

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

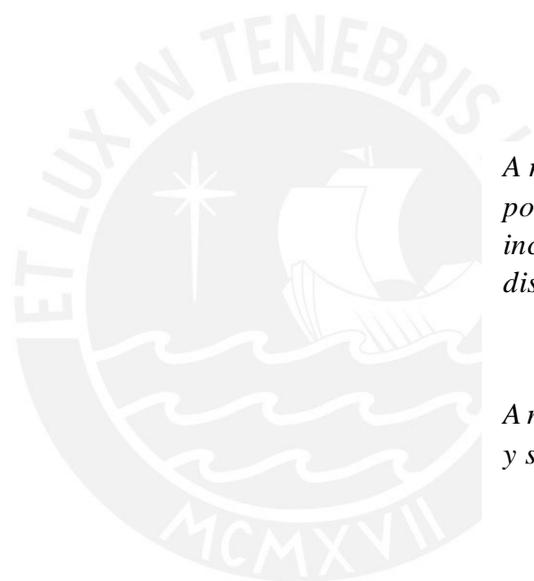
**DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS DE LA CARRETERA DE ACCESO AL  
NUEVO PUERTO DE YURIMAGUAS (KM 1+000 A 2+000)**

Tesis para optar por el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**Daniel Alonso Vega Pérrigo**

**ASESOR: Ing. Manuel A. Olcese Franzero**

Lima, 2018



*A mis padres, Norbil y Cecilia,  
por su inmenso cariño y apoyo  
incondicional a pesar de la  
distancia.*

*A mi asesor Manuel, por su guía  
y sus recomendaciones.*

## **RESUMEN**

La carretera de acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas cumple un rol protagónico ya que constituye el nexo entre la vía terrestre y fluvial del comercio, pues permite el transporte de la mercadería proveniente del puerto marítimo de Paita, para ser embarcada y proseguir su recorrido, primero por el río Huallaga, luego por el Marañón y finalmente por el Amazonas, rumbo a Iquitos, en el Perú, y Manaus, en Brasil.

En la presente tesis se realiza el diseño del pavimento de un kilómetro de esta carretera donde gran parte de las variables de diseño han sido proporcionadas como parte del temario de tesis para simular un caso hipotético y diferente que el que se presenta en el campo.

Específicamente, según el temario del tema de tesis, el kilómetro designado por el asesor fue del 1+000 al 2+000. La carretera en mención tiene 9.4 kilómetros de longitud y conecta actualmente la vía Interoceánica Norte tramo Tarapoto-Yurimaguas con el Nuevo Puerto de Yurimaguas.

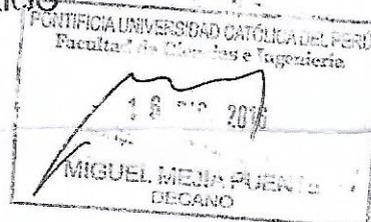
Se procede con el diseño del pavimento tanto flexible como rígido. Para el pavimento flexible se utiliza la metodología de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la del Instituto del Asfalto (IA), mientras que para el pavimento rígido se utiliza también dos metodologías; la de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la de la Portland Cement Association (PCA).

Por último, una vez obtenidos los diseños definitivos para los dos tipos de pavimentos se procede a una comparación económica del costo inicial de construcción y costo de mantenimiento de ambas estructuras para finalmente elegir la alternativa de diseño más óptima.

La motivación al desarrollo de la presente tesis pasa por conocer la verdadera diferencia económica existente entre la alternativa de un pavimento rígido y de un pavimento flexible y saber así si la diferencia económica es la causa principal por la cual actualmente en Perú los pavimentos rígidos son construidos en un muy bajo volumen.

## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Diseño de los pavimentos de la carretera de acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas (km 1+000 a 2+000)".  
Área : Geotecnia  
Asesor : Manuel A. Olcese Franzero  
Alumno : DANIEL ALONSO VEGA PERRICÓ  
Código : 2011.1164.412  
Tema N° : # 57  
Fecha : Lima 12 de diciembre de 2016



### 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y crecimiento de un país, se sustenta en la integración de las distintas poblaciones a los mercados nacionales e internacionales para de esta manera fomentar el intercambio sociocultural entre ellas y así permitir potenciar sus ventajas competitivas. Para lograr este objetivo es necesario la elaboración de un plan de integración sustentado en el desarrollo de nueva infraestructura vial.

En nuestro país los dos tipos de pavimentos más usados son el flexible y el rígido. Dependiendo de la cantidad y el tipo de tránsito que circula por la vía en estudio, el material en el cual estará asentado el pavimento, las condiciones climáticas, el factor económico, entre otros, se elige el tipo de estructura que se construirá.

El diseño de un pavimento se basa en la aplicación de metodologías mediante las cuales se hallan los diversos espesores de las capas que lo conforman. Uno de los métodos más utilizados actualmente es el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para los pavimentos flexibles; así mismo es común la utilización del método del Instituto del Asfalto. Para pavimentos rígidos, la AASHTO también propone una metodología de diseño y el otro procedimiento usado para el diseño de pavimentos de concreto es el de la Portland Cement Association (PCA).

La presente tesis plantea obtener los diseños mediante las cuatro metodologías expuestas líneas arriba con la finalidad de comparar los resultados de los espesores de las capas de la estructura y realizar un análisis económico de la construcción del tramo comprendido entre el km 1+000 y 2+000 de la carretera de acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas.

### 2. ANTECEDENTES

#### 2.1 Ubicación del área

El análisis se desarrollará entre los kilómetros 1+000 y 2+000 de la carretera de acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas.

## 2.2 Geología y mecánica de suelos

Los datos para la caracterización del material de la subrasante, subbase y base fueron proporcionados por el asesor como parte del temario de tesis para simular un caso más desfavorable que el que se presenta en el campo.

De esta manera se tiene que el suelo de la sub rasante está formado por una arcilla de mediana plasticidad, ligeramente húmeda, color marrón {CL / A-7-5 (4)} la cual tiene un CBR = 6 a una compactación del 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado (wop = 14.6%, máximo gd = 1.90 gr/cm<sup>3</sup>). El material de base será piedra chancada tipo B el cual tiene un CBR = 112 a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado (wop = 6.3%, máximo gd = 2.16 gr/cm<sup>3</sup>) y el material de subbase, arena arcillosa (SC / A-2-6), la cual tiene un CBR = 29 a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado (wop = 8.1%, máximo gd = 1.95 gr/cm<sup>3</sup>).

## 2.3 Composición vehicular

El tránsito será el siguiente:

Tráfico diario inicial en ambos sentidos	
Automóviles	2320
B2	18
B3	14
B4	12
C2	796
C3	101
C4	4
T2S2	5
T2S3	3
T3S2	12
T3S3	18
C2R3	10

## 3. INSTRUCCIONES GENERALES

- El alumno diseñará mediante los siguientes métodos: PCA, AASHTO e IA. Los diseños deberán contemplar diversos espesores de capas que conformen la estructura con el fin de obtener la más óptima. Para ello se hará uso de los datos brindados en 2.2 y 2.3.
- Se elaborarán los metrados y presupuesto para las alternativas de pavimento flexible y rígido para así escoger la alternativa de diseño equivalente más económica.

El trabajo de análisis y diseño presentará la siguiente estructura:

### 3.1. Situación actual

Se analizarán las características del tramo en base a la información de los estudios recolectados, tanto el de tráfico, como el pluviométrico y el de suelos.

### 3.2. Análisis de posibles soluciones

Para una longitud de 1 km., se plantearán las siguientes soluciones en el diseño del pavimento:

#### 3.2.1. Método AASHTO.

Con este método se realizará el diseño tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos rígidos. Para calcular el espesor del pavimento, se hará uso de algunos factores de diseño como la carga por eje simple equivalente (ESAL), datos sobre el ensayo de relación de soporte de California (CBR) para el suelo de la subrasante, la confiabilidad, variabilidad, nivel de servicio, condiciones de drenaje, entre otros.

#### 3.2.2. Método IA.

Analizar los parámetros necesarios para el diseño, como son el ESAL, las condiciones ambientales, el módulo de resiliencia del suelo, entre otros y determinar el espesor necesario de pavimento haciendo uso de las cartas de diseño.

#### 3.2.3. Método PCA.

Analizar los parámetros necesarios para el diseño, como son el número de repeticiones esperadas según el tipo de eje para el periodo de diseño, propiedades de los suelos, entre otros y calcular el espesor necesario del pavimento haciendo un análisis por fatiga y erosión del mismo.

### 3.3. Metrados y análisis de precios unitarios

Los análisis comprenderán el costo de mano de obra, equipos y materiales para cada una de las partidas y subpartidas involucradas en la conformación de la estructura del pavimento de 1 km. de longitud.

El presupuesto de cada uno de los diseños alternativos del pavimento para la comparación económica estará conformado por las siguientes partidas:

- Conformación de la subbase.
- Conformación de la base.
- Capa de rodadura.
- Transporte de materiales.

## 4. ELECCIÓN DE UN DISEÑO DEFINITIVO.

La selección del diseño definitivo se basará en una de las cuatro opciones presentadas anteriormente, considerando una longitud de 1 km, de tal manera que el costo de las capas constituyentes sea el óptimo y asegure un buen desempeño.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El alumno expondrá las conclusiones a las que llegue en la presente tesis, así como recomendaciones para futuros proyectos de tesis.

NOTA  
Extensión máxima: 100 páginas



## ÍNDICE

<b>1. GENERALIDADES</b>	01
1.1. INTRODUCCIÓN	01
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	02
1.2.1. Antecedentes	02
1.2.2. Ubicación del proyecto	03
1.3. OBJETIVOS, ALCANCE Y METODOLOGÍA	04
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	05
2.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO	05
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS	06
2.2.1. Pavimentos flexibles	08
2.2.2. Pavimentos rígidos	11
2.3. DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO	17
2.3.1. Estudio de tráfico	17
2.3.2. Estudio de mecánica de suelos y canteras	18
2.3.2.1. Subrasante	18
2.3.2.2. Subbase granular	19
2.3.2.3. Base granular	21
2.3.3. Estudio pluviométrico y meteorológico	23
<b>3. ESTUDIO DE TRÁFICO</b>	25
3.1. ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL	25
3.2. TASA DE CRECIMIENTO ANUAL	27
3.3. FACTOR DE CARGA EQUIVALENTE POR EJE	28
3.4. TRÁFICO DE DISEÑO	31
<b>4. DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES</b>	36
4.1. MÉTODO AASHTO 1993	36
4.1.1. Variables de diseño	36
4.1.2. Diseño de espesores	44
4.2. MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO	52
4.2.1. Variables de diseño	53
4.2.2. Diseño de espesores	54
<b>5. DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS</b>	62
5.1. MÉTODO AASHTO 1993	62
5.1.1. Variables de diseño	62
5.1.2. Diseño de espesores	69
5.2. MÉTODO PCA	72
5.2.1. Variables de diseño	73
5.2.2. Diseño de espesores	75
<b>6. ANÁLISIS ECONÓMICO</b>	90
6.1. Análisis económico del pavimento flexible	90
6.2. Análisis económico del pavimento rígido	98
6.3. Mantenimiento y elección de la mejor alternativa	103
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	112
<b>8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	116

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	-	Coordenadas UTM (Subtramo 1)	03
Tabla 2	-	Caracterización de la subrasante	18
Tabla 3	-	Requisitos granulométricos de la subbase granular	19
Tabla 4	-	Requisitos de calidad de la subbase granular	20
Tabla 5	-	Caracterización de la subbase	21
Tabla 6	-	Requisitos granulométricos de la base granular	21
Tabla 7	-	Valores mínimos de CBR para base granular	22
Tabla 8	-	Requerimientos para agregado grueso de base granular	22
Tabla 9	-	Requerimientos para agregado fino de base granular	22
Tabla 10	-	Caracterización de la base	23
Tabla 11	-	IMDA por tipo de vehículo	26
Tabla 12	-	Factores de carga equivalente (EALF) en pavimentos flexibles con índice de serviciabilidad (pt) de 3 y número estructural (SN) de 5	29
Tabla 13	-	Factores de carga equivalente (EALF) en pavimentos rígidos con índice de serviciabilidad (pt) de 3 y espesor de losa de 9 pulgadas	30
Tabla 14	-	Pesos reglamentarios y factores de carga equivalente por tipo de vehículo en pavimentos flexibles	30
Tabla 15	-	Pesos reglamentarios y factores de carga equivalente por tipo de vehículo en pavimentos rígidos	31
Tabla 16	-	$\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$ para pavimentos flexibles	32
Tabla 17	-	$\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$ para pavimentos rígidos	32
Tabla 18	-	Valores sugeridos de distribución de carril	33
Tabla 19	-	Porcentaje de vehículos en el carril de diseño	34
Tabla 20	-	Parámetros de diseño para pavimentos flexibles	34
Tabla 21	-	Parámetros de diseño para pavimentos rígidos	34
Tabla 22	-	ESAL para cada tipo de pavimento	35
Tabla 23	-	Valores sugeridos de confiabilidad	37
Tabla 24	-	Valores de desviación estándar normal (ZR) para diferentes valores de confiabilidad	37
Tabla 25	-	Valores recomendados de coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles	43
Tabla 26	-	Espesores mínimos (pulgadas) de carpeta asfáltica y base	46
Tabla 27	-	Número estructural (SN <sub>i</sub> ) asociado al módulo de resiliencia (M <sub>r</sub> ) de la base, subbase y subrasante	47
Tabla 28	-	Alternativas AASHTO de espesores del pavimento flexible (I)	50
Tabla 29	-	Alternativas AASHTO de espesores del pavimento flexible (II)	51
Tabla 30	-	Límites de diseño del módulo resiliente de la subrasante	53
Tabla 31	-	Alternativas de espesores de carpeta asfáltica y base	59
Tabla 32	-	SN asociado a las tres alternativas de diseño	59
Tabla 33	-	Espesores mínimos requeridos de carpeta asfáltica	60
Tabla 34	-	Alternativas IA de espesores de capa del pavimento flexible	60
Tabla 35	-	Valores recomendados de coeficientes de transferencia de carga para varios tipos de pavimentos y diferentes condiciones de diseño	68
Tabla 36	-	Valores recomendados de coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos	69
Tabla 37	-	Parámetros de diseño del espesor de la losa de concreto	71

Tabla 38	- Alternativas AASHTO de espesores de capa del pavimento rígido	71
Tabla 39	- Efecto de la base sobre los valores k de la subrasante	75
Tabla 40	- IMDA (ambos sentidos) y pesos reglamentarios por eje (ton)	76
Tabla 41	- Repeticiones por tipo y peso de cada eje	76
Tabla 42	- Factor de crecimiento para diferentes tasas anuales de crecimiento de tráfico y diferentes periodos de diseño	77
Tabla 43	- Repeticiones esperadas por tipo y peso de cada eje	77
Tabla 44	- Esfuerzo equivalente en pavimento sin berma de concreto (eje simple y tándem)	78
Tabla 45	- Esfuerzo equivalente en pavimento sin berma o con berma de concreto (eje trídem)	79
Tabla 46	- Esfuerzo equivalente y factor de relación de esfuerzo por tipo de eje	79
Tabla 47	- Factor de erosión para ejes simple y tándem en pavimentos de concreto con dowels y sin bermas de concreto	80
Tabla 48	- Factor de erosión para ejes trídem en pavimentos de concreto con dowels, sin bermas y con bermas de concreto	81
Tabla 49	- Factores de erosión por tipo de eje	81
Tabla 50	- Primera iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto	84
Tabla 51	- Segunda iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto	85
Tabla 52	- Tercera iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto	86
Tabla 53	- Cuarta iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto	87
Tabla 54	- Subpartida: Conformación de la subbase granular	90
Tabla 55	- Subpartida: Material de subbase	90
Tabla 56	- Subpartida: Conformación de base granular	91
Tabla 57	- Subpartida: Material de base	91
Tabla 58	- Subpartida: Agregado fino zarandeado para imprimación	91
Tabla 59	- Partida: Conformación de subrasante	91
Tabla 60	- Partida: Subbase granular	92
Tabla 61	- Partida: Base granular	92
Tabla 62	- Partida: Imprimación asfáltica	92
Tabla 63	- Partida: Carpeta asfáltica	92
Tabla 64	- Partida: Transporte de material granular para $d < 1$ km	93
Tabla 65	- Partida: Transporte de material granular para $d > 1$ km	93
Tabla 66	- Partida: Transporte de mezcla asfáltica para $d < 1$ km	93
Tabla 67	- Partida: Transporte de mezcla asfáltica para $d > 1$ km	93
Tabla 68	- Costo por partida en pavimentos flexibles	93
Tabla 69	- Alternativas de diseño del pavimento flexible (AASHTO)	94
Tabla 70	- Costo de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (AASHTO)	94
Tabla 71	- Alternativas de diseño del pavimento flexible (IA)	96
Tabla 72	- Costo de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (IA)	96
Tabla 73	- Partida: Conformación de subrasante	98
Tabla 74	- Partida: Base granular	98
Tabla 75	- Partida: Colocación de guías para pavimentadora	99
Tabla 76	- Partida: Concreto premezclado $f'c$ 350 kg/cm <sup>2</sup>	99
Tabla 77	- Partida: Colocación, Acabado y Texturizado	99
Tabla 78	- Partida: Curado del concreto	100

Tabla 79	- Partida: Barras de unión $\varnothing=5/8''$ @ 0.90m L=0.80m (Junta longitudinal)	100
Tabla 80	- Partida: Dowels $\varnothing=1-1/4''$ @ 0.30m L=0.50m (Junta transversal)	100
Tabla 81	- Partida: Corte de juntas de contracción transversal	101
Tabla 82	- Partida: Corte para caja de sello	101
Tabla 83	- Partida: Sello de juntas longitudinales y transversales	101
Tabla 84	- Partida: Transporte de material granular para $d < 1$ km	102
Tabla 85	- Partida: Transporte de material granular para $d > 1$ km	102
Tabla 86	- Partida: Transporte de mezcla de concreto para $d < 1$ km	102
Tabla 87	- Partida: Transporte de mezcla de concreto para $d > 1$ km	102
Tabla 88	- Costo final del pavimento rígido	103
Tabla 89	- Resumen de actividades de mantenimiento: Pavimento flexible	105
Tabla 90	- Partida: Mantenimiento: Sellado asfáltico	106
Tabla 91	- Partida: Mantenimiento: Fresado y Recapeo 1''	106
Tabla 92	- Subpartida: Fresado de carpeta asfáltica de 1''	106
Tabla 93	- Subpartida: Recapeo de carpeta asfáltica en caliente de 1''	106
Tabla 94	- Resumen de actividades de mantenimiento: Pavimento rígido	107
Tabla 95	- Partida: Mantenimiento: Resellado Juntas	108
Tabla 96	- Subpartida: Retiro de sello en juntas	108
Tabla 97	- Partida: Sellado de Juntas	108
Tabla 98	- Partida: Mantenimiento: Reemplazo Losas	109
Tabla 99	- Subpartida: Demolición de losas de concreto	109
Tabla 100	- Costo (S/.) de mantenimiento por alternativas	109
Tabla 101	- Valor Presente Neto Acumulado (S/.) del pavimento flexible	110
Tabla 102	- Valor Presente Neto Acumulado (S/.) del pavimento rígido	110

## LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1	- Ubicación Carretera de Acceso Nuevo Puerto de Yurimaguas	03
Imagen 2	- Conformación típica del pavimento como elemento estructural	06
Imagen 3	- Principio de distribución de presiones en pavimentos	07
Imagen 4	- Sección de un pavimento flexible convencional	08
Imagen 5	- Sección de un pavimento rígido convencional	11
Imagen 6	- Composición de un pavimento articulado de concreto simple (JPCP)	14
Imagen 7	- Composición de un pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP)	15
Imagen 8	- Composición de un pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP)	16
Imagen 9	- Sección típica pavimento flexible	17
Imagen 10	- Sección típica pavimento rígido	17
Imagen 11	- Coeficiente estructural $a_1$ en función del módulo elástico del concreto asfáltico	40
Imagen 12	- Coeficiente estructural $a_2$ en función de diferentes parámetros de fuerza de la base	41
Imagen 13	- Coeficiente estructural $a_3$ en función de diferentes parámetros de fuerza de la subbase	42
Imagen 14	- Nomograma para el cálculo del número estructural (SN) en pavimentos flexibles	45
Imagen 15	- Procedimiento de diseño de los espesores de las capas de un pavimento flexible	48
Imagen 16	- Sección transversal del pavimento flexible - AASHTO	51
Imagen 17	- Carta de diseño para la carpeta asfáltica en todo su espesor	56
Imagen 18	- Carta de diseño para la carpeta asfáltica y 15 cm de espesor de base	57
Imagen 19	- Carta de diseño para la carpeta asfáltica y 30 cm de espesor de base	58
Imagen 20	- Sección transversal del pavimento flexible - IA	61
Imagen 21	- Carta para estimar el módulo de reacción compuesto asumiendo una profundidad semi-infinita de la capa de soporte	65
Imagen 22	- Carta para modificar el módulo de reacción de la subrasante por la presencia de una capa rígida (estrato rocoso) cercana a la superficie	66
Imagen 23	- Carta para modificar el módulo de reacción de la subrasante por pérdida potencial de soporte de la subbase	67
Imagen 24	- Nomograma para el cálculo del espesor (D) en pavimentos rígidos	70
Imagen 25	- Sección transversal del pavimento rígido - AASHTO	72
Imagen 26	- Módulo de reacción de la subrasante en función del valor de soporte (CBR) del suelo	74
Imagen 27	- Análisis de fatiga: Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzos en pavimentos con y sin bermas de concreto	82
Imagen 28	- Análisis de erosión: Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos sin bermas de concreto	83
Imagen 29	- Sección transversal del pavimento rígido - PCA	87
Imagen 30	- Costo (S/.) de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (AASHTO)	95
Imagen 31	- Costo (S/.) de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (IA)	96
Imagen 32	- Costo (S/.) de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (AASHTO vs IA)	97
Imagen 33	- Valor Presente Neto Acumulado (S/.) Pavimento Flexible vs Pavimento Rígido	111

# 1. GENERALIDADES

## 1.1. INTRODUCCIÓN

A pesar del notable crecimiento económico que ha presenciado el país en los últimos años, el Perú no ha conseguido aún resolver su déficit de infraestructura en lo que concierne a vías de comunicación terrestre. “Este déficit hace del Perú un país no solo incomunicado e invertebrado, sino además lento y moroso en su gestión administrativa, productiva y económica, lo cual retrasa el desarrollo de muchas de sus provincias y preserva así seculares bolsones de pobreza”<sup>1</sup>. El desarrollo y crecimiento de un país, según Vega<sup>2</sup>, se sustenta en la integración de las distintas poblaciones a los mercados nacionales e internacionales para de esta manera fomentar el intercambio sociocultural entre ellas y así permitir potenciar sus ventajas competitivas. Para lograr este objetivo es necesaria la elaboración de un plan de integración sustentado en el desarrollo de nueva infraestructura vial.

El Perú, desde el punto de vista de las vías de comunicación terrestres, presenta un cúmulo de dificultades debido a su territorio accidentado y variado. Sus diferentes accidentes morfológicos constituyen un desafío permanente que acentúa la desintegración nacional; por ello, es de vital importancia la creación de nueva infraestructura vial como parte de un plan por la integración política, social y económica del país.

En ese sentido, surgió la necesidad de construir una carretera que sirviera de acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas el cual cumpliría un rol importante en el desarrollo del comercio nacional e internacional del país. Esta tesis contempla el diseño de un kilómetro de pavimento de dicha carretera considerando dos diferentes opciones; pavimento flexible y pavimento rígido para de esta manera determinar la mejor opción técnico – económica de acuerdo a las variables de diseño que se presentan en el temario de tesis, las

---

<sup>1</sup> Fantozzi, E. (12 de Abril de 2012). Centro de Documentación para la Innovación de la Cadena de Suministro. Recuperado el 04 de Abril de 2015, de Centro de Documentación para la Innovación de la Cadena de Suministro: <http://innovasupplychain.pe>

<sup>2</sup> Vega, J. (Agosto de 2010). Provías Nacional. Recuperado el 04 de Abril de 2015, de Provías Nacional: <http://www.proviasnac.gob.pe>

cuales en su mayoría han sido modificadas para simular un escenario hipotético y diferente al cual realmente existió, pues la carretera actualmente ya se encuentra construida.

## **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

El pavimento que se diseñará corresponde al subtramo 1 de la carretera de acceso de 9.4 kilómetros que interconecta la vía Interoceánica Norte tramo Tarapoto-Yurimaguas con el Nuevo Puerto de Yurimaguas. El subtramo 1 comprende desde el km. 0+000 a 4+300 y en el presente proyecto de tesis se realizará el diseño del pavimento del tramo comprendido entre el km. 1+000 y 2+000.

### **1.2.1. Antecedentes**

Anteriormente, el Terminal Portuario de Yurimaguas, ubicado en la margen izquierda del río Huallaga, solo operaba como terminal local y regional; su movimiento comercial era mínimo, pues no atendía naves de alto bordo, sino exclusivamente unidades menores. El antiguo Terminal Portuario de Yurimaguas se ubicaba como el punto de intercambio modal de productos entre las áreas de las ciudades de Chiclayo y Piura y la región amazónica, en concreto la ciudad de Iquitos; productos industriales y alimentos eran transportados desde Chiclayo y Piura por carretera hasta el Terminal Portuario de Yurimaguas, para ser embarcados y transportados por vía fluvial hasta Iquitos. Asimismo, desde Iquitos, partían por vía fluvial productos como madera aserrada, jebe, yute y mercancías importadas hacia Yurimaguas, para posteriormente ser transportados en camión hasta Chiclayo y Piura.

Debido a ello, se planeó la construcción de un nuevo terminal portuario más moderno y sofisticado, que permitiera mejorar no solo el comercio nacional sino abrir nuevas puertas al comercio internacional con Brasil. Este nuevo Terminal Portuario se ubicaría en la localidad de Nueva Reforma, en la margen izquierda del río Huallaga, a unos 20 km aguas

abajo del antiguo terminal portuario. Es así como surge la necesidad de construir un acceso que conecte la vía Interoceánica Norte tramo Tarapoto-Yurimaguas con el Nuevo Puerto de Yurimaguas mencionado, el cual cumpliría un rol protagónico en el comercio ya que constituiría el nexo entre la vía terrestre y fluvial del comercio, pues permitiría el transporte de la mercadería proveniente del puerto marítimo de Paita, para ser embarcada y proseguir su recorrido, primero por el río Huallaga, luego por el Marañón y finalmente por el Amazonas, rumbo a Iquitos, en el Perú, y Manaus, en Brasil.

Imagen 1 – Ubicación Carretera de Acceso Nuevo Puerto de Yurimaguas



Fuente – Concesionaria Puerto Amazonas S.A.<sup>3</sup>

### 1.2.2. Ubicación del proyecto

El área donde se encuentra el proyecto está ubicada en el departamento de Loreto, provincia del Alto Amazonas, distrito de Yurimaguas. Geográficamente se encuentra en las coordenadas siguientes: 5° 53' (latitud sur), 76°06' (longitud oeste) y a 182 m.s.n.m. (altitud) y posee las siguientes coordenadas UTM del inicio y fin del subtramo 1:

Tabla 1 – Coordenadas UTM (Subtramo 1)

<b>Progresiva (Km)</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
0+000	9,353,032.496	371,330.164
4+300	9,350,961.259	374,676.884

Fuente – Concesionaria Puerto Amazonas S.A.<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Concesionaria Puerto Amazonas S.A. (s.f.). Recuperado el 04 de Abril de 2015, de Concesionaria Puerto Amazonas S.A: <http://www.copam.com.pe>

<sup>4</sup> Concesionaria Puerto Amazonas S.A. (s.f.). Recuperado el 04 de Abril de 2015, de Concesionaria Puerto Amazonas S.A: <http://www.copam.com.pe>

### **1.3. OBJETIVOS, ALCANCE Y METODOLOGÍA**

El objetivo de esta tesis consiste en realizar el diseño del pavimento del tramo comprendido entre el kilómetro 1+000 y 2+000 de la carretera de acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas. Se diseñará dicho pavimento considerando dos tipos: flexible y rígido. El pavimento flexible se diseñará mediante la metodología de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la del Instituto del Asfalto (IA) para luego comparar ambos resultados y escoger la mejor opción. El pavimento rígido será diseñado también mediante dos metodologías: la de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la de la Portland Cement Association (PCA) para luego comparar ambos resultados y escoger la mejor opción. Una vez obtenidos los diseños tanto del pavimento flexible como del rígido se realizará un análisis económico comparativo entre las dos opciones elegidas con el fin de encontrar la estructura más óptima del pavimento. Este análisis económico se realizará tanto para la etapa inicial de construcción como para la etapa de mantenimiento a lo largo de todo el periodo de vida de la estructura.

Es importante resaltar que gran parte de las variables de diseños tales como el conteo vehicular correspondiente al estudio de tráfico y la caracterización de los materiales granulares (subrasante, subbase y base) han sido proporcionadas como parte del temario de tesis para simular un caso hipotético y diferente que el que se presenta en campo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

Un pavimento es un “elemento estructural multicapa, apoyado en toda su superficie, diseñado y construido para soportar cargas estáticas y/o móviles durante un periodo de tiempo predeterminado, durante el que necesariamente deberá recibir algún tipo de tratamiento tendiente a prolongar su vida de servicio”<sup>5</sup>.

Según Rico y Del Castillo<sup>6</sup>, un pavimento puede definirse como el conjunto de capas, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistentes a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito.

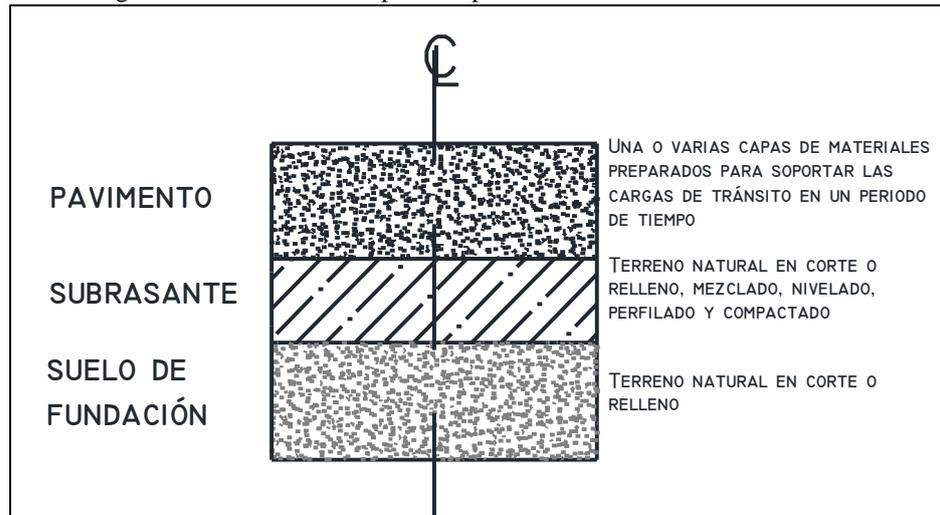
En otras palabras, un pavimento es la superestructura vial que hace posible el tránsito vehicular con la comodidad, seguridad y economía previstas por el proyecto. Los materiales empleados en la construcción de un pavimento ofrecen una gran variedad de posibilidades; por ello, esta estructura puede estar conformada por varias capas. Dichas capas pueden ser de materiales seleccionados sometidos a diversos tratamientos; y su superficie de rodadura puede ser una carpeta asfáltica, una losa de concreto hidráulico o estar formada por acumulaciones de materiales pétreos compactados. Las tecnologías actuales ofrecen una gama muy diversa de secciones estructurales diferentes y depende en gran parte de las condiciones y los requerimientos del proyecto para poder elegir la alternativa correcta de diseño.

---

<sup>5</sup> Vivar, G. (1995). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS (Segunda ed). Lima: Colecciones del Ingeniero Civil, pp. 1

<sup>6</sup> Rico, A., & Del Castillo, H. (2005). LA INGENIERÍA DE SUELOS EN LAS VÍAS TERRESTRES: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas (Vol. 2). Ciudad de México: Limusa, pp. 99

Imagen 2 – Conformación típica del pavimento como elemento estructural



Fuente – Vivar (1995)<sup>7</sup>

## 2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS

Según Vivar<sup>8</sup>, los pavimentos pueden clasificarse, de manera genérica, de acuerdo a los siguientes parámetros:

1. La calidad de los materiales empleados en su construcción: afirmados, estabilizados, aglomerados o mezclas asfálticas y de cemento Portland.
2. El tipo de sollicitación que soportarán a lo largo de su vida de servicio o el uso al que estarán destinados: urbanos, industriales, de carreteras, de aeropuertos, o deportivos.
3. El periodo de vida para el que son diseñados y construidos: temporales y definitivos.
4. **La forma en que distribuyen las cargas al terreno:** Rígidos, flexibles y semirrígidos. Estos dos primeros serán tema de estudio en el desarrollo de la presente tesis.

Pese a que las denominaciones de rígido y flexible parecieran guardar relación con las calidades de los aglomerantes de cemento Portland y asfalto utilizados en la fabricación de ambos pavimentos respectivamente, es posible encontrar pavimentos asfálticos de gran espesor, el cual les confiere una rigidez mucho mayor a la normal; así como también es posible apreciar en los pavimentos de

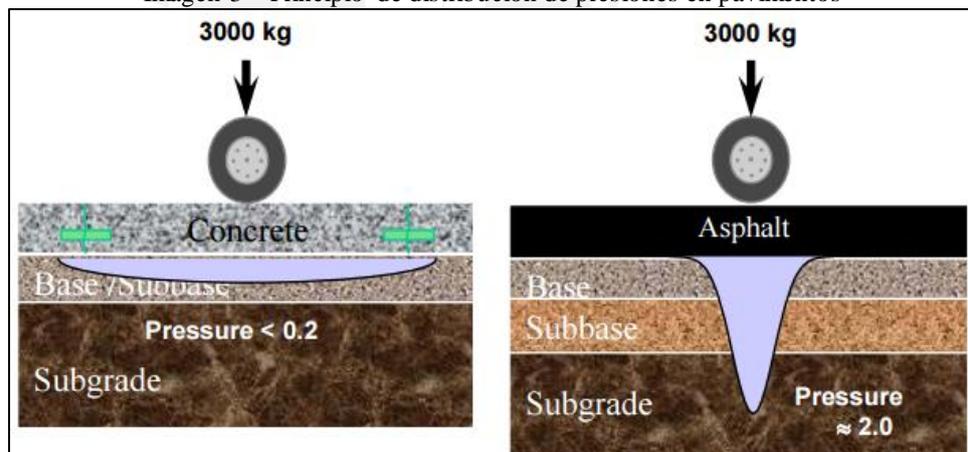
<sup>7</sup> Vivar, G. (1995). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS (Segunda ed). Lima: Colecciones del Ingeniero Civil, pp. 1

<sup>8</sup> Vivar, G. (1995). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS (Segunda ed). Lima: Colecciones del Ingeniero Civil, pp. 1-2

concreto reforzado y en ciertas losas de concreto de cemento Portland, grietas, lo cual indica un comportamiento flexible que difiere grandemente del comportamiento rígido para el que supuestamente fueron diseñadas y construidas.

Por ello, “los pavimentos se denominan flexibles o rígidos por la forma en que transmiten los esfuerzos y deformaciones a las capas inferiores que dependen de la relación de rigideces relativas de las capas. Un pavimento flexible transmite esfuerzos concentrados en una pequeña área, mientras que un pavimento rígido distribuye los esfuerzos en una mayor área”<sup>9</sup>. En la imagen 3 se ilustra el principio de distribución de presiones en los pavimentos flexibles y rígidos. Se conoce que en términos de módulo de elasticidad la relación entre un pavimento flexible y el suelo de subrasante que lo soporta es del orden de 4 a 1, mientras que esa misma relación sube a aproximadamente 265 a 1 en el caso de los pavimentos rígidos.

Imagen 3 – Principio de distribución de presiones en pavimentos



Fuente – Cement Association of Canada (2016)<sup>10</sup>

El pavimento flexible, por tener un módulo de elasticidad semejante al del suelo, concentra las cargas bajo el punto de aplicación (área pequeña de distribución de carga) debido a la baja resistencia al corte de la subrasante; ello induce a presiones grandes en la fundación del pavimento. El pavimento rígido por su elevado módulo de elasticidad respecto del suelo, distribuye las cargas

<sup>9</sup> Menéndez, J. (2012). INGENIERÍA DE PAVIMENTOS: Materiales, Diseño y Conservación (Tercera ed.). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, pp. 13

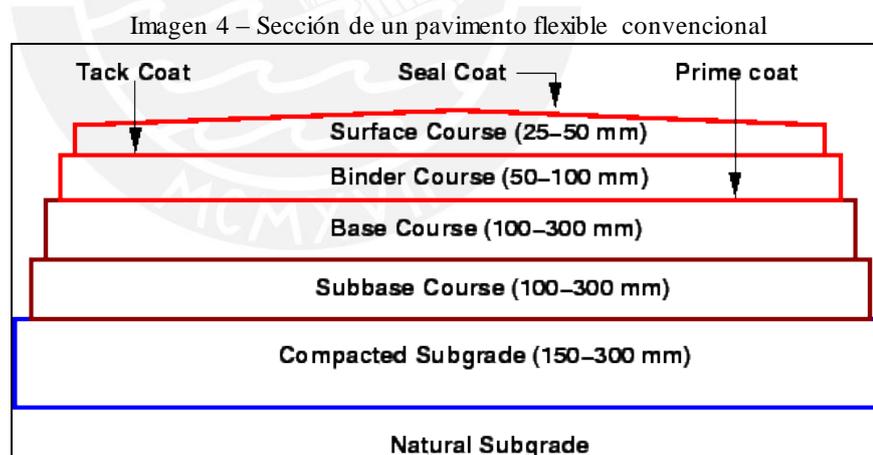
<sup>10</sup> Cement Association of Canada. (2016). CONCRETE, even smarter than you think. Recuperado el 04 de Abril de 2015, de CONCRETE, even smarter than you think: <http://www.cement.ca>

sobre una gran superficie provocando, en consecuencia, bajas presiones sobre la fundación del pavimento.

### 2.2.1. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles son sistemas de capas conformados por materiales caros de alta calidad en la parte superior donde los esfuerzos son altos y materiales baratos y de baja calidad en la parte inferior debido a la degradación de los esfuerzos con la profundidad de las capas.

Según Huang<sup>11</sup>, la sección de un pavimento flexible está conformada, comenzando desde la parte superior, de la siguiente manera: Seal coat (capa de sellado), surface course (capa de rodadura), tack coat (riego de liga), binder course (capa aglutinante), prime coat (capa de imprimación), base course (base), subbase course (subbase), compacted subgrade (subrasante) y natural subgrade (suelo de fundación). En la imagen que se muestra a continuación se puede apreciar la sección descrita.



Fuente – Huang (2004)<sup>12</sup>

- Seal coat; la capa de sellado asfáltico es una delgada capa de asfalto utilizada para proteger la superficie de rodadura del agua y para

<sup>11</sup> Huang, Y. H. (2004). PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall, pp. 8-10

<sup>12</sup> Huang, Y. H. (2004). PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall, pp. 9

proporcionar resistencia al deslizamiento debido al desgaste que sufren los agregados de la capa de rodadura.

