,74
2028 – 2033	3,25	1,62	1,58

Nota: Elaborado por (Departamento Factibilidad-MTOP, 2011)

Se utilizó la fórmula de la progresión geométrica por separado para obtener el TPDA proyectado para el 2020 para cada tipo de vehículo.

$$T_n = T_o(1+r)^n$$

Ec. 38

Donde:

- T_n = Tráfico futuro o proyectado
- T_o = Tráfico inicial
- r = Tasa de crecimiento del tráfico
- n = Periodo de expresión (años)

Tabla 63*Proyección vehicular para el 2020*

Tipo de Vehículo	No. de vehículos/día	
	2017	2020
Liviano	17375	19528
Bus o camión de 2 ejes MEDIANO	428	454
Bus o camión de 2 ejes GRANDE	1212	1285
Camión de 3 ejes	4	4

Para obtener el factor de crecimiento de cada tipo de vehículo utilizaremos la siguiente tabla, en función del periodo de análisis y la tasa de crecimiento anual.

Tabla 64*Factor de crecimiento vehicular*

Periodo de análisis (n)	Factor sin crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Nota: Elaborado por AASHTO 93

En la siguiente tabla se plasma el factor de crecimiento vehicular para cada tipo de vehículo, para un periodo de análisis de 10 años.

Tabla 65

Resumen de factor de crecimiento vehicular

Tipo de Vehículo	Tasa de crecimiento	Factor de crecimiento
Liviano	3,97 %	11,99
Bus	1,97 %	10,92
Camión	1,94 %	10,89

El resultado del estudio realizado permite la determinación de los ejes equivalentes diario en función de los diferentes factores.

Tabla 66

Determinación de ESAL's – Método AASHTO simplificado

Tipo de Vehículo	2020	Tipo de Eje			Factor Daño	ESAL's en el carril de diseño
	Veh/día	Simple - Simple	Simple - Doble	Tandem		
Liviano	19528	$\left(\frac{3}{6,6}\right)^4$			0,009	174,95
2DA Bus o camión de 2 ejes MEDIANO	454	$\left(\frac{3}{6,6}\right)^4$	$\left(\frac{7}{8,2}\right)^4$		0,573	260,36
2DB Bus o camión de 2 ejes GRANDE	1285	$\left(\frac{7}{6,6}\right)^4$	$\left(\frac{11}{8,2}\right)^4$		4,503	5787,42
3A Camión de 3 ejes	4	$\left(\frac{7}{6,6}\right)^4$		$\left(\frac{20}{15}\right)^4$	4,425	18,75
$\sum ESAL's$						6241,49

Con la Ecuación 2, se determinó el número total de repeticiones que transitaran durante todo el periodo de diseño (10 años), tomando en cuenta el factor carril, factor de distribución y el factor de crecimiento.

Tabla 67

Proyección del tránsito al tiempo de diseño

Tipo de Vehículo		ESAL's en el carril de diseño	Factor de Crecimiento	FD	FC	W_{18}
	Liviano	174,95	11,99	0,5	1,0	382959
2DA	Bus o camión de 2 ejes MEDIANO	260,36	10,92	0,5	1,0	518945
2DB	Bus o camión de 2 ejes GRANDE	5787,42	10,92	0,5	1,0	11535330
3A	Camión de 3 ejes	18,75	10,89	0,5	1,0	37282
$\sum ESAL's$		6241,49		$\sum W_{18}$		1,25E+07

Confiabilidad

De la Tabla 10, se obtiene el grado de confiabilidad, para este estudio se tiene una confiabilidad del 80%, este valor se lo da para una vía colectora (autopista RI – RII, clase I – II).

Con el valor del grado de confiabilidad y la Tabla 11, se conseguirá el valor del fractil de la ley normal centrada (Z_r), en este caso se tiene un Z_r de -0,841.

Serviciabilidad

La MTOP muestra valores recomendados para el cálculo del índice de serviciabilidad para vías colectoras (autopista RI – RII, clase I – II), para el valor de índice inicial (P_o) es de 4,20 y el valor del índice de servicio final (P_f) es de 2,50 tomado de la Tabla 12.

Desviación estándar del sistema

La desviación estándar para un pavimento flexible es de 0,45 que se lo tomó de la Tabla 13.