- Surface course; la capa de rodadura es la capa en contacto directo con las cargas de tráfico y, en general contiene materiales de calidad superior. Se construye con hormigón asfáltico (HMA) y, las funciones y requisitos que debe cumplir esta capa son: Ser resistente a la distorsión bajo cargas de tráfico, proveer una superficie lisa y resistente al deslizamiento y, ser a prueba del agua para proteger la base y subbase del efecto de debilitamiento del mismo.
- Binder course; la capa aglutinante, también conocido como la capa base del asfalto, es la capa asfáltica colocada debajo de la capa de rodadura. Existen dos razones por las cuales se coloca esta capa en adición a la capa de rodadura. La primera es que el hormigón asfáltico (HMA) tiene un espesor muy grande para ser compactado en una sola capa por lo que debe ser puesto en dos. La segunda razón es que esta capa está compuesta por agregados más grandes y menos asfalto debido a que no requiere de una calidad de composición tan alta como la carpeta de rodadura por lo que el uso de ella resulta en un diseño más económico.
- Tack coat; el riego de liga es por lo general emulsión de asfalto diluido en agua que proporciona una unión adecuada entre las dos capas asfálticas. Los riegos de liga también son usados para unir un pavimento asfáltico a un pavimento de concreto (PCC) o a un pavimento asfáltico antiguo. Los tres principales requerimientos con los que debe contar un riego de liga son: Debe ser una capa muy delgada, debe cubrir uniformemente toda la superficie a pavimentar y debe poder “romper” antes que el hormigón asfáltico (HMA) sea puesto.
- Prime coat; la capa de imprimación es una delgada capa de asfalto tipo cut-back de baja viscosidad que se aplica a una superficie absorbente como la base granular sobre la que se coloca la capa aglutinante. Su función es unir la base a la capa asfáltica y lo que lo

diferencia del riego de liga es que este último no requiere de la penetración del asfalto en la capa inferior mientras que la capa de imprimación sí lo hace; además de conectar los espacios vacíos y formar una superficie impermeable.

- Base course and subbase course; la base es la capa que se encuentra inmediatamente después de la capa aglutinante. Es el principal elemento estructural en los pavimentos flexibles y puede estar compuesto de agregados aglomerados con asfalto (como en el caso de las bases negras y estabilizadas), de agregados aglomerados con cemento Portland (como en el caso de las bases estabilizadas con cemento, o las bases de concreto compactado con rodillo); o de suelos sin aglomerar como en el caso de las bases de grava.

La subbase es la capa que se encuentra debajo de la base. Cumple la función de capa drenante, anticontaminante y resistente. Como capa drenante, facilita la evacuación lateral de las aguas provenientes del nivel freático, de aniegos o de infiltración; como anticontaminante, impide el arrastre de los finos de la subrasante hacia la base; así como impide que las gravas y las piedras de la base se introduzcan en una subrasante blanda; y como capa resistentes debido a su espesor y su capacidad de distribuir las cargas de tránsito sobre la subrasante.

La razón por la cual se usan dos capas de material granular diferente es por razones económicas. En vez de usar materiales más costosos en la composición de la capa granular completa, se prefiere usar materiales de menor calidad en la composición de la subbase y materiales de mayor calidad en la base.

- Subgrade; la subrasante es la porción superior del suelo de fundación, que ha sido nivelada, perfilada y compactada y que servirá de apoyo a las diferentes capas del pavimento.

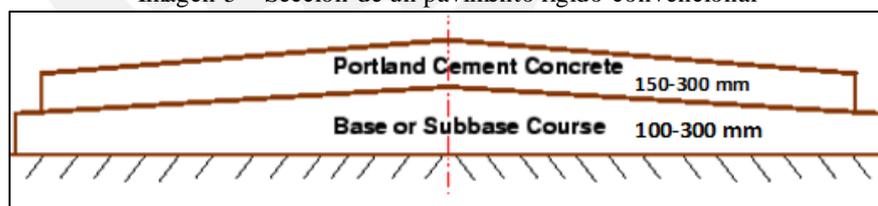
### 2.2.2. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos se encuentran constituidos por una losa de concreto apoyada directamente sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado. Como solo existe una capa entre la losa de concreto y la subrasante, esta puede ser llamada base. La necesidad de utilizar la base surge solo si la subrasante no tiene las condiciones necesarias como para resistir las cargas de tráfico; es decir, que no actúe como un soporte adecuado.

Según Montejo<sup>13</sup>, la capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento.

Según Huang<sup>14</sup>, la sección de un pavimento rígido se encuentra conformado por 2 capas como se observa a continuación en la siguiente imagen:

Imagen 5 – Sección de un pavimento rígido convencional



Fuente – Huang (2004)<sup>15</sup>

- Portland Cement Concrete; la losa de concreto es la capa en contacto con las cargas de tráfico. Las funciones de la losa en los pavimentos rígidos son las mismas de la carpeta asfáltica en los

<sup>13</sup> Montejo, A. (2002). INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS (Vol. 1). Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones, pp. 5

<sup>14</sup> Huang, Y. H. (2004). PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall, pp. 11-12

<sup>15</sup> Huang, Y. H. (2004). PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall, pp. 11

flexibles, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen.

- Base or subbase course; los primeros pavimentos rígidos eran contruidos directamente sobre la subrasante sin hacer uso de una base. Como el peso y el volumen de tráfico aumentó, el fenómeno de bombeo empezó a ocurrir y el uso de un base granular se volvió popular. A pesar de que el uso de una base granular pueda reducir los esfuerzos sobre el concreto, es poco económico construir una con ese fin pues el mismo esfuerzo en el concreto puede obtenerse sin hacer uso de dicha carpeta y solamente aumentando el espesor de la capa de concreto. Las principales funciones que desarrolla una base granular son las siguientes:

1. Control del bombeo; se entiende por bombeo a la fluencia del material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración del agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licúa el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.

Existen tres factores que deben ocurrir simultáneamente para que exista bombeo: El material debajo de la losa de concreto debe estar saturado (por ello, un buen drenaje es una de las formas más eficientes para prevenir el bombeo), debe existir una carga de tránsito pesada y frecuente (incluso bajo cargas muy pesadas, el bombeo únicamente ocurre por la repetición continua de dichas cargas); y por último, el material debajo de la losa de concreto debe ser erosionable.

2. Mejoramiento del drenaje; la base, al ser un material granular posee un mayor número de vacíos lo cual facilita el drenaje del agua fuera de dicha capa.
3. Control de cambios volumétricos; la base controla el cambio de volumen de la subrasante al tener la capacidad de

drenar el agua y evitar que esta ingrese a dicha capa y de esta manera disminuye la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento.

4. Facilidad de construcción, la base puede ser usada como plataforma de trabajo ya que puede mantener la superficie limpia y seca lo cual facilita los trabajos de construcción.

Como se puede observar, siempre existirá la necesidad de construir una carpeta granular que acompañe a la losa de concreto debido a las facilidades expuestas anteriormente.

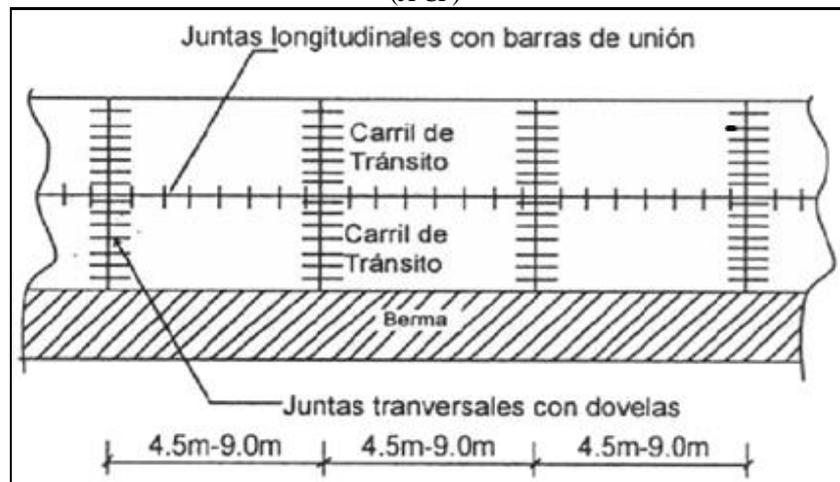
Los pavimentos rígidos, según Huang<sup>16</sup> pueden ser clasificados en cuatro tipos: Pavimento articulado de concreto simple (JPCP), pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP), pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP) y pavimento de concreto preesforzado (PCP).

- Pavimento articulado de concreto simple (JPCP); este es el tipo más común de pavimento rígido. El pavimento articulado de concreto simple controla las grietas dividiendo el pavimento en losas individuales separadas por juntas de contracción separadas entre 4.5 y 9.0 m. JPCP no utiliza ningún tipo de refuerzo de acero pero utiliza pasadores o dovelas (dowels) en las juntas transversales y barras de unión (tie bars) en las juntas longitudinales. Existe la posibilidad de prescindir del uso de los dowels; en este caso, la transferencia de carga se logra a través de la trabazón (interlock) de los agregados entre las caras agrietadas debajo de las juntas formadas. Para que esta transferencia sea efectiva, es necesario que se use un espaciamiento corto entre juntas.

---

<sup>16</sup> Huang, Y. H. (2004). PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall, pp. 14-16

Imagen 6 – Composición de un pavimento articulado de concreto simple (JPCP)



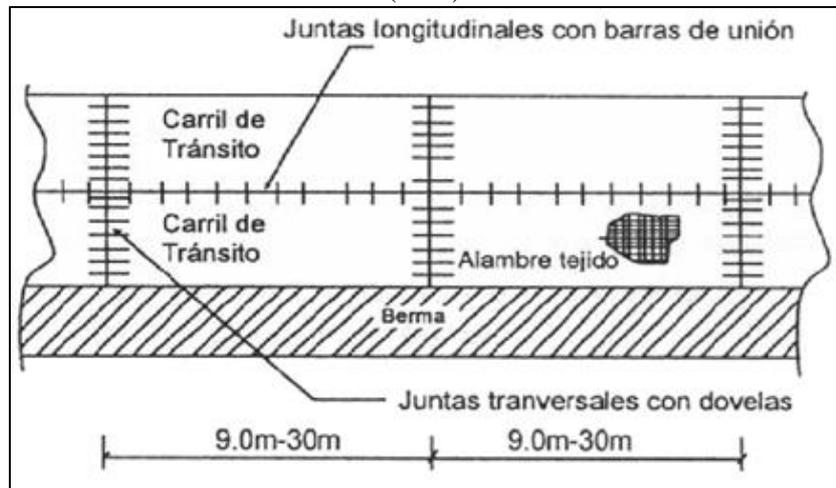
Fuente – Menéndez (2012)<sup>17</sup>

- Pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP); el acero de refuerzo no aumenta la capacidad portante de la estructura; sin embargo, sí permite espaciar las juntas un poco más (alrededor de 9.0 a 30.0m). El refuerzo de acero está diseñado para sostener firmemente juntas las grietas transversales que se desarrollan en la losa. Debido al gran espaciamiento entre paneles, pasadores y barras de unión también se utilizan en todas las juntas transversales y longitudinales, respectivamente. La cantidad de acero de refuerzo necesario incrementa con el aumento del espaciamiento de las juntas; sin embargo, el número de juntas y dowels a usarse decrece cuando esto sucede. De acuerdo a Huang<sup>18</sup>, se recomienda un espaciamiento máximo de juntas de 12.2 m lo cual garantiza el diseño más económico para el pavimento en términos de uso del acero de refuerzo, de las juntas y de los dowels.

<sup>17</sup> Menéndez, J. (2012). INGENIERÍA DE PAVIMENTOS: Materiales, Diseño y Conservación (Tercera ed.). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, pp. 244

<sup>18</sup> Huang, Y. H. (2004). PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall, pp. 15

Imagen 7 – Composición de un pavimento articulado de concreto reforzado (JRCP)

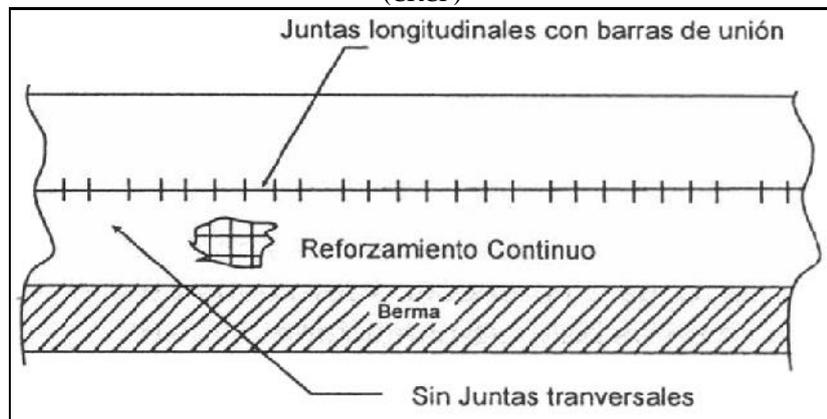


Fuente – Menéndez (2012)<sup>19</sup>

- Pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP); este tipo de pavimento no requiere juntas de contracción y permite la formación de grietas transversales que se mantienen juntas con el acero de refuerzo continuo. Las grietas se forman típicamente a intervalos de 1.1 hasta 2.4 m. Antiguamente el diseño CRCP consistía de una losa de concreto de aproximadamente 80% del espesor de un diseño JPCP; sin embargo la tendencia actual es hacer el diseño CRCP del mismo espesor que JPCP. El acero de refuerzo solo es útil para controlar el espaciamiento y ancho de las grietas que se forman mas no como contribución estructural al pavimento.

<sup>19</sup> Menéndez, J. (2012). INGENIERÍA DE PAVIMENTOS: Materiales, Diseño y Conservación (Tercera ed.). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, pp. 244

Imagen 8 – Composición de un pavimento continuo de concreto reforzado (CRCP)



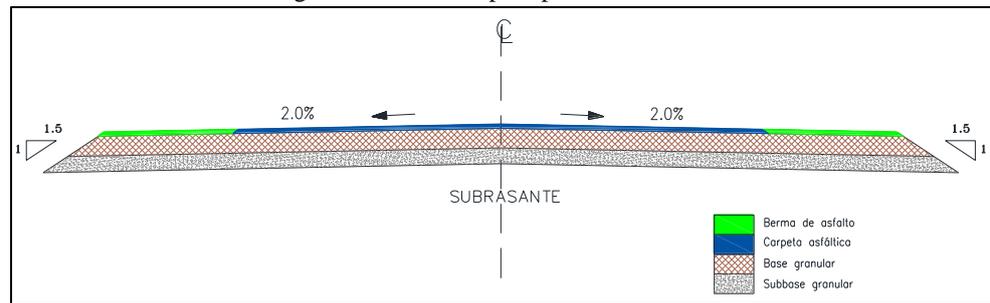
Fuente – Menéndez (2012)<sup>20</sup>

- Pavimento de concreto preesforzado (PCP); como es sabido, el concreto es débil a los esfuerzos de tracción pero fuerte a los esfuerzos de compresión. La preaplicación de un esfuerzo de compresión al concreto reduce los esfuerzos de tracción causados por las cargas de tráfico y por ende se reduce el espesor de la losa de concreto. Los pavimentos de concreto preesforzado tienen menos posibilidades de fisurarse y tienen un menor número de juntas transversales por lo que resulta en un menor costo de mantenimiento y mayor vida útil de la estructura.

En el desarrollo de la presente tesis se considerará el uso de una subrasante, subbase granular, base granular y carpeta asfáltica para el caso del pavimento flexible; y el uso de una subrasante, base granular y losa de concreto para el caso del pavimento rígido tal y como se observa en las imágenes a continuación:

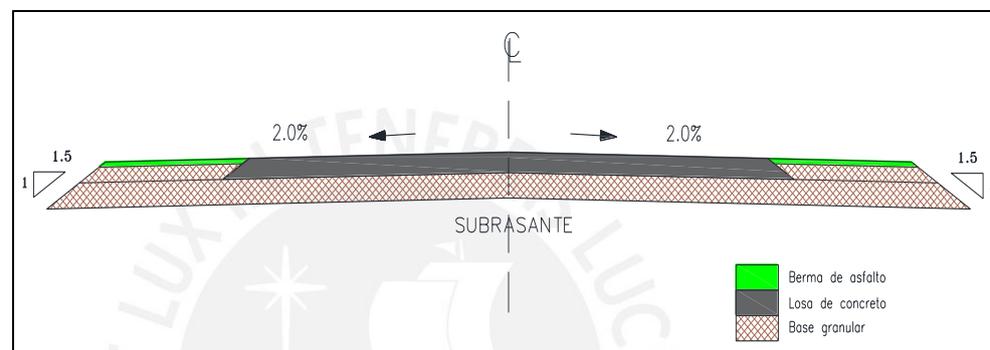
<sup>20</sup> Menéndez, J. (2012). INGENIERÍA DE PAVIMENTOS: Materiales, Diseño y Conservación (Tercera ed.). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, pp. 244

Imagen 9 – Sección típica pavimento flexible



Fuente – Elaboración propia

Imagen 10 – Sección típica pavimento rígido



Fuente – Elaboración propia

## 2.3. DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO

Existen estudios técnicos que son necesarios realizar debido a que proveen las principales variables que deben considerarse para el diseño, construcción y el comportamiento de las estructuras del pavimento, y estos son:

### 2.3.1. Estudio de tráfico

En el diseño de los pavimentos, el dato más importante a determinar es el flujo vehicular; es decir, los tipos de vehículos que transitarán en la zona y la frecuencia con que lo harán. El objetivo del estudio de tráfico es el de expresar este flujo vehicular en términos de un parámetro conocido como ESAL (Equivalent Single Axle Load) o carga equivalente de eje simple que representa la sumatoria del total de repeticiones por día de todos los grupos de carga durante el periodo de diseño del pavimento, para el caso de la metodología de la AASHTO.

En el capítulo 3 se explicará de manera detallada el cálculo del ESAL correspondiente al estudio de tráfico; tanto para el pavimento flexible como para el pavimento rígido. Cabe resaltar que para el caso de la metodología de diseño de la PCA el parámetro del tráfico a ser usado no es el ESAL sino, el número de repeticiones esperadas por cada tipo de eje en todo el periodo de diseño del pavimento.

### 2.3.2. Estudio de mecánica de suelos y canteras

Los estudios de mecánica de suelos sirven para determinar uno de los parámetros de diseño más importantes; la capacidad de soporte de la subrasante (módulo de resiliencia y módulo de reacción de la subrasante, para pavimentos flexibles y rígidos respectivamente), mientras que los estudios de canteras sirven para caracterizar el material granular que será usado como subbase y base del pavimento.

#### 2.3.2.1. Subrasante

Como dato de tema de tesis se tiene el siguiente cuadro resumen de la caracterización de la subrasante:

Tabla 2 – Caracterización de la subrasante

Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Proctor Estándar		CBR (95% MDS)
		OCH*	MDS**	
CL	A-7-5 (4)	14.6%	1.90 gr/cm <sup>3</sup>	6%
*Óptimo contenido de humedad **Máxima densidad seca				

Fuente – Tema de tesis

Como se puede observar, la subrasante está conformada por arcillas de mediana plasticidad. De acuerdo al MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones), se considera material apto para la capa de subrasante suelos con CBR mayor o igual a 6%. En este caso, el suelo de la subrasante tiene un CBR de 6%, por lo que no se considerará ningún tipo de reemplazo o mejoramiento del suelo de la subrasante. Como se mencionó

anteriormente, el estudio de mecánica de suelos sobre la subrasante era de importancia pues servía para obtener la capacidad de soporte de la misma (módulo de resiliencia y módulo de reacción, para pavimentos flexibles y rígidos respectivamente) haciendo una correlación con el ensayo de CBR.

Para el caso de los pavimentos flexibles, el módulo de resiliencia (Mr) se halla haciendo uso de la siguiente fórmula de acuerdo al AASHTO 2015<sup>21</sup>:

$$Mr \text{ (psi)} = 2555 \times \text{CBR}(\%)^{0.64}$$

De manera que, considerando un CBR de 6% se tiene un Mr de 8,043 psi. Este valor será usado para el diseño de los pavimentos flexibles tanto por la metodología AASHTO como por la metodología del Instituto del Asfalto.

Para el caso de los pavimentos rígidos la metodología de la AASHTO y la metodología de la PCA presentan algunas diferencias entre sí en el cálculo del módulo de reacción de la subrasante por lo que este punto se desarrollará a detalle en el capítulo de diseño por dichas metodologías.

### 2.3.2.2. Subbase granular

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el material de la subbase debe ajustarse a una de las franjas granulométricas indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 3 – Requisitos granulométricos de la subbase granular

Tamiz	% Pasante en peso			
	Gradación A*	Gradación B	Gradación C	Gradación D

<sup>21</sup> AASHTO. (2015). MECHANISTIC EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE (MEPDG). United States of America.

2''	100	100	-	-
1''	-	75-95	100	100
3/8''	30-65	40-75	50-85	60-100
#4	25-55	30-60	35-65	50-85
#10	15-40	20-45	25-50	40-70
#40	8-20	15-30	15-30	25-45
#200	2-8	5-15	5-15	8-15
* En zonas cuya altitud sea igual o superior a 3000 msnm				

Fuente - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)<sup>22</sup>

Además el material también deberá cumplir con los siguientes requisitos de calidad:

Tabla 4 – Requisitos de calidad de la subbase granular

Ensayo	Norma MTC	Requerimiento	
		<3000 msnm	≥3000 msnm
Abrasión	MTC E 207	50 % máx.	50 % máx.
CBR (100% MDS)	MTC E 132	40 % mín.	40 % mín.
Límite Líquido	MTC E 110	25 % máx.	25 % máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	6 % máx.	4 % máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	25% mín.	35% mín.
Sales Solubles	MTC E 219	1% máx.	1% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	20 % máx.	20 % máx.

Fuente - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)<sup>23</sup>

Sin embargo, como dato de tema de tesis se tiene el siguiente cuadro resumen de la caracterización del material de subbase, asumiendo que la cantera a usarse en este proyecto cuenta con material de las siguientes características:

<sup>22</sup> Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). MANUAL DE CARRETERAS: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. Lima, pp. 360

<sup>23</sup> Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). MANUAL DE CARRETERAS: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. Lima, pp. 360

Tabla 5 – Caracterización de la subbase

Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Proctor Modificado		CBR (100% MDS)
		OCH*	MDS**	
SC	A-2-6	8.1%	1.95 gr/cm <sup>3</sup>	29%
*Óptimo contenido de humedad **Máxima densidad seca				

Fuente – Tema de tesis

Como se puede observar el material de la subbase a emplear, para el diseño del pavimento, será una arena arcillosa con un CBR de 29%, a pesar de las recomendaciones del MTC de considerar un CBR mínimo de 40%.

### 2.3.2.3. Base granular

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el material de la base debe ajustarse a una de las franjas granulométricas indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 6 – Requisitos granulométricos de la base granular

Tamiz	% Pasante en peso			
	Gradación A*	Gradación B	Gradación C	Gradación D
2''	100	100	-	-
1''	-	75-95	100	100
3/8''	30-65	40-75	50-85	60-100
#4	25-55	30-60	35-65	50-85
#10	15-40	20-45	25-50	40-70
#40	8-20	15-30	15-30	25-45
#200	2-8	5-15	5-15	8-15
* En zonas cuya altitud sea igual o superior a 3000 msnm				

Fuente - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)<sup>24</sup>

<sup>24</sup> Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). MANUAL DE CARRETERAS: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. Lima, pp. 370

Además los valores mínimos del CBR del material de la base dependerán del tipo de tráfico presente en la zona:

Tabla 7 – Valores mínimos de CBR para base granular

Tipo de tráfico	ESAL	CBR (100% MDS)
Ligero y Medio	$\leq 5 \times 10^6$ ESAL	Mín. 80%
Pesado	$> 5 \times 10^6$ ESAL	Mín. 100%

Fuente - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)<sup>25</sup>

Por otro lado, también existen requerimientos tanto para el agregado grueso (materiales retenidos en la malla N°4), como para el agregado fino (materiales pasantes de la malla N°4). Estos requerimientos se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 8 – Requerimientos para agregado grueso de base granular

Ensayo	Norma MTC	Requerimiento	
		<3000 ms nm	≥3000 ms nm
Partículas con una cara fracturada	MTC E 210	80 % mín.	80 % mín.
Partículas con dos caras fracturadas	MTC E 210	40 % mín.	50 % mín.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40 % máx.	40 % máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	15 % máx.	15 % máx.
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.5 % máx.
Pérdida con Sulfato de Magnesio	MTC E 209	-	18 % máx.

Fuente - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)<sup>26</sup>

Tabla 9 – Requerimientos para agregado fino de base granular

Ensayo	Norma MTC	Requerimiento	
		<3000 ms nm	≥3000 ms nm
Índice de Plasticidad	MTC E 111	4 % máx.	2 % máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	35 % mín.	45 % mín.

<sup>25</sup> Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). MANUAL DE CARRETERAS: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. Lima, pp. 370

<sup>26</sup> Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). MANUAL DE CARRETERAS: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. Lima, pp. 371

Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.5 % máx.
Pérdida con Sulfato de Magnesio	MTC E 209	-	15%

Fuente - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013)<sup>27</sup>

Sin embargo, como dato de tema de tesis se tiene el siguiente cuadro resumen de la caracterización del material de base, asumiendo que la cantera a usarse en este proyecto cuenta con material chancado de las siguientes características:

Tabla 10 – Caracterización de la base

Tipo de material	Proctor Modificado		CBR (100% MDS)
	OCH*	MDS**	
Piedra chancada tipo B	6.3%	2.16 gr/cm <sup>3</sup>	112%
*Óptimo contenido de humedad **Máxima densidad seca			

Fuente - Tema de tesis

Como se puede observar el material de la base a emplear, para el diseño del pavimento, será una piedra chancada tipo B con un CBR de 112%, lo cual cumple con las recomendaciones del MTC de considerar un CBR mínimo de 80% para tráfico ligero o mediano, o de 100% para tráfico pesado.

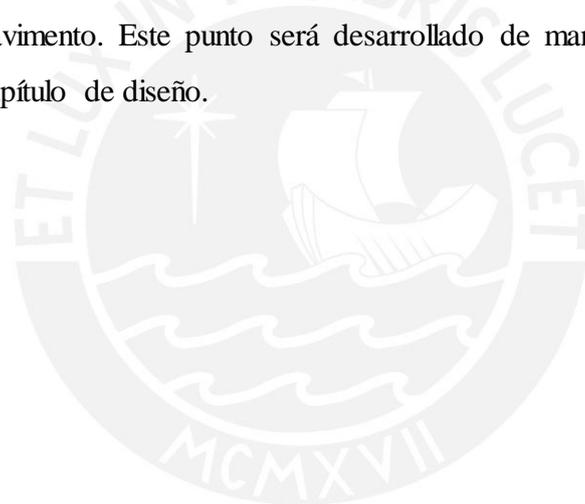
### 2.3.3. Estudio pluviométrico y meteorológico

De acuerdo a los estudios realizados por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), el clima de Yurimaguas es clasificado como tropical; es decir, existen precipitaciones abundantes o regulares durante todo el año (superiores a 1500 o 2000 mm). En el diseño de pavimentos por la metodología AASHTO existe una variable a definir conocida como coeficiente de drenaje el cual depende del porcentaje de tiempo que el pavimento se encuentra expuesto a niveles cercanos a la saturación. Este porcentaje varía en valores de menores a 1%, entre 1% y

<sup>27</sup> Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). MANUAL DE CARRETERAS: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. Lima, pp. 371

5%, entre 5% y 25% y valores mayores a 25%. Por lo mencionado anteriormente, se concluye que el porcentaje de tiempo de exposición que el pavimento se encontrará expuesto a niveles cercanos a la saturación será de mayor a 25% debido a las abundantes o regulares precipitaciones durante todo el año en la zona. Este punto será desarrollado de manera más específica en el capítulo de diseño.

Así mismo, en Yurimaguas se reporta una temperatura media anual de 26.5° C donde el mes más frío reporta una temperatura mínima de 26° C y el mes más caluroso, una temperatura máxima de 27°C<sup>28</sup>. En el diseño de pavimentos por la metodología del Instituto del Asfalto (IA), se hace uso de unas cartas de diseño que dependen justamente de la temperatura media anual de la zona para hacer la elección de los espesores del pavimento. Este punto será desarrollado de manera más específica en el capítulo de diseño.



---

<sup>28</sup> SENAMHI – Oficina de Estadística. Recuperado el 04 de Abril de 2015 de SENAMHI: [www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe)

### 3. ESTUDIO DE TRÁFICO

El tráfico es uno de los factores más relevantes en el diseño del pavimento. Su correcta determinación depende de muchas variables que pueden conducir a una estimación inadecuada del mismo. El método utilizado para el cálculo del tráfico en la presente tesis corresponde a la transformación de los diferentes tipos de vehículos en un eje estándar equivalente (EALF), para posteriormente calcular el número de repeticiones de ejes equivalentes en el periodo de diseño del pavimento (ESAL). El valor del ESAL será usado para el diseño por la metodología AASHTO y la del Instituto del Asfalto. Se presentan a continuación los resultados correspondientes al estudio de tráfico.

#### 3.1. ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL

El índice medio diario anual (IMDA) es el valor numérico estimado de tráfico vehicular en un determinado tramo de la red vial en un año. Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones<sup>29</sup>, el IMDA es el resultado de los conteos volumétricos y clasificación vehicular en campo en una semana, y un factor de corrección que estime el comportamiento anualizado del tráfico de pasajeros y mercancías. Se obtiene haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{IMDA} = \text{IMDS} \times \text{FC}$$

Donde:

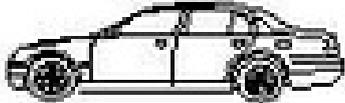
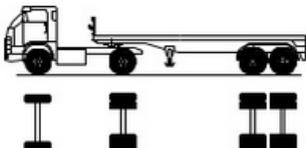
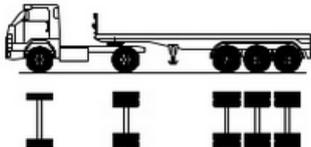
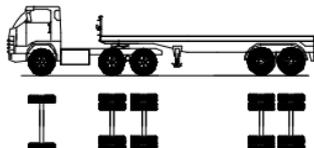
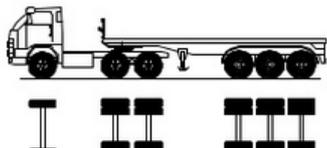
- IMDS representa el índice medio diario semanal o promedio de tráfico diario semanal
- FC representa el factor de corrección estacional

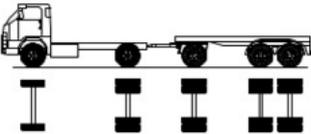
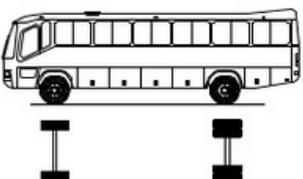
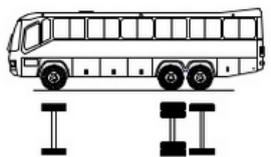
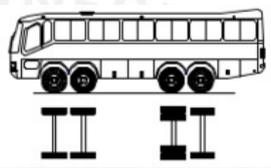
Se tuvo, como dato de tema de tesis, el IMDA por tipo de vehículo, clasificado de acuerdo al Reglamento Nacional de Tránsito del MTC, como se observa a continuación:

---

<sup>29</sup> Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (s.f.). ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL. Recuperado el 15 de Setiembre de 2015, de ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL: <http://mtcgeo2.mtc.gob.pe>

Tabla 11 – IMDA por tipo de vehículo

Configuración vehicular	Descripción gráfica	IMDA (vehículos/día)
Automóviles		2,320
C2		796
C3		101
C4		4
T2S2		5
T2S3		3
T3S2		12
T3S3		18

C2R3		10
B2		18
B3-1		14
B4-1		12
<b>TOTAL</b>		<b>3,313</b>

Fuente – Tema de tesis

### 3.2. TASA DE CRECIMIENTO ANUAL

La tasa de crecimiento es un factor que se estima en base a las proyecciones de crecimiento poblacional y económico en el área de influencia del tramo de la carretera, lo cual se reflejará en el incremento del tráfico y también en la modificación de los tipos de vehículos que circularán por el tramo. La tasa de crecimiento anual se determina de acuerdo al tipo de vehículo y haciendo uso de las siguientes fórmulas:

Vehículos de carga:  $r_{VC} = r_{PBI} \times E_{VC}$

Ómnibus:  $r_O = r_{PBI} \times E_O$

Vehículos ligeros:  $r_{VL} = r_{pob} \times r_{percápita} \times E_{VL}$

Donde:  $r_{VC}$  es la tasa de crecimiento anual de vehículos de carga,  $r_{PBI}$  es la tasa de crecimiento del PBI,  $E_{VC}$  es la elasticidad de la demanda del tráfico de vehículos de carga,  $r_O$  es la tasa de crecimiento anual de ómnibus,  $E_O$  es la elasticidad de la demanda del tráfico de ómnibus,  $r_{VL}$  es la tasa de crecimiento

anual de vehículos ligeros, camioneta rural y micros,  $r_{pob}$  es la tasa de crecimiento anual poblacional,  $r_{percápita}$  es la tasa de crecimiento anual de PBI per cápita y  $E_{VL}$  es la elasticidad de demanda del tráfico de vehículos ligeros, camioneta rural y micros.

De acuerdo al Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos del MTC, la tasa de crecimiento anual normalmente se encuentra entre 2% y 6%. Para el desarrollo del presente trabajo, se tuvo como dato de tema de tesis una tasa de crecimiento anual, para todo tipo de vehículo, de 4.18 %.

### 3.3. FACTOR DE CARGA EQUIVALENTE POR EJE

El factor de carga equivalente por eje, EALF, representa el daño relativo producido en el pavimento por el paso de un determinado eje, en comparación al daño que produce un eje estándar de 18 kip (80 KN). Este procedimiento se realiza con la finalidad de homologar el efecto que tendrían los diferentes tipos de vehículos que transitan sobre un pavimento.

A continuación se presenta las ecuaciones de regresión usadas para el cálculo del EAFI según el AASHTO para pavimentos flexibles:

$$a) \log \frac{W_{tx}}{W_{t18}} = 4.79 \log (18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$b) G_t = \log \left( \frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right)$$

$$c) \beta_x = 0.40 + \frac{0.081 (L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}}$$

Donde  $W_{tx} / W_{t18}$  es el factor de carga equivalente por eje,  $L_x$  es la carga por eje en kips,  $L_2$  es el factor que depende del tipo de eje (1 para ejes simples, 2 para ejes tandem y 3 para ejes tridem),  $p_t$  es el índice de serviciabilidad final, SN es el número estructural de diseño,  $G_t$  es función de  $p_t$  y  $\beta_{18}$  es el valor que toma  $\beta_x$  cuando  $L_x$  es igual a 18 y  $L_2$  es igual a 1.

Así mismo las ecuaciones de regresión usadas para el cálculo del EAFI según el AASHTO para pavimentos rígidos son las siguientes:

$$a) \log \frac{W_{tx}}{W_{t18}} = 4.62 \log (18 + 1) - 4.62 \log(L_x + L_2) + 3.28 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$b) G_t = \log \left( \frac{4.5 - p_t}{4.5 - 1.5} \right)$$

$$c) \beta_x = 1.00 + \frac{3.63 (L_x + L_2)^{5.20}}{(D + 1)^{8.46} L_2^{3.52}}$$

Donde todas las variables usadas tienen el mismo significado que en el caso de pavimentos flexibles a excepción de la variable D que no se encuentra definida y que representa el espesor de la losa de concreto.

Tomando en cuenta que el periodo de diseño tanto para el pavimento flexible como para el rígido es de 15 años y considerando que la carretera de acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas es parte de la carretera IIRSA Norte y que esta última pertenece a la red vial internacional, se escogerá un nivel de serviciabilidad final ( $p_t$ ) de 3, es decir de regular a buena. Así mismo, según Huang<sup>30</sup>, por recomendación de la AASHTO, se usará un número estructural (SN) de 5 y un predimensionamiento en el espesor de losa de concreto correspondiente a 9 pulgadas para el caso de pavimentos rígidos.

Debido a que el uso de las fórmulas presentadas anteriormente no es de fácil manejo, para el cálculo del EALF se usarán las tablas proporcionadas por la guía de la AASHTO derivadas de dichas fórmulas.

De esta manera, tanto para pavimentos flexibles como rígidos y teniendo en cuenta los tipos de ejes y pesaje que se presentan en la distribución vehicular descrita anteriormente, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 12 – Factores de carga equivalente (EALF) en pavimentos flexibles con índice de serviciabilidad (pt) de 3 y número estructural (SN) de 5

Eje	Peso máximo (ton)	Peso máximo (kips)	EALF*
Simple	7	15.4	0.573
Simple	11	24.3	2.710
Tándem	16	35.3	1.289

<sup>30</sup> Huang, Y. H. (2004). PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall, pp. 257-264

Tándem	18	39.7	1.932
Trídem	23	50.7	1.327
Trídem	25	55.1	1.781

Fuente – American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>31</sup>

Tabla 13 – Factores de carga equivalente (EALF) en pavimentos rígidos con índice de serviciabilidad (pt) de 3 y espesor de losa de 9 pulgadas

Eje	Peso máximo (ton)	Peso máximo (kips)	EALF*
Simple	7	15.4	0.529
Simple	11	24.3	3.406
Tándem	16	35.3	2.192
Tándem	18	39.7	3.456
Trídem	23	50.7	2.978
Trídem	25	55.1	4.067

Fuente – American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>32</sup>

\* Valores EALF han sido calculados por interpolación de las tablas de la guía AASHTO de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente.

Una vez determinados los EALF por tipo y peso de eje, se procede a determinar el EALF por cada tipo de vehículo haciendo una sumatoria de los EALF de los ejes que los componen. De esta manera obtenemos los siguientes resultados para pavimentos flexibles y rígidos:

Tabla 14 – Pesos reglamentarios y factores de carga equivalente por tipo de vehículo en pavimentos flexibles

Vehículo	Peso máximo (ton)					EALF				$\Sigma$ EALF
	Eje delantero (0°)	Ejes posteriores			0°	1°	2°	3°		
		1°	2°	3°						
Automóviles	.9	.9			2E-4	2E-4			4E-4	
C2	7	11			0.573	2.710			3.283	
C3	7	18			0.573	1.932			2.505	
C4	7	23			0.573	1.327			1.900	
T2S2	7	11	18		0.573	2.710	1.932		5.215	
T2S3	7	11	25		0.573	2.710	1.781		5.064	
T3S2	7	18	18		0.573	1.932	1.932		4.437	
T3S3	7	18	25		0.573	1.932	1.781		4.286	
C2R3	7	11	11	18	0.573	2.710	2.710	1.932	7.925	
B2	7	11			0.573	2.710			3.283	
B3-1	7	16			0.573	1.289			1.862	

<sup>31</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. D9-D11

<sup>32</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. D18-D20

<i>B4-1</i>	7+7	16			1.146	1.289			2.435
-------------	-----	----	--	--	-------	-------	--	--	-------

Fuente – Elaboración propia

Tabla 15 – Pesos reglamentarios y factores de carga equivalente por tipo de vehículo en pavimentos rígidos

Vehículo	Peso máximo (ton)				EALF				$\Sigma$ EALF
	Eje delantero (0°)	Ejes posteriores			0°	1°	2°	3°	
		1°	2°	3°					
Automóviles	.9	.9			2E-4	2E-4			4E-4
C2	7	11			0.529	3.406			3.935
C3	7	18			0.529	3.456			3.985
C4	7	23			0.529	2.978			3.507
T2S2	7	11	18		0.529	3.406	3.456		7.391
T2S3	7	11	25		0.529	3.406	4.067		8.002
T3S2	7	18	18		0.529	3.456	3.456		7.441
T3S3	7	18	25		0.529	3.456	4.067		8.052
C2R3	7	11	11	18	0.529	3.406	3.406	3.456	10.797
B2	7	11			0.529	3.406			3.935
B3-1	7	16			0.529	2.192			2.721
B4-1	7+7	16			1.058	2.192			3.250

Fuente – Elaboración propia

### 3.4. TRÁFICO DE DISEÑO

Para diseñar un pavimento, es necesario conocer el número de repeticiones por cada grupo de ejes de carga durante el periodo de diseño. El tráfico diario inicial debe ser multiplicado por factores direccionales y de distribución de carril para obtener el tráfico inicial en el carril de diseño. Así mismo, el tráfico a ser usado en el diseño debe ser multiplicado por un factor de crecimiento.