Módulo resiliente y coeficiente estructural de capas

Para el cálculo del módulo resiliente para la subrasante, se realizó mediante la Ecuación 4, tomando en cuenta que el valor del CBR para dicha capa según la normativa MTOP es del 15% como mínimo, el cual concierne a una subrasante de clase 2 según la norma (MOP-001-F, 2002).

En cambio, para la capa subbase y la base se utilizó los monogramas dados por la normativa AASHTO 93 para el cálculo del módulo resiliente y el coeficiente estructural, con valores de CBR del 30% para la subbase y del 80% para la base, dicho valores son sacado de la normativa (MOP-001-F, 2002). Es importante recalcar que, para el caso de estudio, se tomó valores de CBR mínimo para la subbase y base tal como establece la norma, ya que se enfocará primordialmente al diseño para un pavimento tipo de una vía de primer orden especialmente en el estudio de la carpeta de rodadura.

Mediante la Ecuación 5, se obtuvo el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica con un valor de 446 128,39 PSI y así se determinó el coeficiente estructural de la capa (a_1).

Diseño estructural del pavimento asfáltico

En la siguiente tabla se presenta el número estructural total y los espesores de cada una de las capas que comprenden el pavimento asfáltico drenante.

Tabla 68

Cálculo – diseño de la estructura del pavimento asfáltico flexible – método AASHTO 93

DISEÑO DE PAVIMENTOS METODO AASHTO 1993	
1. CARACTERISTICAS DE MATERIALES	
	DATOS
A. MODULO DE RESILIENCIA DE LA CARPETA ASFALTICA (ksi)	446,13
B. MODULO DE RESILIENCIA DE LA BASE GRANULAR (ksi)	28,50
C. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-BASE (ksi)	14,90
D. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE (Mr, ksi)	13,33
2. PARÁMETROS DE DISEÑO	
A. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)	1,25E+07
B. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)	80%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Zr)	-0,841
DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE TODAS LAS VARIABLES(So)	0,45
D. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)	4,2
E. SERVICIABILIDAD FINAL (pt)	2,5
F. PERIODO DE DISEÑO (Años)	10
3. DATOS PARA ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO	
A. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA	
Concreto Asfáltico Convencional (a ₁)	0,44
Base granular (a ₂)	0,14
Subbase (a ₃)	0,11
B. COEFICIENTES DE DRENAJE DE CAPA	
Base granular (m ₂)	1,30
Subbase (m ₃)	1,15
DATOS DE SALIDA :	
NUMERO ESTRUCTURAL SUBRASANTE (SN3)	3,92
NUMERO ESTRUCTURAL SUBBASE (SN2)	3,76
NUMERO ESTRUCTURAL BASE (SN1)	2,93
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO PROPUESTA	
	TEORICO (cm) PROPUESTO (cm)
ESPESOR CARPETA ASFALTICA	19,00 19,00
ESPESOR BASE GRANULAR	15,24 16,00
ESPESOR SUB BASE GRANULAR	15,00 15,00
ESPESOR TOTAL	50,00
RESPONSABLE :	Sr. Julio Amagua

Figura 35

Espesores de las capas que conforman el pavimento, diseño método AASHTO-93



Sistema de drenaje

Tasa de infiltración para la carpeta de rodadura porosa y profundidad máxima de almacenamiento

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2019), proporcionó información del estudio de lluvias intensas de la estación M-024, presentado en la siguiente tabla.

Tabla 69

Ecuaciones de intensidad para la estación M – 0024

CODIGO	NOMBRE ESTACIÓN	DURACIÓN	ECUACIÓN
M0024	QUITO INAMHI-INNAQUITO	5 Min < 41.1 Min	$I_{TR} = 106.54 * I d_{TR} * t^{-0.38} R^2 = 0.9917$
		41.1 Min < 1440 Min	$I_{TR} = 772.11 * I d_{TR} * t^{-0.913} R^2 = 0.9996$

Nota: Elaborado por (INAMHI, 2019)

El valor de la intensidad máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años es de 2,18 mm/h, este valor se calculó con la siguiente ecuación.

$$I_{d_{RT}} = 1276,807 \times T^{0,1681} \times t^{-0,9297}$$

Ec. 39

Se presenta los resultados de las alturas máximas de la capa de rodadura asfáltica para un periodo de 10 años.