Siendo  $n_i$  el número total de repeticiones por día para el grupo de carga  $i$ , se tiene lo siguiente:

$$n_i = (n_0)_i \times G \times D \times L \times 365 \times Y$$

Donde  $(n_0)_i$  es el número inicial de repeticiones por día para el grupo de carga  $i$ ,  $G$  es el factor de crecimiento,  $D$  es el factor de distribución direccional,  $L$  es el factor de distribución de carril el cual varía con el volumen de tráfico y el número de carriles y  $Y$  es el periodo de diseño en años.

Como la presente tesis está basada en cargas equivalentes de eje simple de 18 kip (80 KN), entonces el número inicial de repeticiones por día para un grupo de carga  $i$  puede ser calculado mediante:

$$(n_0)_i = p_i \times F_i \times ADT_0$$

Donde  $p_i$  es el porcentaje del total de repeticiones para un grupo de carga  $i$ ,  $F_i$  es el factor de carga equivalente ( $\Sigma EALF$ ) para un grupo de carga  $i$  y  $ADT_0$  es el tráfico diario promedio al inicio del periodo de diseño.

Una vez obtenidos todos los datos anteriores, se procede a calcular el valor del ESAL, que representa el número de ejes equivalentes al cual estará sometido el pavimento durante el periodo de diseño.

$$ESAL = \sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0 \times G \times D \times L \times 365 \times Y$$

El valor resultante de  $\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$  corresponde a la sumatoria de la multiplicación del número de repeticiones de un vehículo por su respectivo EALF. De acuerdo a ello, se tienen los siguientes resultados tanto para el pavimento flexible como para el pavimento rígido:

Tabla 16 –  $\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$  para pavimentos flexibles

Tipo de vehículo	IMDA (vehículos/día)	EALF	$p_i F_i \times ADT_0$
Automóviles	2320	0.0004	0.93
C2	796	3.2830	2,613.27
C3	101	2.5050	253.01
C4	4	1.9000	7.60
T2S2	5	5.2150	26.08
T2S3	3	5.0640	15.19
T3S2	12	4.4370	53.24
T3S3	18	4.2860	77.15
C2R3	10	7.9250	79.25
B2	18	3.2830	59.09
B3-1	14	1.8620	26.07
B4-1	12	2.4350	29.22
$\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$			<b>3,240.09</b>

Fuente – Elaboración propia

Tabla 17 –  $\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$  para pavimentos rígidos

Tipo de vehículo	IMDA (vehículos/día)	EALF	$p_i F_i \times ADT_0$
Automóviles	2,320	0.0004	0.93

C2	796	3.9350	3,132.26
C3	101	3.9850	402.49
C4	4	3.5070	14.03
T2S2	5	7.3910	36.96
T2S3	3	8.0020	24.01
T3S2	12	7.4410	89.29
T3S3	18	8.0520	144.94
C2R3	10	10.7970	107.97
B2	18	3.9350	70.83
B3-1	14	2.7210	38.09
B4-1	12	3.2500	39.00
$\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$			<b>4,100.78</b>

Fuente – Elaboración propia

El Instituto del Asfalto y el AASHTO recomiendan el uso de un factor total de crecimiento acumulado que es equivalente al factor de crecimiento G por el periodo de diseño y se calcula de la siguiente manera:

$$GY = \frac{(1 + r)^Y - 1}{r}$$

Donde r es la tasa de crecimiento anual de vehículos en porcentaje e Y es el periodo de diseño, de manera que:

$$GY = \frac{(1 + 0.0418)^{15} - 1}{0.0418} = 20.2935$$

Finalmente, el factor de distribución direccional (D), de acuerdo al AASHTO, será de 0.5 pues el pavimento de la vía a diseñar es de doble sentido y el factor de distribución de carril (L) es de 1.0 para el caso de un carril en cada dirección según la página II-9 de la guía de la AASHTO, como se muestra a continuación:

Tabla 18 – Valores sugeridos de distribución de carril

Number of lanes in each direction	Percent of 18-kip ESAL in design lane
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Fuente – American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>33</sup>

<sup>33</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-9

En el caso del Instituto del Asfalto, el factor de distribución direccional y el factor de distribución de carril se encuentran combinados en un solo valor (D x L) que determina el porcentaje del total de vehículos en el carril de diseño, y se obtiene de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 19 – Porcentaje de vehículos en el carril de diseño

Number of traffic lanes in two directions	Percent of trucks in design lane
2	50
4	45 (35-48)
6 or more	40 (25-48)

Fuente - The Asphalt Institute (1991)<sup>34</sup>

El valor de D x L de acuerdo al Instituto del Asfalto sería de 50%, al tratarse de una carretera de 2 carriles; el mismo valor obtenido por las tablas de la AASHTO.

De esta manera, los parámetros de diseño para el cálculo del ESAL tanto para el pavimento flexible como para el pavimento rígido quedan establecidos de la siguiente manera:

Tabla 20 – Parámetros de diseño para pavimentos flexibles

Parámetro	Valor
$\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$	3,240.09
GY	20.2935
D	0.5
L	1.0

Fuente – Elaboración propia

Tabla 21 – Parámetros de diseño para pavimentos rígidos

Parámetro	Valor
$\sum_{i=1}^m p_i F_i \times ADT_0$	4,100.78
GY	20.2935
D	0.5
L	1.0

Fuente – Elaboración propia

<sup>34</sup> The Asphalt Institute. (1991). THICKNESS DESIGN: Asphalt Pavements for Highways and Streets. Lexington

Finalmente, haciendo uso de la fórmula presentada anteriormente, el ESAL para cada tipo de pavimento se muestra en la siguiente tabla y será usado para el diseño de los pavimentos por la metodología de la AASHTO y por la del Instituto del Asfalto.

Tabla 22- ESAL para cada tipo de pavimento

<b>Tipo de pavimento</b>	<b>ESAL</b>
Pavimento flexible	12.00 E+06
Pavimento rígido	15.19 E+06

Fuente – Elaboración propia



## 4. DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

A través del desarrollo de la ingeniería de pavimentos se han ido presentando diferentes métodos de diseño, algunos de los cuales se basan en información simple y emplean reglas prácticas para determinar el espesor resultante del pavimento, mientras que otros requieren de ensayos más sofisticados y de programas de cálculo avanzados<sup>35</sup>. En el desarrollo de la presente tesis, se diseñarán los pavimentos flexibles empleando dos metodologías diferentes: Método AASHTO 1993 y Método del Instituto del Asfalto.

### 4.1. MÉTODO AASHTO 1993

El procedimiento de diseño recomendado por la AASHTO está basado en los resultados de los extensivos ensayos de carretera AASHO (AASHO Road Test) llevados a cabo en Ottawa, Illinois, a finales de los 50's y a comienzos de los 60's. El comité de diseño de la AASHTO publicó primero una guía de diseño provisional en 1961. Esta guía fue revisada en 1972 y 1981. En el periodo de 1984-1985, el subcomité de diseño de la AASHTO y un equipo de consultores revisaron y expandieron la guía, y publicaron la guía actual en 1986. Esta guía fue revisada en 1993 y prácticamente no hubo ninguna modificación en los métodos de diseño; los cuales serán presentados a continuación.

#### 4.1.1. Variables de diseño

- **Tránsito de diseño;** el número de ejes equivalentes (ESAL) se halló anteriormente en el capítulo 3 y corresponde al valor de  $12.00 \times 10^6$  de ejes equivalentes para el caso del pavimento flexible.
- **Confiabilidad;** el nivel de confiabilidad (R) es seleccionado en función de la clasificación funcional de la carretera y dependiendo si esta se encuentra en una zona urbana o rural. La confiabilidad es

---

<sup>35</sup> Menéndez, J. (2012). INGENIERÍA DE PAVIMENTOS: Materiales, Diseño y Conservación (Tercera ed.). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, pp. 227

la probabilidad de que el pavimento tendrá una duración para el periodo de diseño sin presentar fallas estructurales. Un mayor valor de la confiabilidad asegurará un mejor comportamiento, pero se requerirá mayores espesores de capa. De acuerdo a la tabla 2.2 de la página II-9 de la guía de la AASHTO, que se muestra a continuación, y considerando que la carretera en mención corresponde a una interestatal rural, el nivel recomendado de confiabilidad oscila entre 80 y 99.9.

Tabla 23 – Valores sugeridos de confiabilidad

Functional classification	Recommended level of reliability	
	Urban	Rural
Interstate and Other Freeways	85 – 99.9	80 – 99.9
Principal Arterials	80 – 99	75 – 95
Collectors	80 – 95	75 – 95
Local	50 – 80	50 – 80

Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>36</sup>

Se opta por elegir un nivel promedio de 90% para este proyecto. Se debe tomar en cuenta que una vez determinado el nivel de confiabilidad que se requiere alcanzar en el diseño, este valor debe ser transformado en términos de la desviación estándar normal (ZR). De acuerdo a la tabla 4.1 de la página I-62 de la guía de la AASHTO, que se muestra a continuación, y para un nivel de confiabilidad de 90%, la desviación estándar normal es de -1.282.

Tabla 24 – Valores de desviación estándar normal (ZR) para diferentes valores de confiabilidad

Reliability, R (percent)	Standard normal deviate, ZR
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

<sup>36</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-9

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

Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>37</sup>

- **Desviación estándar combinada;** la desviación estándar combinada ( $S_o$ ), es un valor que toma en cuenta la variabilidad esperada de la predicción del tránsito y de otros factores que afectan el comportamiento del pavimento. De acuerdo a la guía de la AASHTO<sup>38</sup>, se recomienda usar un valor de 0.44 para pavimentos flexibles en el caso que se cuente con el conteo vehicular y de 0.49 en el caso contrario. Haremos uso del valor de 0.44, al contar con un estudio de tráfico previo.
- **Módulo de resiliencia de la subrasante;** el módulo de elasticidad de los materiales no consolidados del pavimento comúnmente se caracterizan en términos del módulo de resiliencia. El módulo resiliente es el módulo elástico de los materiales a ser empleados en la construcción del pavimento. Se conoce que los materiales empleados en la construcción de pavimentos no son elásticos porque presentan una deformación plástica acumulada; sin embargo después de varios ciclos de repeticiones de cargas, el suelo llega a un estado tal en que toda la deformación es recuperable y es en este momento donde se tiene un comportamiento resiliente.

Este valor fue hallado en el capítulo 2, el cual se determinó a partir del CBR de la subrasante de 6% a una compactación del 95% de la

<sup>37</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. I-62

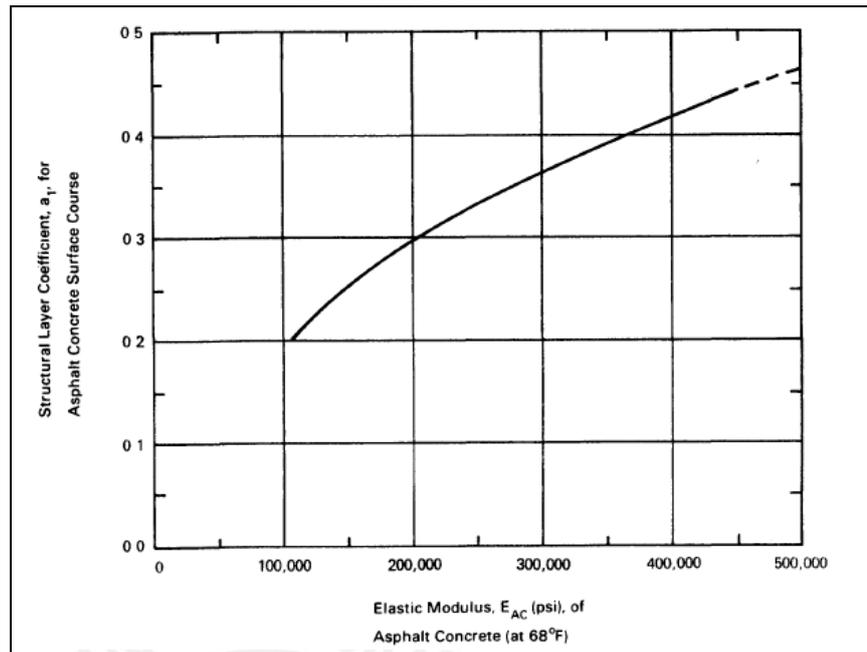
<sup>38</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. I-62

densidad máxima del ensayo Proctor Estándar y haciendo uso de la siguiente fórmula dada por el AASHTO 2015:  $M_r (\text{psi}) = 2555 \times \text{CBR}(\%)^{0.64}$  . De acuerdo a ello se obtuvo un valor del módulo de resiliencia de la subrasante de 8,043 psi, lo cual equivalente a aproximadamente 8.0 ksi.

- **Coefficientes estructurales de capa;** el coeficiente estructural de capa es una medida de la capacidad relativa de una unidad de espesor de un determinado material para funcionar como un componente estructural del pavimento. En el caso de los pavimentos flexibles se usarán tres coeficientes de capa estructural ( $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ ) los cuales representarán a la carpeta asfáltica, a la base y a la subbase respectivamente. Estos coeficientes pueden ser determinados a partir de correlaciones con las propiedades del material.

Para la capa de mezcla asfáltica, considerando un módulo resiliente de 450,000 psi como máximo por recomendación de la AASHTO, el coeficiente estructural  $a_1$  sería aproximadamente de un valor de 0.44 según la figura 2.5 de la página II-18 de la guía, la cual se muestra a continuación. El coeficiente estructural  $a_1$  varía entre los valores de 0.40 y 0.44; lo cual representa un control de calidad en su producción en planta, baja y alta respectivamente.

Imagen 11 – Coeficiente estructural  $a_1$  en función del módulo elástico del concreto asfáltico



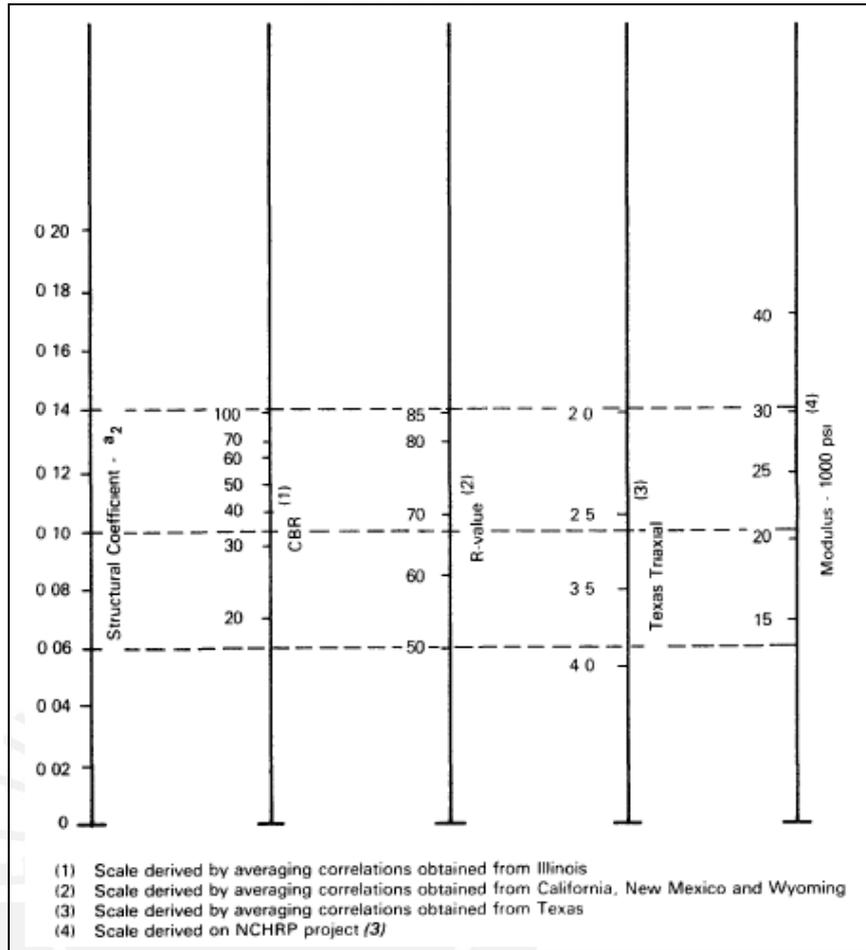
Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>39</sup>

Además, como datos de tesis tenemos que el CBR de la base es del 112% a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado y el CBR de la subbase es del 29% a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado; tal y como se explicó previamente en el capítulo 2.

De acuerdo a ello y haciendo uso de las figuras 2.6, de la página II-19; y 2.7, de la página II-21 de la guía, que se muestran a continuación, se obtienen los coeficientes estructurales  $a_2$  y  $a_3$  respectivamente los cuales tienen un valor de 0.14 y 0.11. Se debe resaltar que para hallar el coeficiente estructural  $a_2$  se ha utilizado el valor de 100% CBR y para hallar el valor de  $a_3$  se ha realizado una interpolación en la gráfica respectiva.

<sup>39</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-18

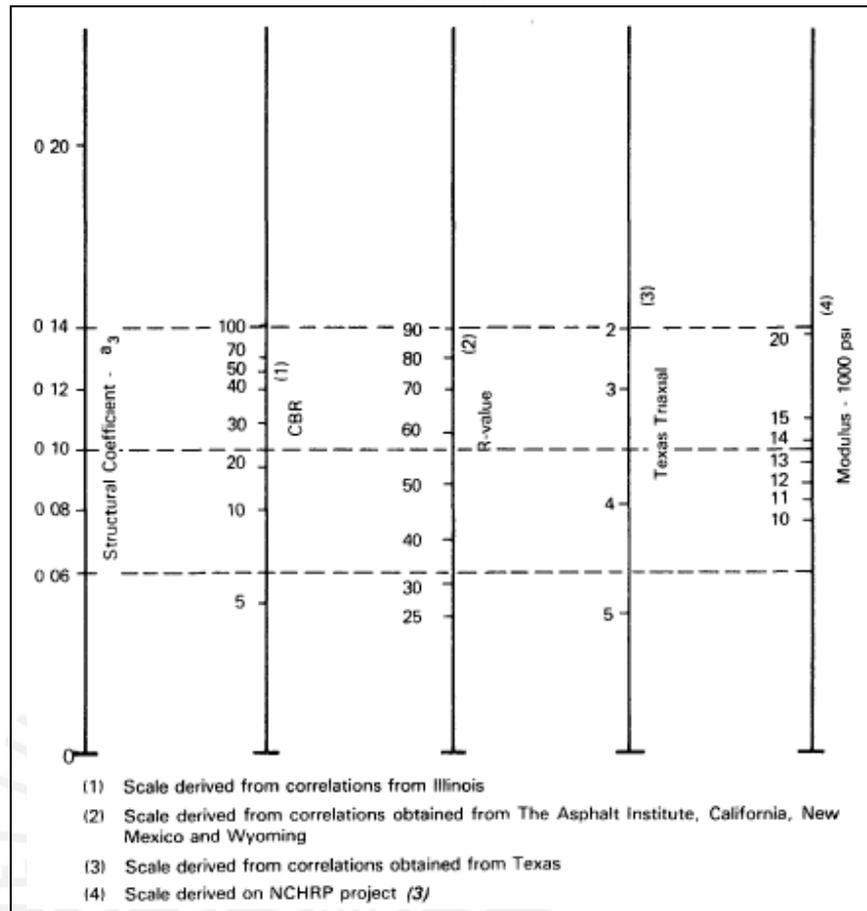
Imagen 12 – Coeficiente estructural a2 en función de diferentes parámetros de fuerza de la base



Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>40</sup>

<sup>40</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-19

Imagen 13 - Coeficiente estructural  $a_3$  en función de diferentes parámetros de fuerza de la subbase



Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>41</sup>

- Pérdida de serviciabilidad;** la serviciabilidad representa el confort o comodidad de circulación que la vía ofrece al usuario; su valor se encuentra comprendido entre 0 y 5, donde 5 representa la condición máxima ideal. La pérdida de serviciabilidad se encuentra definida como la diferencia entre la serviciabilidad inicial ( $p_o$ ) y la serviciabilidad final ( $p_t$ ). De acuerdo a la guía de la AASHTO<sup>42</sup>, se recomienda el uso de una serviciabilidad inicial de 4.2 para pavimentos flexibles. La serviciabilidad final es de 3 y se definió anteriormente en el capítulo 3. De esta manera la pérdida de serviciabilidad tiene el valor de 1.2.

<sup>41</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-21

<sup>42</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. I-8

- **Coefficientes de drenaje;** es la relación existente entre el módulo resiliente en una condición de humedad óptima con respecto al módulo resiliente para una cierta condición de humedad. El valor de 1.0 representa que las condiciones de drenaje son similares a los ensayos del AASHO Road Test, mientras que valores por encima de 1.0 representan condiciones mejores que las usadas en estos ensayos.

Para el cálculo de los coeficientes de drenaje es necesario conocer dos parámetros: la calidad del drenaje del material y el porcentaje de tiempo que la estructura de pavimento estará expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación. El diseño de la carretera se realizará considerando material de subbase y base de buena calidad de drenaje (el agua es drenada por el pavimento a más tardar en 1 día) y como se determinó en el capítulo 2, el porcentaje de tiempo que el pavimento estará expuesto a niveles de humedad próximas a la saturación será mayor al 25%. De acuerdo a lo mencionado y a la tabla 2.4 de la página II-25 de la guía de la AASHO, que se muestra a continuación, se considerará el valor de 1.0 para los coeficientes de drenaje m1 y m2.

Tabla 25 – Valores recomendados de coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles

<b>Quality of drainage</b>	<b>Less than 1%</b>	<b>1-5%</b>	<b>5-25%</b>	<b>Greater than 25%</b>
Excellent	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Good	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Fair	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Poor	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Very poor	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>43</sup>

<sup>43</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-25

#### 4.1.2. Diseño de espesores

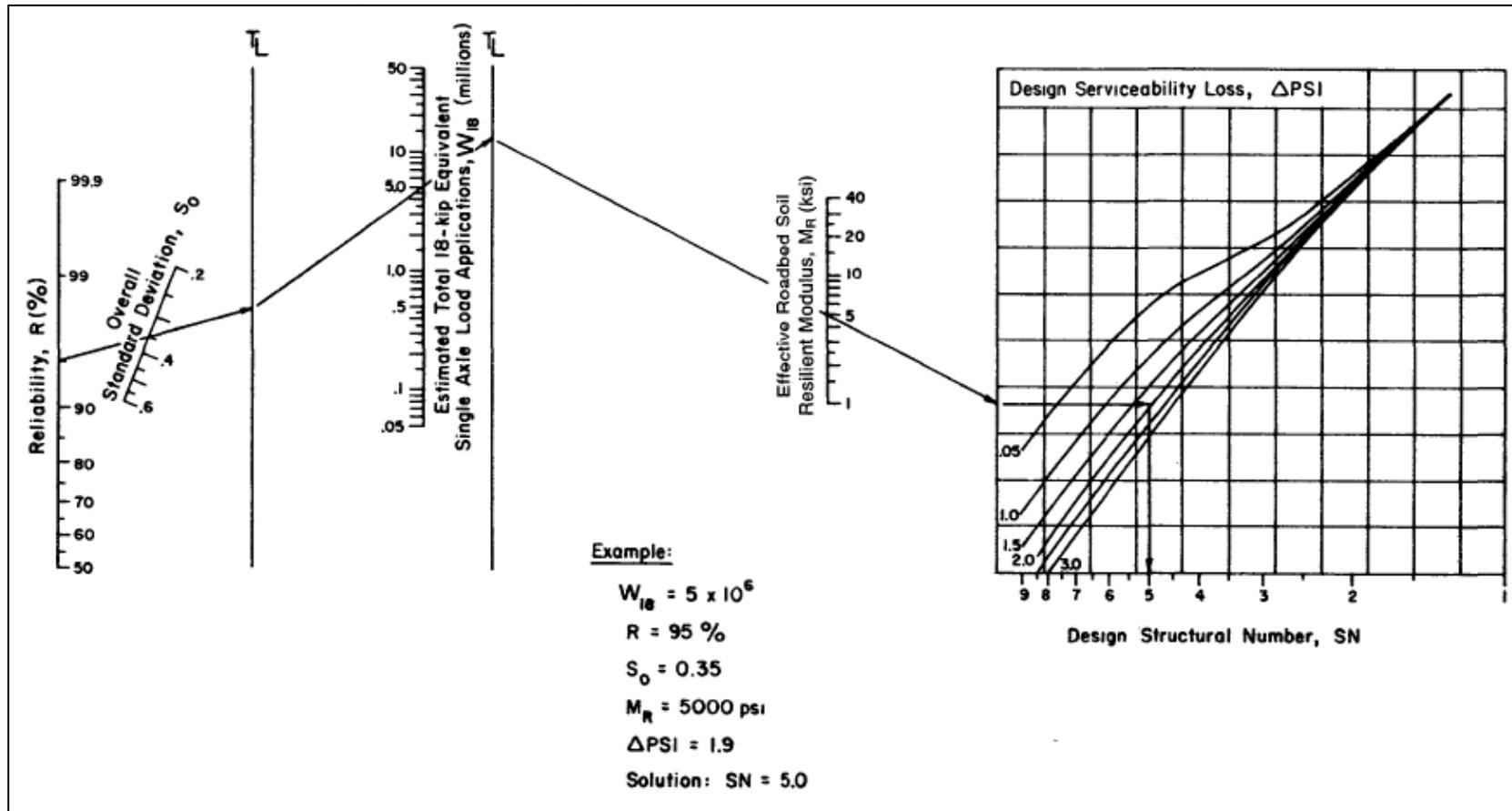
Con el objetivo de hallar los espesores de las capas del pavimento flexible, la guía de la AASHTO desarrolló la siguiente ecuación para el cálculo del número estructural (SN):

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left( \frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log (M_R) - 8.07$$

Donde:  $W_{18}$  es el número estimado de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas (ESAL),  $Z_R$  es la desviación estándar normal,  $S_0$  es la desviación estándar combinada de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento,  $\Delta PSI$  es la diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial ( $p_o$ ) y la serviciabilidad final ( $p_t$ ),  $M_R$  es el módulo de resiliencia y SN es el número estructural.

Sin embargo, el uso de la ecuación mostrada resulta tediosa por lo que se utilizará, para el cálculo del número estructural, el nomograma de la figura 3.1 de la página II-32 de la guía de la AASHTO que se muestra a continuación. Una vez obtenido este valor es necesario calcular el espesor de cada una de las capas, para lo cual se debe tomar en cuenta que el número estructural de un pavimento se encuentra definido en relación al espesor de sus capas ( $D_i$ ), sus coeficientes estructurales ( $a_i$ ) y sus coeficientes de drenaje ( $m_i$ ), bajo la siguiente fórmula:  $SN = a_1 D_1 \times a_2 m_2 D_2 \times a_3 m_3 D_3$

Imagen 14 – Nomograma para el cálculo del número estructural (SN) en pavimentos flexibles



Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>44</sup>

<sup>44</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-32

Otro punto a tomar en cuenta son los espesores mínimos recomendados los cuales son mostrados en la siguiente tabla adquirida de la página II-35 de la guía de la AASHTO.

Tabla 26 – Espesores mínimos (pulgadas) de carpeta asfáltica y base

Traffic, ESAL	Asphalt concrete	Aggregate base
Less than 50,000	1.0 (or surface treatment)	4.0
50,001 – 150,000	2.0	4.0
150,001 – 500,000	2.5	4.0
500,001 – 2,000,000	3.0	6.0
2,000,001 – 7,000,000	3.5	6.0
Greater than 7,000,000	4.0	6.0

Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>45</sup>

Debido a que el ESAL calculado anteriormente fue de  $12.00 \times 10^6$ , el espesor mínimo correspondiente a la carpeta asfáltica sería de 4 pulgadas mientras que el correspondiente a la capa de base granular sería de 6 pulgadas.

Previo al cálculo de los espesores de capa se debe hallar el número estructural asociado al módulo resiliente de la base, subbase y subrasante. De acuerdo a la guía de la AASHTO para hallar el módulo resiliente de la base y la subbase se puede hacer uso de las mismas gráficas que sirvieron para hallar los coeficientes estructurales  $a_2$  y  $a_3$  (imagen 10 e imagen 11) o también hacer uso de las siguientes relaciones que se derivan de dichas gráficas:

Para el cálculo del módulo resiliente de la base:

$$a_2 = 0.249 \log(M_r \text{ base}) - 0.977$$

Como  $a_2$  fue hallado anteriormente y tiene un valor de 0.14, el valor del módulo resiliente de la base sería de 30,616 psi o 30.6 ksi.

Para el cálculo del módulo resiliente de la subbase:

<sup>45</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-35

$$a_3 = 0.227 \log(M_r \text{ subbase}) - 0.839$$

Como  $a_3$  fue hallado anteriormente y tiene un valor de 0.11, el valor del módulo resiliente de la subbase sería de 15,157 psi o 15.2 ksi.

Además, conocidos los valores de confiabilidad ( $R = 90\%$ ), desviación estándar combinada ( $S_o = 0.44$ ), número de ejes equivalentes ( $ESAL = 12.00 \times 10^6$ ) y pérdida de serviciabilidad ( $\Delta PSI = 1.2$ ), se tiene la siguiente tabla resumen:

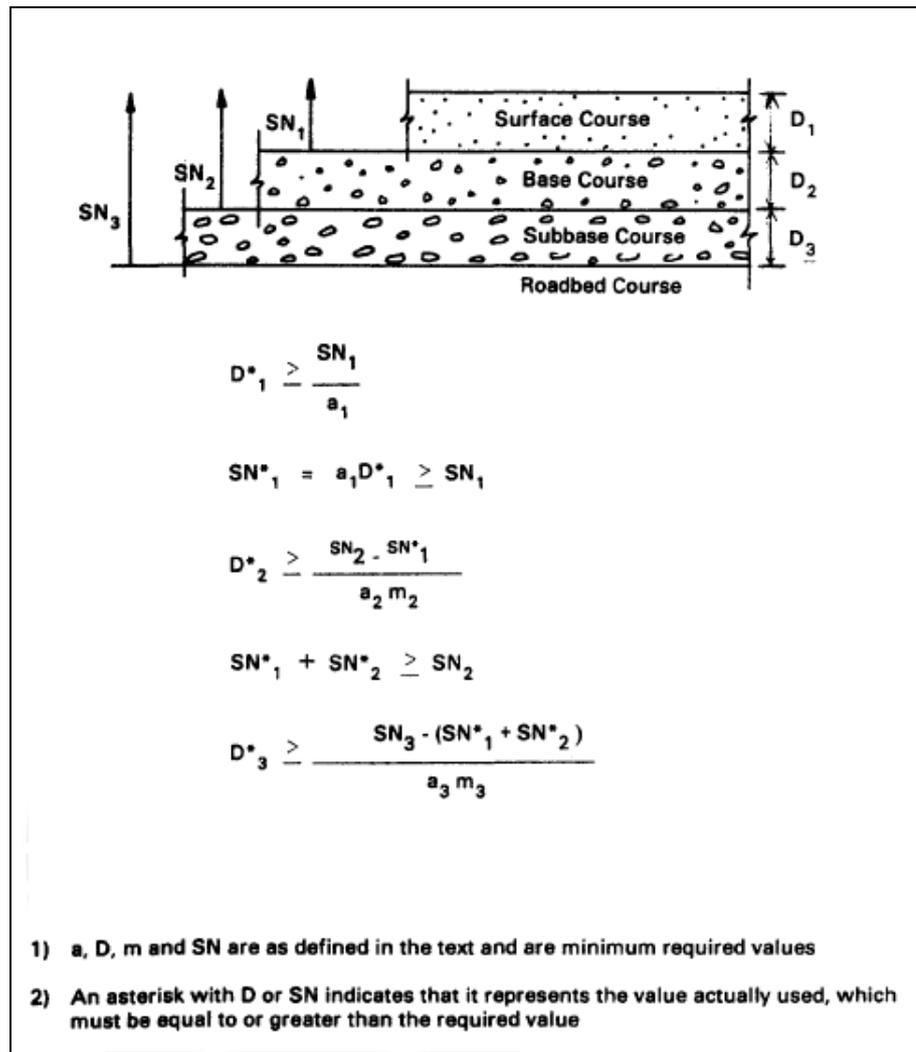
Tabla 27 - Número estructural ( $SN_i$ ) asociado al módulo de resiliencia ( $M_r$ ) de la base, subbase y subrasante

Capa	Módulo de resiliencia ( $M_r$ )	Número estructural ( $SN_i$ )
Base	30.6 ksi	3.2 ( $SN_1$ )
Subbase	15.2 ksi	4.4 ( $SN_2$ )
Subrasante	8.0 ksi	5.5 ( $SN_3$ )

Fuente - Elaboración propia

Finalmente, para el cálculo de los espesores, se utilizará el procedimiento de la figura 3.2 de la página II-36 de la guía de la AASHTO que se muestra a continuación:

Imagen 15 – Procedimiento de diseño de los espesores de las capas de un pavimento flexible



Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>46</sup>

Se tienen como datos hallados anteriormente lo siguiente:  $a_1=0.44$ ,  $a_2=0.14$ ,  $m_2=1.0$ ,  $a_3=0.11$  y  $m_3=1.0$

Primero, para el cálculo del espesor  $D_1$  de la carpeta asfáltica, se considera el módulo de resiliencia ( $M_r$ ) de la capa base y así se obtiene el número estructural  $SN_1$  que se requiere para proteger a la base, de donde:

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

<sup>46</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-36

Como el número estructural SN1 es igual a 3.2, entonces,  $D1 \geq 7.27''$ . Usamos el valor de 7.50 pulgadas, lo cual es mayor al espesor mínimo recomendado por la AASHTO de 4 pulgadas.

Posteriormente para determinar el espesor D2 de la capa base, se considera el módulo de resiliencia (Mr) de la subbase para obtener el número estructural SN2 que se requiere para proteger a la subbase, de donde:

$$D2 \geq \frac{SN2 - a1D1}{a2m2}$$

Como el número estructural SN2 es igual a 4.4, entonces:

$$D2 \geq \frac{4.4 - 0.44 \times 7.50}{0.14 \times 1.0}$$

$$D2 \geq 7.86'' = 19.96 \text{ cm}$$

Usamos el valor de  $D2 = 20 \text{ cm}$  o 7.87 pulgadas, el cual es mayor al espesor mínimo recomendado por la AASHTO de 6 pulgadas.

Finalmente, para el cálculo del espesor D3 de la capa subbase, se considera el módulo de resiliencia (Mr) de la subrasante para obtener el número estructural SN3 que se requiere para proteger a la subrasante, de donde:

$$D3 \geq \frac{SN3 - a1D1 - a2D2m2}{a3m3}$$

Como el número estructural SN3 es igual a 5.5, entonces:

$$D3 \geq \frac{5.5 - 0.44 \times 7.50 - 0.14 \times 7.87 \times 1.0}{0.11 \times 1.0}$$

$$D3 \geq 9.98'' = 25.35 \text{ cm}$$

Usamos el valor de  $D3 = 30 \text{ cm}$

Sin embargo, no existe una única solución para determinar los espesores de capas ya que estos pueden variar y aun así cumplir con los requisitos de espesores mínimos y de número estructural mínimo. A

continuación se presentan diferentes configuraciones de posibles espesores para cada una de las capas:

Tabla 28 – Alternativas AASHTO de espesores del pavimento flexible (I)

Alternativa	Espesores de capas		
	D1 (pulgadas)	D2 (cm)	D3 (cm)
Alternativa 1	7.50	20.00	30.00
Alternativa 2	7.50	25.00	20.00
Alternativa 3	7.50	30.00	15.00
Alternativa 4	8.00	20.00	25.00
Alternativa 5	8.00	25.00	15.00
Alternativa 6	8.50	15.00	25.00
Alternativa 7	8.50	20.00	20.00
Alternativa 8	8.50	25.00	15.00
Alternativa 9	9.00	15.00	20.00
Alternativa 10	9.00	20.00	15.00

Fuente - Elaboración propia

La guía de la AASHTO también plantea otra metodología que consiste en considerar los espesores de la carpeta asfáltica y de la base como valores cercanos a los espesores mínimos recomendados para así hallar el valor del espesor de la subbase.

Tenemos como dato que el SN asociado a la subrasante es de 5.5 y los espesores recomendados de la guía para la carpeta asfáltica y la base son de 4 pulgadas y 15 cm respectivamente. De esta manera tenemos que:

$$SN = D1x a1 + D2x a2x m2 + D3x a3x m3$$

$$5.5 = 4x0.44 + \left(\frac{15}{2.54}\right)x0.14x1.0 + \left(\frac{D3}{2.54}\right)x0.11x1.0$$

$$D3 = 67.27 \text{ cm}$$

El valor del espesor de la subbase es de aproximadamente 70 cm; sin embargo al igual que la metodología anterior, no existe una única solución ya que los espesores de la carpeta asfáltica y de la base pueden incrementar. Siendo así, tenemos la siguiente tabla resumen con las alternativas de solución propuestas:

Tabla 29 – Alternativas AASHTO de espesores del pavimento flexible (II)

Alternativa	Espesores de capas		
	D1 (pulgadas)	D2 (cm)	D3 (cm)
Alternativa 1	4.00	15.00	70.00
Alternativa 2	4.00	20.00	65.00
Alternativa 3	4.00	25.00	55.00
Alternativa 4	4.00	30.00	50.00
Alternativa 5	4.50	15.00	65.00
Alternativa 6	4.50	20.00	60.00
Alternativa 7	4.50	25.00	50.00
Alternativa 8	4.50	30.00	45.00
Alternativa 9	5.00	15.00	60.00
Alternativa 10	5.00	20.00	55.00
Alternativa 11	5.00	25.00	45.00
Alternativa 12	5.00	30.00	40.00

Fuente - Elaboración propia

Imagen 16 – Sección transversal del pavimento flexible - AASHTO

<b>Carpetas asfáltica</b>	Espesor: 4” - 5”. Pavimento de concreto asfáltico en caliente
<b>Base granular</b>	Espesor: 15cm – 30cm. CBR: 112%. Compactación al 100% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Modificado
<b>Subbase granular</b>	Espesor: 40cm – 70cm. CBR: 29%. Compactación al 100% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Modificado
<b>Subrasante</b>	Espesor: 30cm. CBR: 6%. Compactación al 95% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Estándar

Fuente - Elaboración propia

De las dos metodologías recomendadas por la guía de la AASHTO, esta última proporciona espesores más bajos en las capas más costosas (carpetas asfáltica y base granular), lo cual se traduce en un menor costo global de construcción; razón por la cual es usada en el diseño de pavimentos flexibles en el Perú.