Tabla 70

Datos de diseño para un TR de 10 años

TR (años)	$I_{d_{TR}}$ (mm/h)	k (mm/h)	Porosidad
10	2,18	5,05	0,2353

Tabla 71

Resultados de la profundidad máxima de asfalto para TR de 10 años

d (min)	d (h)	Intensidad (mm/h)	H máx. (mm)
5	0,083	125,835	42,777
10	0,167	96,696	64,914
15	0,250	82,888	82,701
20	0,333	74,305	98,109
25	0,417	68,264	111,938
30	0,500	63,695	124,617
35	0,583	60,071	136,402
40	0,667	57,099	147,467
45	0,750	52,023	149,721
50	0,833	47,251	149,460
55	0,917	43,314	149,065
60	1,000	40,006	148,558

La altura máxima para la capa de rodadura para un periodo de retorno de 10 años fue de 14,97 cm \approx 15 cm.

Salida de la estructura del pavimento

Se determinó la distancia de las tuberías de drenaje con la ecuación 13, el valor de intensidad de lluvia es de 52,023 mm/h que corresponde a la profundidad de la capa de rodadura definida como la óptima (15,00 cm).

Tabla 72

Resultado de espaciamiento entre tuberías

C	h (m)	q (m/s)	k (m/s)	h (m)	2b (m)
0,33	0,31	9,54E-06	5,05E-06	0,31	0,66

Para una mayor facilidad constructiva se utilizó la distancia de 0,70 m entre tubería.

Se determinó la capacidad de flujo de la subbase utilizando la ecuación 14, en la siguiente tabla se presenta los datos y resultados. El coeficiente de escorrentía fue de 0,88 obtenido de la tabla 18.

Tabla 73

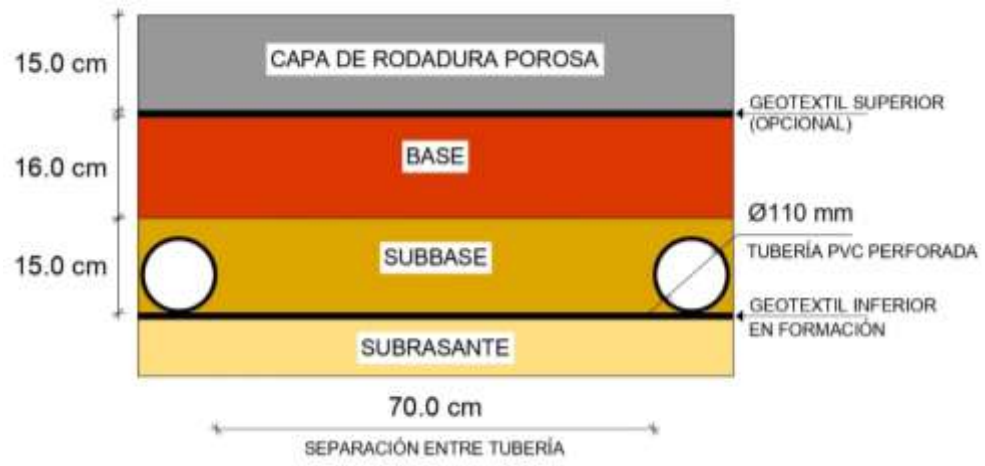
Caudal de infiltración de la subbase

c	I mm/h	A Ha	Q m³/s
0,88	52,023	1,96	0,249

Se utilizó una velocidad de 1 m/s en la tubería para evitar sedimentos en las paredes, en donde el diámetro determinado es de 10,64 cm, según el catálogo de tuberías PVC para drenaje subterráneo, se define utilizar tuberías de diámetro nominal 110 mm. En la siguiente figura se puede apreciar el diseño de cada una de las capas con su espesor.

Figura 36

Espesores de las capas que conforman el pavimento, diseño THE SUDS MANUAL



Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Los agregados pétreos obtenidos de la fuente de material, así como el asfalto presentaron resultados favorables al momento de caracterizar las propiedades índice y mecánicas de acuerdo con la normativa MOP-001-F.

El dióxido de titanio tipo anatase micropulverizado cumplió con los estándares de calidad otorgados por la Farmacopea de los Estados Unidos (USP), a su vez, la resina acrílica cumplió con los requerimientos establecidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO), siendo así, componentes factibles al momento de realizar una mezcla optima.