En el capítulo de análisis económico se averiguará cuál de las alternativas de esta última metodología es la mejor opción para llevar a cabo el diseño final del pavimento flexible por la metodología de la AASHTO

## 4.2. MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO

El instituto del Asfalto (IA) publicó desde 1954 hasta el año 1969 ocho ediciones para el diseño de espesores de pavimentos asfálticos. Los procedimientos seguidos en estos manuales eran empíricos; sin embargo en 1981 se publicó la novena edición y a diferencia de las anteriores, se usó la teoría mecánica multicapa en conjunto con el criterio empírico de falla para determinar el espesor del pavimento. Basado en los resultados de un programa de computadora, desarrollado por el Instituto del Asfalto, llamado DAMA, se desarrolló una serie de diagramas de diseño para tres regímenes distintos de temperatura. En esta novena edición solo se incluyeron los diagramas para un régimen, el cual representaba gran parte de Estados Unidos; sin embargo en el año 1991 se realizó una actualización a la novena edición, en la cual fueron incluidos los diagramas de diseño para los tres regímenes de temperatura.

El diseño por la metodología del Instituto del Asfalto toma en cuenta los dos tipos de deformaciones más frecuentes y más críticos en el diseño de pavimentos asfálticos. El primero es la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la carpeta asfáltica que causa una falla por fatiga y el segundo es la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante que causa una falla por deformación permanente. Estos dos tipos de deformaciones son usados como criterios de falla en el diseño por la metodología del Instituto del Asfalto.

El criterio de falla por fatiga se encuentra representado en la siguiente ecuación:

$$N_f = 18.4 C (6.167 \times 10^{-5} \epsilon_t^{-3.291} \times E^{-0.854})$$

Donde  $N_f$  es el número de ejes equivalentes para controlar la falla por fatiga (20% del área total como máximo),  $C$  es función que depende del porcentaje del volumen de vacíos ( $V_a$  %) y del porcentaje del volumen de asfalto ( $V_b$  %) de la mezcla asfáltica compactada,  $\epsilon_t$  es la deformación por tracción horizontal admisible en la base de la carpeta asfáltica y  $E$  es el módulo dinámico de la mezcla asfáltica (Mpa).

El parámetro C se determina de la siguiente manera:

$$C = 10^{4.84 \times \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69\right)}$$

Por otro lado, el criterio de falla por deformación permanente se encuentra representado por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_c = 1.05 \times 10^{-2} \times N_d^{-0.2233}$$

Donde  $\epsilon_c$  es la deformación por compresión vertical admisible en la subrasante y  $N_d$  es el número de ejes equivalentes para controlar la falla por deformación permanente (12.7 mm como máximo).

Estas ecuaciones de diseño son usadas por el programa DAMA y del cual se derivan los diagramas de diseño que serán presentados más adelante.

#### 4.2.1. Variables de diseño

- **Tránsito de diseño;** el número de ejes equivalentes (ESAL) se halló anteriormente en el capítulo 3 y corresponde al valor de  $12.00 \times 10^6$  para el caso del pavimento flexible.
- **Módulo resiliente de la subrasante;** según el manual del Instituto del Asfalto, se deberían realizar entre seis y ocho ensayos para determinar el valor de diseño del módulo de resiliencia de la subrasante. El valor de dicho módulo debe ser menor que el 60, 75 o 87.5% de los otros ensayos. Estos porcentajes son conocidos como valores porcentuales y son relativos al nivel del tráfico tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 30 – Límites de diseño del módulo resiliente de la subrasante

Traffic levels, 80 KN ESAL	Design subgrade percentile value
< 10,000	60
10,000 – 1,000,000	75
> 1,000,000	87.5

Fuente – The Asphalt Institute (1991)<sup>47</sup>

<sup>47</sup> The Asphalt Institute. (1991). THICKNESS DESIGN: Asphalt Pavements for Highways and Streets. Lexington

De acuerdo a la tabla mostrada, el valor del módulo resiliente de la subrasante deberá ser menor que el 87.5% de los otros ensayos al contar con un tráfico mayor que  $1 \times 10^6$  ESAL.

Como se mencionó anteriormente, se cuenta con un solo valor del CBR de la subrasante por lo que existirá un único valor del módulo resiliente de la subrasante, el cual se asumirá que cumple la condición mencionada. Siendo el valor del CBR de 6% a una compactación del 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor Estándar, en el capítulo 2, se obtuvo el valor del módulo de resiliencia de la subrasante ( $M_r$ ) de acuerdo a la fórmula dada por el AASHTO 2015:  $M_r \text{ (psi)} = 2555 \times \text{CBR}(\%)^{0.64}$ . Se obtuvo así un valor del módulo de resiliencia de la subrasante de 8,043 psi, lo cual es equivalente a aproximadamente 55 Mpa.

- **Temperatura promedio anual del aire (MAAT);** como se mencionó anteriormente en el capítulo dos, la carretera se ubica en una zona de clima ecuatorial o tropical: cálido y húmedo con abundantes lluvias. El SENAMHI reporta una temperatura media anual de  $26.5^\circ \text{C}$  donde el mes más frío reporta una temperatura mínima de  $26^\circ \text{C}$  y el mes más caluroso, una temperatura máxima de  $27^\circ \text{C}$ .

#### **4.2.2. Diseño de espesores**

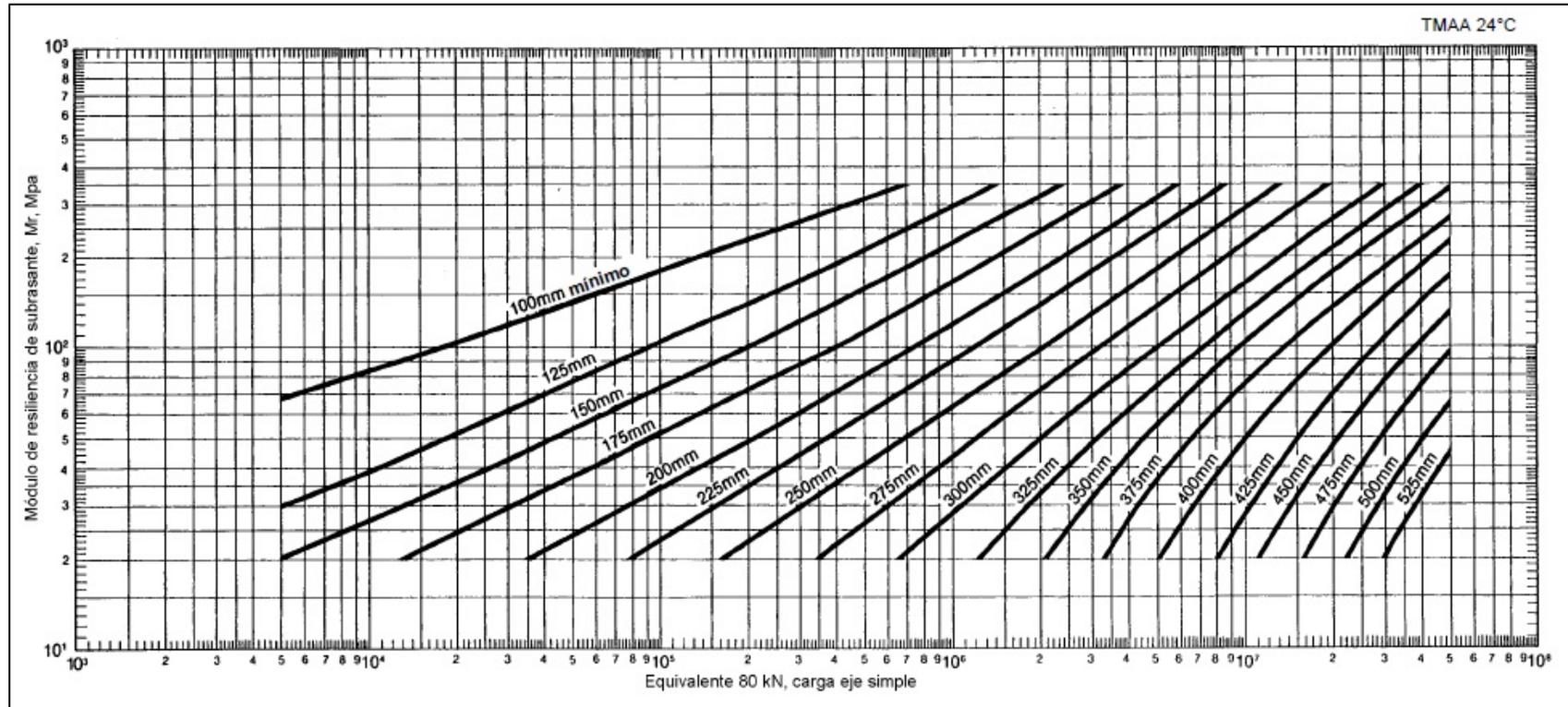
Como se mencionó en este capítulo, el Instituto del Asfalto ha desarrollado diagramas de diseño para 3 diferentes temperaturas promedio anual del aire:  $7^\circ \text{C}$ ,  $15.5^\circ \text{C}$  y  $24^\circ \text{C}$ . Como la temperatura del tramo a diseñar es de  $26.5^\circ \text{C}$  y esta es más cercana a  $24^\circ \text{C}$ , se utilizarán las cartas de diseño correspondientes a dicha temperatura.

Así mismo, para cada temperatura se cuenta con tres cartas de diseño diferentes en relación al espesor usado de la base; se tiene así cartas de diseño para la carpeta asfáltica en todo su espesor, para una base de 15 cm y para una base de 30 cm. Cabe resaltar que es posible transformar

parte del espesor de la carpeta asfáltica y de la base en espesor de subbase mediante la relación de coeficientes estructurales y de drenaje de cada una de las capas, los cuales fueron hallados anteriormente en el diseño por la metodología AASHTO.



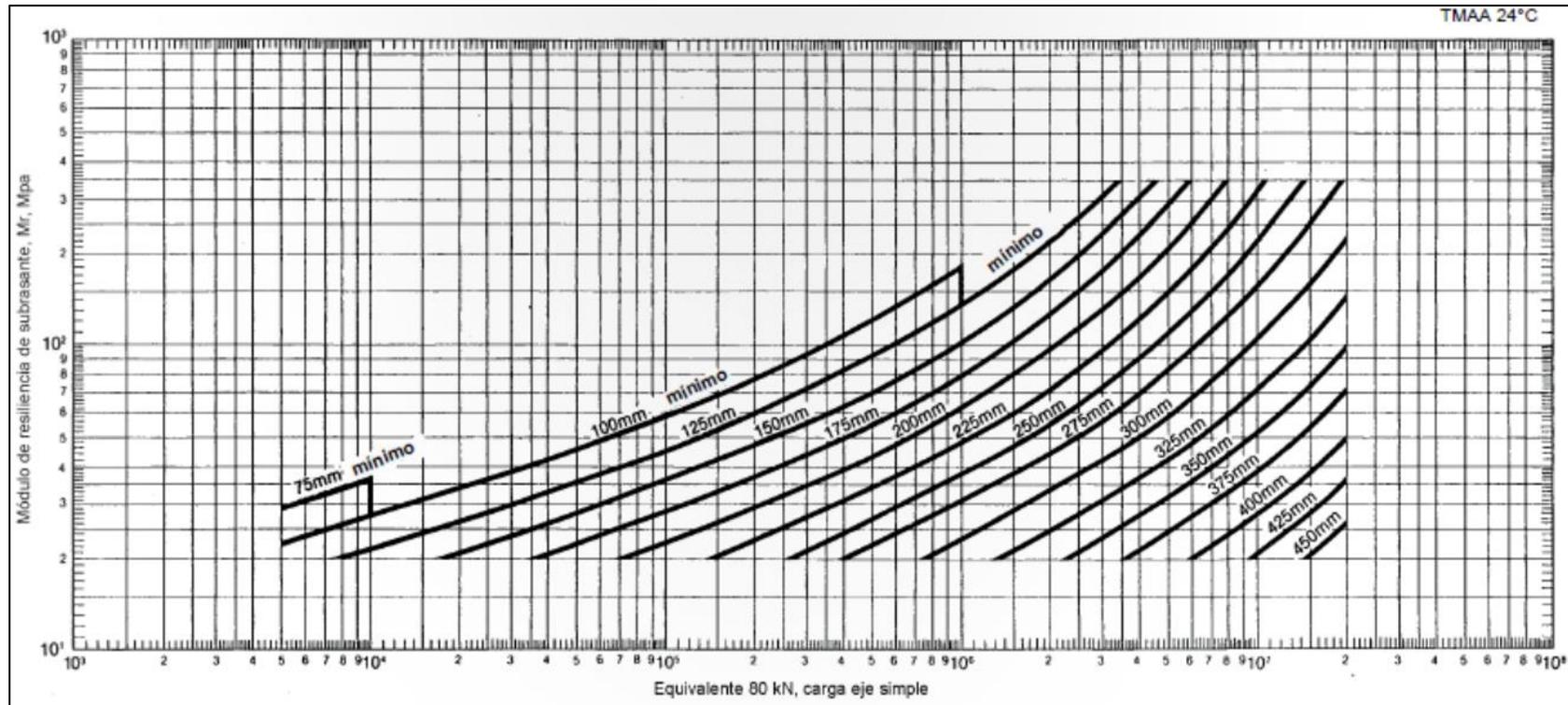
Imagen 17 – Carta de diseño para la carpeta asfáltica en todo su espesor



Fuente - The Asphalt Institute (1991)<sup>48</sup>

<sup>48</sup> The Asphalt Institute. (1991). THICKNESS DESIGN: Asphalt Pavements for Highways and Streets. Lexington

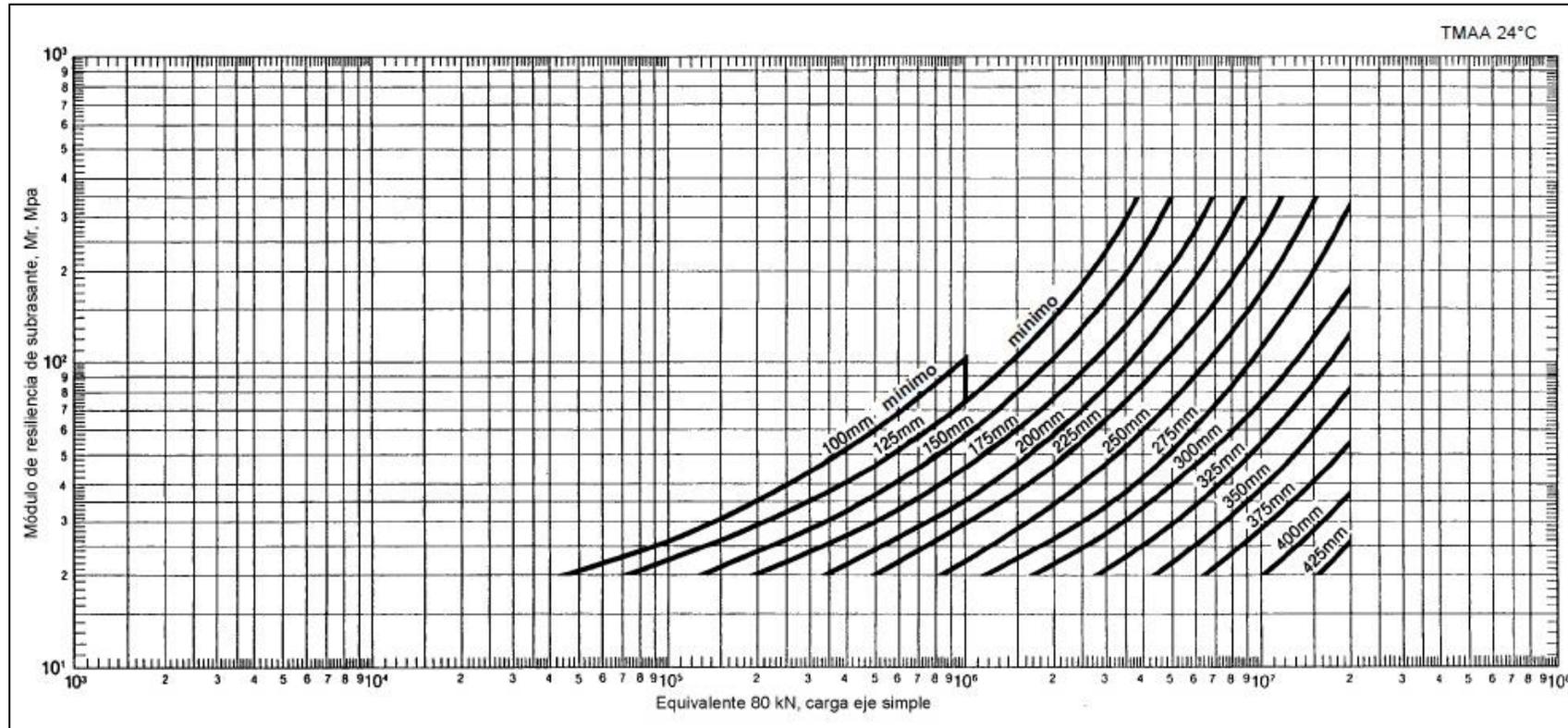
Imagen 18 – Carta de diseño para la carpeta asfáltica y 15 cm de espesor de base



Fuente - The Asphalt Institute (1991)<sup>49</sup>

<sup>49</sup> The Asphalt Institute. (1991). THICKNESS DESIGN: Asphalt Pavements for Highways and Streets. Lexington

Imagen 19 – Carta de diseño para la carpeta asfáltica y 30 cm de espesor de base



Fuente - The Asphalt Institute (1991)<sup>50</sup>

<sup>50</sup> The Asphalt Institute. (1991). THICKNESS DESIGN: Asphalt Pavements for Highways and Streets. Lexington

Entramos a los gráficos con el valor de 55 Mpa y el valor de  $1.2 \times 10^7$  número de ejes equivalentes (ESAL), con lo cual se obtiene un espesor completo de carpeta asfáltica de aproximadamente 410 mm en el primer gráfico (imagen 17), un espesor de carpeta asfáltica de 360 mm, considerando una base de 15 cm en el segundo gráfico (imagen 18) y un espesor de carpeta asfáltica de 340 mm, considerando una base de 30 cm en el tercer gráfico (imagen 19).

Tabla 31 – Alternativas de espesores de carpeta asfáltica y base

<b>Alternativa</b>	<b>Carpeta asfáltica (cm)</b>	<b>Base (cm)</b>
Alternativa 1	41	0
Alternativa 2	36	15
Alternativa 3	34	30

Fuente - Elaboración propia

Como se mencionó, una parte de la carpeta asfáltica y/o de la base pueden ser reemplazados por material granular en la subbase, haciendo uso de los coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje hallados anteriormente ( $a_1=0.44$ ,  $a_2=0.14$ ,  $m_2=1.0$ ,  $a_3=0.11$ ,  $m_3=1.0$ ). Para ello, hallamos el número estructural asociado a cada una de las tres alternativas propuestas:

Tabla 32 – SN asociado a las tres alternativas de diseño

<b>Alternativa</b>	<b>Carpeta asfáltica (cm)</b>	<b>Base (cm)</b>	<b>SN</b>
Alternativa 1	41	0	7.10
Alternativa 2	36	15	7.06
Alternativa 3	34	30	7.54

Fuente - Elaboración propia

Nos damos cuenta que las tres alternativas presentan número estructurales similares por lo que procedemos a escoger el menor de ellos (SN=7.06) ya que cumple con los requerimientos para un adecuado desempeño y es aquel con el que se obtendrá menores espesores de capas. Este valor será usado para evaluar diferentes combinaciones de espesores de capas de tal manera que se obtenga un número estructural mayor o igual al original. De acuerdo al Instituto del Asfalto, el espesor mínimo de la carpeta asfáltica para un tráfico mayor

a  $1 \times 10^6$  ESAL es de 125 mm tal y como se muestra en la siguiente tabla. Esto se debe posiblemente a un factor de seguridad propio de la metodología la cual confiere capas de mejor calidad en la parte superior del pavimento.