La mezcla asfáltica drenante fue diseñada considerando un tráfico de carga liviana y obteniéndose la siguiente formula maestra en proporciones de peso: 26% de agregado de tamaño nominal 3/4", 58% de agregado de tamaño nominal 3/8", 16% de arena y un porcentaje de asfalto del 4% que está dentro del rango de la normativa del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS) y en cumplimiento del ensayo del Cántabro (NLT – 352 y 362). El ensayo Cántabro de perdida por desgaste es el principal método para caracterizar una mezcla asfáltica drenante, obteniendo resultados favorables, para Cántabro Seco se obtuvo un porcentaje de 20,86% y para el Cántabro Húmedo se obtuvo un porcentaje de 28,51%. Mediante el ensayo Marshall se obtiene una estabilidad de 1524,15 lb y 0,142 pulgadas de flujo, estos valores son aceptables al ser analizados con los criterios de diseño Marshall. El porcentaje de vacíos está dentro del rango que impone la normativa (INVIAS) con un valor de 23,35%.

La Norma de Calidad del Ambiente Ecuatoriana (NECA), establece el límite máximo de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la concentración en una hora del contaminante dióxido de

nitrógeno (NO_2) y de acuerdo a los ensayos realizados en laboratorio con las muestras de mezcla asfáltica drenante complementado el dióxido de titanio se obtuvo un valor de $197,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esto indica que las muestras absorbieron un 98,35% de Dióxido de Nitrogeno.

En la prueba de autolimpieza, el agua drenada por cada muestra de pavimento asfáltico drenante con inclusión de (3%, 5%, 8%, 10%) de Dióxido de Titanio fueron recolectadas y analizadas, siendo así, la muestra de mezcla asfáltica con 5% de Dióxido de Titanio fue la proporción más factible con valores de: Potencial de Hidrógeno de 6,62, nitritos 0,09 mg/l, nitratos 38,57 mg/l, sulfatos de 20,81 mg/l y cumpliendo con los rangos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA).

Para cuantificar el reemplazo y colocación de esta nueva mezcla asfáltica geoambiental, se requiere que en el área de influencia específicamente en las intersecciones del corredor vial “El Trébol”, la instalación de sensores que midan la concentración de Dióxido de Nitrógeno, a fin de establecer isoyetas o zonificar las áreas que requieren de la implementación de este pavimento.

Recomendaciones

Se sugiere implementar en el Laboratorio de Pavimentos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE una cámara de radiación ultravioleta acondicionada para 1m^2 de pavimento asfáltico, un equipo de detección de gases para espacios confinados.

La limitación de este trabajo fue la falta de normativa nacional para la construcción de pavimentos drenantes en vías razón por la que se utilizó el manual INVIAS (Normativa Colombiana), además que en el país no existen aún carreteras que tengan este tipo de

pavimento asfáltico, se sugiere que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) adicione a la normativa actual una sección para mezclas asfálticas abiertas.

Según la metodología Marshall, no existen parámetros para la evaluación de mezclas asfálticas drenantes, pues solo hace referencia únicamente a mezclas tradicionales que poseen de un porcentaje de vacíos del 3% al 5%, por lo que se sugiere analizar los límites permisibles de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos para pavimentos asfálticos drenantes.

Se espera que esta investigación sea la precursora de futuros estudios de mezclas asfálticas drenantes fotocatalizadores aplicados en vías, además se intenta innovar las técnicas tradicionales de diseño de pavimentos asfálticos en la ciudad y en el país, prolongando la vida útil de las estructuras viales.

Se recomienda utilizar el diseño del pavimento asfáltico drenante con los siguientes espesores para cada capa: 15cm para la capa de rodadura, 16cm para la base y 15 cm para la subbase, adicionalmente colocar tubería PVC perforada de diámetro 110mm a cada 0,70m en la subbase, con el fin de eliminar los problemas de drenaje existentes.

Se recomienda realizar por lo menos una vez al año, una autolimpieza bajo presiones controladas, con el propósito de desalojar la acumulación de residuos que se encuentran adheridos en la superficie del pavimento asfáltico drenante.

Referencia bibliográfica

- Abella Rodríguez, G. (2015). *Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO₂: propiedades autolimpiantes*. Caminos.
- Agnusdei, J. O. (2000). *Asfaltos modificados con polímeros, Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT)*,(pp 1-35). Argentina.
- Ambiente, Q., & DE INMISIÓN, O. N. (2018). *Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire*. Obtenido de Secretaría del Ambiente: [http://www. quitoambiente. gob. ec](http://www.quitoambiente.gob.ec)
- Armijos, C., & Christian, R. (2009). Evaluación superficial de algunas calles de la ciudad de Loja. *Slideshare [Seriado En Línea]*.
- ASPHALT Institute. (2007). *The asphalt handbook. MS-4 Seventh Edition. USA. 788p*.
- ASTM C127. (2001). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C131. (2006). *Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine*. ASTM International West Conshohocken, PA,USA.
- ASTM C136. (2006). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International West Conshohocken, PA,USA.
- ASTM D113. (2017). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*. ASTM International West Conshohocken, PA,USA.
- ASTM D1559. (1989). *Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2041. (2019). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2419. (2014). *Standard test method for sand equivalent value of soils and fine aggregate*. ASTM International West Conshohocken, PA,USA.

- ASTM D2726. (2019). *Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D36. (2014). *Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus)*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D5. (2013). *Standard test method for penetration of bituminous materials*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D6926. (2016). *Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D70. (2009). *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D92. (2016). *Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- Ballard, B. W., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SUDS manual*. CIRIA: London, UK.
- Bañón Blásquez, L., & Beviá García, J. F. (2000). *Manual de Carreteras Volumen 2: Construcción Mantenimiento*. *Manual de Carreteras*, 328.
file:///C:/Users/USUARIO/Desktop/SEPTIMO A/TRAZADO II/LIBROS/MC_Tomo_2.pdf
- Bañón, L., & Beviá García, J. F. (2000). *Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento*. *Caminos II*.
- Bieber, H., Versini, G., Barre, S., Loison, J. L., Schmerber, G., Ulhaq-Bouillet, C., Colis, S., & Dinia, A. (2009). Structural and magnetic study of hard-soft systems with ZnO barrier grown by pulsed laser deposition. *Microelectronics Journal*, 40(2), 246–249.
<https://doi.org/10.1016/j.mejo.2008.07.044>
- Brundtland, I. (1987). Informe: Nuestro Futuro Común. *Comisión Mundial Sobre Medio Ambiente y Desarrollo*.
- Cáceres Morales, C. A. (2007). Diseño de mezclas asfálticas, Estado del Arte. *Diseño de Mezclas Asfálticas*, 33.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/capitulo1.pdf

- Castro, M. (2011). Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano. *Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.*
- Chávez Villalva, F. M. (2017). *Estudio hidrogeológico para sustentar la disponibilidad hídrica subterránea para pozo tubular de reemplazo-Monsanto Perú-Villacuri-Ica.*
- Chen, J., & Poon, C. (2009). Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Building and Environment, 44*(9), 1899–1906.
- Chen, M., & Liu, Y. (2010). NO_x removal from vehicle emissions by functionality surface of asphalt road. *Journal of Hazardous Materials, 174*(1–3), 375–379.
- Coronado Iturbide, J. (2002). *Manual centroamericano para diseño de pavimentos.* SIECA.
- Corredor, G. (2008). Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHO. *Universidad Nacional de Ingeniería, Managua-Nicaragua.*
- Cruzado, D. A. (2018). *PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS AVANCES, APLICACIONES Y RETOS.*
- Doré, G., & Zubeck, H. K. (2009). *Cold regions pavement engineering* (Vol. 401). ASCE Press Reston, Virginia.
- EPA, U. S. (2001). United States Environmental Protection Agency. *Quality Assurance Guidance Document-Model Quality Assurance Project Plan for the PM Ambient Air, 2.*
- Faraldos, M., Bahamonde, A., Iglesias, A., Carbajo, J., Rovito, G., & Almazán, D. (2012). Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas. *Congreso Nacional Del Medio Ambiente.*
- Federation, W. E., & Association, A. P. H. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.*
- Galván, L. (2015). Criterios de análisis y diseño de una mezcla asfáltica en frío con pavimento reciclado y emulsión asfáltica (tesis de pregrado). *Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.*
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción.* Universidad Nacional de Colombia.

- Guzmán Beltrán, E. C., & Ulloa Vélez, D. E. (2007). *Diseño de mezclas asfálticas drenantes con áridos provenientes de la provincia de Pichincha*. QUITO/PUCE/2007.
- Herrera, J., & Pla, F. (2009). *Materiales de construcción*. Madrid-España.
- Huamán Guerrero, N. (2013). *Manual de Pavimentos Flexibles*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Humpiri Pineda, K. (2015). *Mención : Geotecnia Y Transportes Tesis " Análisis Superficial De Pavimentos Flexibles Para El Mantenimiento De Vías En La Región De Puno "*. 171.
- INEN 695. (2010). *Áridos, muestreo* (p. 9).
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_695-1.pdf
- INEN 696. (2011). *Análisis Granulométrico en los Áridos Fino y Grueso*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- INEN 808. (2013). *Producto derivados del petróleo. Determinación del punto de inflamación y fuego en copa abierta Cleveland*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- INEN 856. (2010). *Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y Absorción del Árido Fino*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- INEN 857. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- INEN 860. (2011). *Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles* (Vol. 37, Issue 5). Norma Técnica Ecuatoriana.
- INEN 916. (2013). *Materiales bituminosos. Determinación de la ductilidad*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- INEN 917. (2013). *Materiales Bituminosos. Determinación de la penetración*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- INEN 920. (2013). *Materiales bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento (Método de anillo y bola)*. Norma Técnica Ecuatoriana.
- INV E-133. (2013). *Equivalente de arena de suelos y agregados finos*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.

- INV E-724. (2013). *Índice de penetración de cementos asfálticos*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- INV E-736. (2013). *Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- INV E-760. (2013). *Caracterización de la mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cantabro de pérdida por desgaste*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- Katzman, L. (2006). Building Toward a Cleaner Environment: A New Role for an Existing Product, TiO₂. *Sasaki Associates Inc.*
- Kennedy, T. W., & Hudson, W. R. (1968). Application of the indirect tensile test to stabilized materials. *Highway Research Record*, 235.
- Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M. G., Sánchez Blanco, V., & del Val, M. A. (2009). *Ingeniería de carreteras*. Aravaca. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Leguía, P., & Pacheco, H. (2016). Evaluación superficial del pavimento flexible por el método Pavement Condition Index (PCI) en las vías arteriales: Cincuentenario, Colón y Miguel Grau (Huacho-Huaura-Lima). *Universidad San Martín de Porres, Lima, Perú*.
- Lisbona Garcia, L. E. (2016). *Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Lucke, T., Beecham, S., Boogaard, F. C., & Myers, B. (2013). Are infiltration capacities of clogged permeable pavements still acceptable? *NOVATECH 2013*.
- Ma, Y., Wang, X., Jia, Y., Chen, X., Han, H., & Li, C. (2014). Titanium dioxide-based nanomaterials for photocatalytic fuel generations. *Chemical Reviews*, 114(19), 9987–10043.
- Maury Ramirez, A., & De Belie, N. (2010). State of the art of TiO₂ containing cementitious materials: self-cleaning properties. *Materiales de Construcción*, 60(298), 33–50.
- Menéndez Acurio, J. R. (2009). *Ingeniería De Pavimentos Materiales, Diseño y Conservación*. Lima: Fondo Editorial ICG.

- Molina Huelva, M. (2010). *Capítulo 1. el asfalto*. 9–22.
- Montejo, A. (2002). Pavimentos, Construcción y Conceptos Generales I: En Ingeniería de Pavimentos para carreteras. *Seriado En Línea*.
- MOP-001-F. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Ministerio de obras públicas y comunicaciones.
- Muñoz, G. (2001). Mezclas Drenantes. *Santiago. Apuntes Para El Curso Laboratorista*.
- Nevi, N. E. V. (2013). 12-MTOP. In *Norma de estudios y diseños viales Norma Ecuatoriana Vial Nevi-12-MTOP*.
- NLT 362. (1992). *Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo de cántabro de pérdidas por desgaste* (p. 4). CEDEX.
- Normativa Española. (2000). Riesgos auxiliares, mezclas bituminosas y pavimentos de hormigon. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Oficina Regional de Ciencia. (2013). *Publicado en el 2013 por la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)*.
- Ohama, Y., & Van Gemert, D. (2011). *Application of titanium dioxide photocatalysis to construction materials: state-of-the-art report of the RILEM Technical Committee 194-TDP* (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Orozco Barrenetxea, C., Pérez Serrano, A., González Delgado, M. N., Rodríguez Vidal, F. J., & Alfayate Blanco, J. M. (2003). Contaminación ambiental. *Una Visión Desde La Química*, 661.
- Recasens, R. M. (2006). Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la Seguridad. *Universidad Politécnica de Cataluña, Zaragoza*.
- Reyes, F. (2002). *Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes= Effect of plastic fibers on flexion of drainable pavement structures*.
- Rodríguez, A. P. (2011). Materiales básicos. *Upc*, 35.
- Rodríguez García, J. R. (2012). *Morteros fotocatalíticos: análisis de su autolimpieza en*

función del tipo de cemento y rugosidad superficial. Madrid.

Rodríguez Hernández, J. (2008). *Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero*. Universidad de Cantabria.

Romero Placeres, M., Diego Olite, F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 0.

Rondon, H., & Reyes, F. (2015). *Pavimentos-Materiales Construcción y Diseño*.pdf (p. 640).

Ruiz, C. (2000). LAS MEZCLAS DRENANTES EN CHILE. *Las Mezclas Drenantes En Chile*. Universidad Técnica Federico Santa María. Memoria de Ingeniería Civil. Valparaíso, Universidad Técnica Federico Santa María, 193.

Salamanca Niño, M. A., & Zuluaga Bautista, S. A. (2014). *Diseño de la estructura de pavimento flexible por medio de los métodos INVIAS, AASHTO 93 e Instituto del Asfalto para la vía La Ye-Santa Lucía Barranca Lebrija entre los abscisas K19+ 250 A K25+ 750 ubicada en el departamento del Cesar*.

Salazar Delgado, J. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano*.

Segura Montoya, D. J., & Camelo Manzanares, D. M. (2019). *Evaluación de las propiedades fotocatalíticas de prefabricados para obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio (TiO₂)*.

Skalska, K., Miller, J. S., & Ledakowicz, S. (2010). Trends in NO_x abatement: A review. *Science of The Total Environment*, 408(19), 3976–3989.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.001>

Sotil, A. (2012). *Compilación de diapositivas del curso Diseño de pavimentos*. Lima: UPC.

Suntasig Padilla, D. E. (2016). *La Prevención del Daño Ambiental ocasionado por el Transporte Público, Sector el Trébol periodo 2014-2015*. Quito: UCE.

Tang Mondragón, W. (2019). *Propuesta de diseño de pavimento flexible con subrasante*

mejorada con aditivo, prolongación recreo cuadras del 12 al 16, banda de Shilcayo–San Martín–San Martín; 2019.

TECNOTOP 2CP, & V.17. (2021). *RESINA DE POLIURETANO BI COMPONENTE, ALIFÁTICA APTA PARA INMERSIÓN TOTAL DE AGUA Y PROTECCIÓN FRENTE A LOS RAYOS UV. Ral 9003, 1–7.*

Terán Solíz, M. C. (2016). *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas.* Universitat Politècnica de Catalunya.

Universidad Mayor de San Simón. (2004). *Manual Completo de Diseño de Pavimentos.*

Uzcategui Paredes, A. (2010). *Reducción catalítica de óxidos de nitrógeno (NOx) en corrientes gaseosas.*

Vargas, P. (2009). El cambio climático y sus efectos en el Perú. *Lima: Banco Central de Reserva Del Perú.*

Velásquez, E. D. R. (2009). Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la Av. Luis Montero, distrito de Castilla. *Universidad de Piura, Piura, Perú.*

Wang, X., & Mauzerall, D. L. (2004). Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020. *Atmospheric Environment, 38(26), 4383–4402.*

Wiesner, M. R., Lowry, G. V, Jones, K. L., Hochella Michael F, J., Di Giulio, R. T., Casman, E., & Bernhardt, E. S. (2009). *Decreasing uncertainties in assessing environmental exposure, risk, and ecological implications of nanomaterials.* ACS Publications.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS Manual. CIRIA Report C697.*

Zúñiga, R. (2015). Mezcla asfáltica en caliente. *Santiago de Chile: Autor.*

Anexos