Tabla 33 – Espesores mínimos requeridos de carpeta asfáltica

<b>Traffic ESAL</b>	<b>Traffic condition</b>	<b>Minimum thickness</b>
$10^4$	Light traffic parking lots, driveways, and light traffic rural roads	75 mm (3.0 in)
$10^4$ to $10^6$	Medium truck traffic	100 mm (4.0 in)
$10^6$	Medium to heavy truck traffic	125 mm (5.0 in) or greater

Fuente – The Asphalt Institute (1991)<sup>51</sup>

De esta manera, tenemos las siguientes alternativas de diseño, considerando un espesor mínimo de carpeta asfáltica de 5 pulgadas o 12.5 cm.

Tabla 34 – Alternativas IA de espesores de capa del pavimento flexible

<b>Alternativa</b>	<b>Carpeta asfáltica (pulgadas)</b>	<b>Base (cm)</b>	<b>Subbase (cm)</b>	<b>SN</b>
Alternativa 1	5.00	15.00	95.00	7.14
Alternativa 2	5.00	20.00	90.00	7.20
Alternativa 3	5.00	25.00	85.00	7.26
Alternativa 4	5.00	30.00	75.00	7.10
Alternativa 5	5.50	15.00	90.00	7.14
Alternativa 6	5.50	20.00	85.00	7.20
Alternativa 7	5.50	25.00	80.00	7.26
Alternativa 8	5.50	30.00	70.00	7.11
Alternativa 9	6.00	15.00	85.00	7.15
Alternativa 10	6.00	20.00	80.00	7.21
Alternativa 11	6.00	25.00	75.00	7.27
Alternativa 12	6.00	30.00	65.00	7.11

Fuente - Elaboración propia

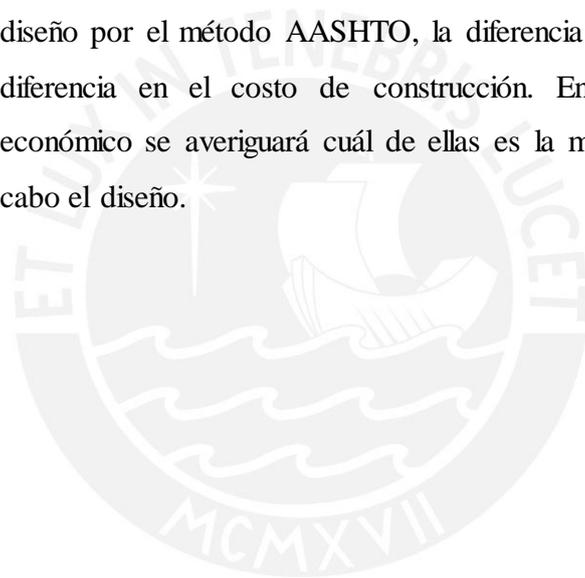
<sup>51</sup> The Asphalt Institute. (1991). THICKNESS DESIGN: Asphalt Pavements for Highways and Streets. Lexington

Imagen 20 – Sección transversal del pavimento flexible - IA

<b>Carpet a asfáltica</b>	Espesor: 5” - 6”. Pavimento de concreto asfáltico en caliente
<b>Base granular</b>	Espesor: 15cm – 30cm. CBR: 112%. Compactación al 100% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Modificado
<b>Subbase granular</b>	Espesor: 65cm – 95cm. CBR: 29%. Compactación al 100% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Modificado
<b>Subrasante</b>	Espesor: 30cm. CBR: 6%. Compactación al 95% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Estándar

Fuente - Elaboración propia

Todas las configuraciones mostradas son válidas al contar con un número estructural mayor o igual a 7.06; sin embargo al igual que en el diseño por el método AASHTO, la diferencia de espesores origina una diferencia en el costo de construcción. En el capítulo de análisis económico se averiguará cuál de ellas es la mejor opción para llevar a cabo el diseño.



## 5. DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Existen dos enfoques principales de diseño del espesor de los pavimentos rígidos. El primero se basa en relaciones empíricas basado en datos obtenidos en pistas de prueba como es el caso del método AASHTO 1993 mientras que el segundo enfoque, el de la metodología de la PCA, desarrolla relaciones basadas en el mecanismo de la evolución de falla en términos de las propiedades de los materiales del pavimento, la carga inducida y las solicitaciones térmicas, calibrando estas relaciones con el desempeño real del pavimento.

En el desarrollo de la presente tesis, se diseñará empleando las dos metodologías mencionadas anteriormente: Método AASHTO 1993 y Método de la Asociación de Cemento Portland 1984 (PCA).

### 5.1. MÉTODO AASHTO 1993

La guía de diseño para pavimentos rígidos fue desarrollada al mismo tiempo que para los pavimentos flexibles, y fue publicada en el mismo manual. El diseño está basado en ecuaciones empíricas obtenidas del ensayo de carretera de la AASHO. La idea central consiste en proporcionar a la losa de concreto un espesor suficiente para garantizar el nivel adecuado de desempeño del pavimento en todo el tiempo de diseño de la vida del pavimento.

#### 5.1.1. Variables de diseño

- **Tránsito de diseño;** el número de ejes equivalentes (ESAL) se halló anteriormente en el capítulo 3 y corresponde al valor de  $15.19 \times 10^6$  de ejes equivalentes para el caso del pavimento rígido.
- **Confiabilidad;** La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento tendrá una duración para el periodo de diseño sin presentar fallas estructurales. Este valor así como su correspondiente valor de desviación estándar normal son hallados de acuerdo a las tablas proporcionadas por la guía de la AASHTO, y estas tablas son las mismas que en el caso de pavimentos flexibles. De esta manera el valor de confiabilidad es de  $R=90\%$  y el valor de la desviación estándar normal es de  $Z_R = -1.282$ .

- **Desviación estándar combinada;** la desviación estándar combinada ( $S_o$ ), es un valor que toma en cuenta la variabilidad esperada de la predicción del tránsito y de otros factores que afectan el comportamiento del pavimento. De acuerdo a la guía de la AASHTO<sup>52</sup>, se recomienda usar un valor de 0.34 para pavimentos rígidos en el caso que se cuente con el conteo vehicular y de 0.39 en el caso contrario. Haremos uso del valor de 0.34, al contar con un estudio de tráfico previo.
- **Pérdida de serviciabilidad;** la serviciabilidad representa el confort o comodidad de circulación que la vía ofrece al usuario; su valor se encuentra comprendido entre 0 y 5 donde 5 representa la condición máxima ideal. La pérdida de serviciabilidad se encuentra definida como la diferencia entre la serviciabilidad inicial ( $p_o$ ) y la serviciabilidad final ( $p_t$ ). De acuerdo a la guía de la AASHTO<sup>53</sup>, se recomienda el uso de una serviciabilidad inicial de 4.5 para pavimentos rígidos. La serviciabilidad final es de 3 y se definió anteriormente en el capítulo 3. De esta manera la pérdida de serviciabilidad tiene el valor de 1.5.
- **Propiedades del concreto;** el módulo elástico ( $E_c$ ) y el módulo de rotura del concreto a los 28 días ( $S_c$ ) son los dos parámetros de entrada que se requieren como parte de las propiedades del concreto a ser usado en el diseño del pavimento rígido.

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones<sup>54</sup>, para determinar el módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ ) existe una relación entre dicho módulo y la resistencia a la compresión del concreto y se encuentra dado por la siguiente fórmula:

---

<sup>52</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. I-62

<sup>53</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. I-8

<sup>54</sup> Reglamento Nacional de Edificaciones. (2009). NORMA E.060 CONCRETO ARMADO (Primera ed.). Lima, pp. 199

$$E_c = 15000\sqrt{f'_c}$$

Considerando una resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de 350 kg/cm<sup>2</sup> (de acuerdo a las recomendaciones del MTC para valores de ESAL mayores a 15.00x10<sup>6</sup>), el módulo de elasticidad resultaría:  $E_c = 280,624 \text{ kg/cm}^2$ , lo cual es equivalente a  $E_c = 3.99 \times 10^6 \text{ psi}$ .

De acuerdo al ACI 363<sup>55</sup>, el módulo de rotura a los 28 días del concreto se encuentra definido por la siguiente fórmula:

$$S_c = \alpha \sqrt{f'_c}$$

Donde el valor de alfa varía entre 1.99 y 3.18. Procedemos a usar el valor promedio de 2.585 por lo que el módulo de rotura tendría un valor de aproximadamente 48 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual es equivalente a 680 psi.

- **Módulo de reacción efectivo de la subrasante**

El módulo de reacción efectivo de la subrasante es el valor de la capacidad de soporte del suelo, el cual depende del módulo resiliente de la subrasante. Este valor se ve afectado por la presencia de una capa granular y de acuerdo a la guía de la AASHTO, se recomienda hacer uso de una para valores de ESAL mayores a 1x10<sup>6</sup>. Para el desarrollo de la presente tesis, se hará uso de una base granular. El procedimiento recomendado en la guía de la AASHTO para hallar el módulo de reacción efectivo de la subrasante, cuando se hace uso de una capa granular entre la losa de concreto y la subrasante, es el siguiente:

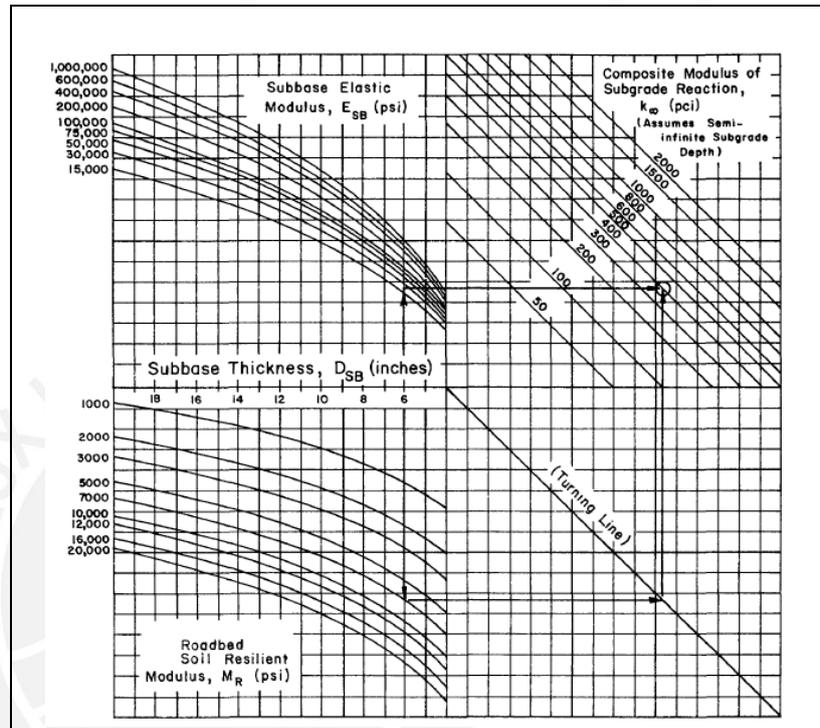
1. Haciendo uso del nomograma de la siguiente imagen, en el que se tienen como variables de entrada el módulo resiliente de la subrasante, el espesor de la subbase y el módulo de elasticidad de esta, se obtiene el módulo de reacción compuesto de la

---

<sup>55</sup> ACI 363R-92 (1997).State of the Art Report on Report on High Strength Concrete. pp. 23

subrasante ( $K_c$ ). Cabe resaltar que como se mencionó, se hará uso de una base granular por lo que los valores de entrada correspondientes a la subbase serán en realidad valores referidos a la base.

Imagen 21 – Carta para estimar el módulo de reacción compuesto asumiendo una profundidad semi-infinita de la capa de soporte



Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>56</sup>

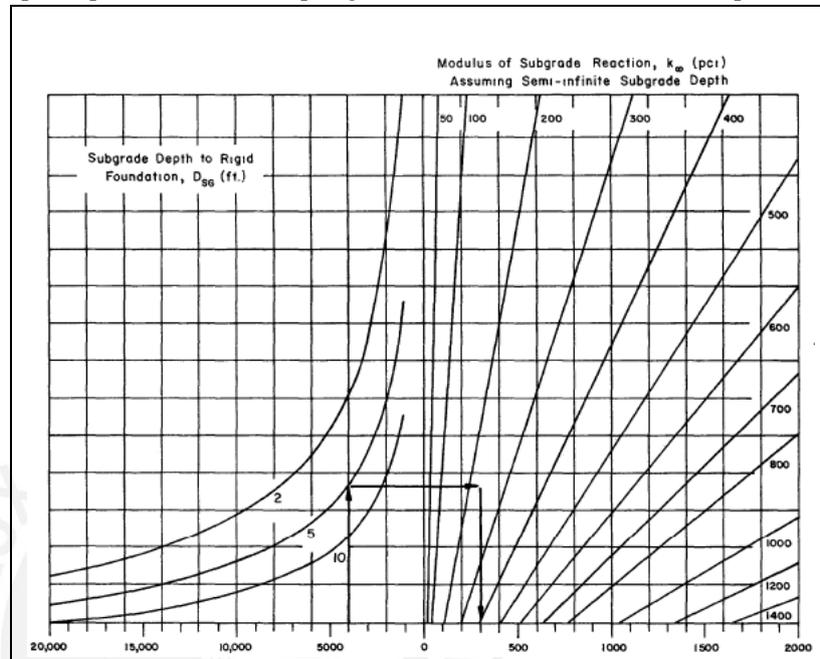
El módulo resiliente de la subrasante fue hallado anteriormente y tiene un valor de 8,043 psi; además, se considerará un espesor aleatorio de la base de 15 cm (6") y por último, el módulo de elasticidad de la base ,que fue hallado en el capítulo de diseño del pavimento flexible por la metodología AASHTO y que tiene un valor de 30,616 psi. Haciendo uso de estos 3 datos, hallamos que el módulo de reacción compuesto de la subrasante ( $k_c$ ) es de aproximadamente 450 pci.

2. Si la subrasante se encuentra sobre un estrato rígido rocoso a menos de 3 metros de profundidad, la guía de la AASHTO

<sup>56</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-39

recomienda hacer una corrección del módulo de reacción compuesto hallado anteriormente, haciendo uso de la siguiente gráfica:

Imagen 22 – Carta para modificar el módulo de reacción de la subrasante por la presencia de una capa rígida (estrato rocoso) cercana a la superficie



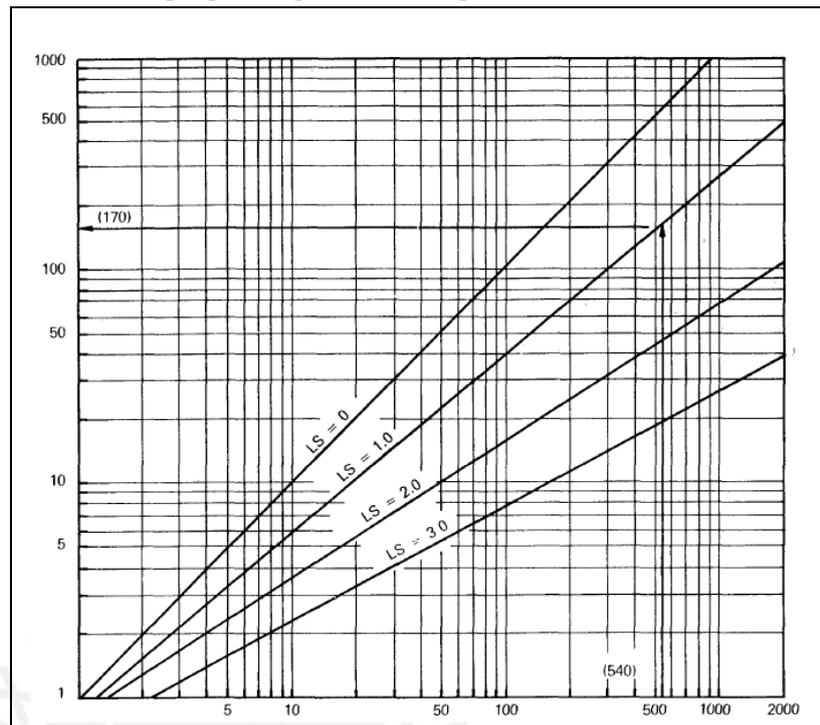
Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>57</sup>

En la presente tesis, se considerará que no existe un estrato rígido rocoso a menos de 3 metros de la superficie por lo que el módulo de reacción compuesto corregido ( $k_{cc}$ ) seguirá siendo 450 pci.

- Finalmente, se considerará una reducción del valor del módulo de reacción compuesto, corregido por el factor de pérdida de soporte  $L_s$ . Este parámetro indica la pérdida de apoyo potencial de las losas debido a la erosionabilidad de la capa granular o a los asentamientos diferenciales de la subrasante. La reducción se hará haciendo uso de la siguiente gráfica:

<sup>57</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-40

Imagen 23 – Carta para modificar el módulo de reacción de la subrasante por pérdida potencial de soporte de la subbase



Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>58</sup>

De acuerdo a la guía de la AASHTO el valor de Ls para materiales granulares sin tratar varía entre 1 y 3. Como se considerará en el diseño del pavimento buenas condiciones de drenaje, habrá poca posibilidad de erosión de la subbase o asentamiento de la subrasante por lo que se escogerá el menor valor de Ls, correspondiente al valor de 1. De esta manera hallamos el módulo de reacción efectivo de la subrasante (K efectivo) que tiene un valor aproximado de 130 pci.

- **Coefficiente de transferencia de carga;** el coeficiente de transferencia de carga J es un factor usado en pavimentos rígidos que toma en cuenta la capacidad del concreto de transferir una carga a través de juntas y grietas. Este coeficiente depende de del tipo de pavimento y berma que se construirá. En la presente tesis se ha considera un pavimento articulado de concreto simple (JPCP) y

<sup>58</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-42

bermas de asfalto por lo que según la tabla 2.6 de la página II-26 de la guía de la AASHTO, que se muestra a continuación, el valor del coeficiente de transferencia de carga sería  $J = 3.2$

Tabla 35 – Valores recomendados de coeficientes de transferencia de carga para varios tipos de pavimentos y diferentes condiciones de diseño

Type of shoulder	Asphalt		Tied PCC	
	Yes	No	Yes	No
JPCP and JRCP	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
CRCP	2.9 – 3.2	N/A	2.3 – 2.9	N/A

Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>59</sup>

- Coefficiente de drenaje;** para poder hallar el coeficiente de drenaje (Cd) es necesario conocer dos parámetros, al igual que en la metodología AASHTO para pavimentos flexibles: la calidad del drenaje de la subrasante y el porcentaje de tiempo que la estructura de pavimento estará expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación. El diseño de la carretera se realizará considerando material de base de buena calidad de drenaje (el agua es drenada por el pavimento a más tardar en 1 día) y como se determinó en el capítulo 2, el porcentaje de tiempo que el pavimento estará expuesto a niveles de humedad próximas a la saturación será mayor al 25%. De acuerdo a lo mencionado y a la tabla 2.5 de la página II-26 de la guía de la AASHTO, que se muestra a continuación, se considerará el valor de 1.0 para el coeficiente de drenaje (Cd).

<sup>59</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-26

Tabla 36 – Valores recomendados de coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos

Quality of drainage	Less than 1%	1-5%	5-25%	Greater than 25%
Excellent	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Good	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Fair	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Poor	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Very poor	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>60</sup>

### 5.1.2. Diseño de espesores

Con el objetivo de hallar el espesor de la losa de concreto la guía de la AASHTO desarrolló la siguiente ecuación para el cálculo del mismo:

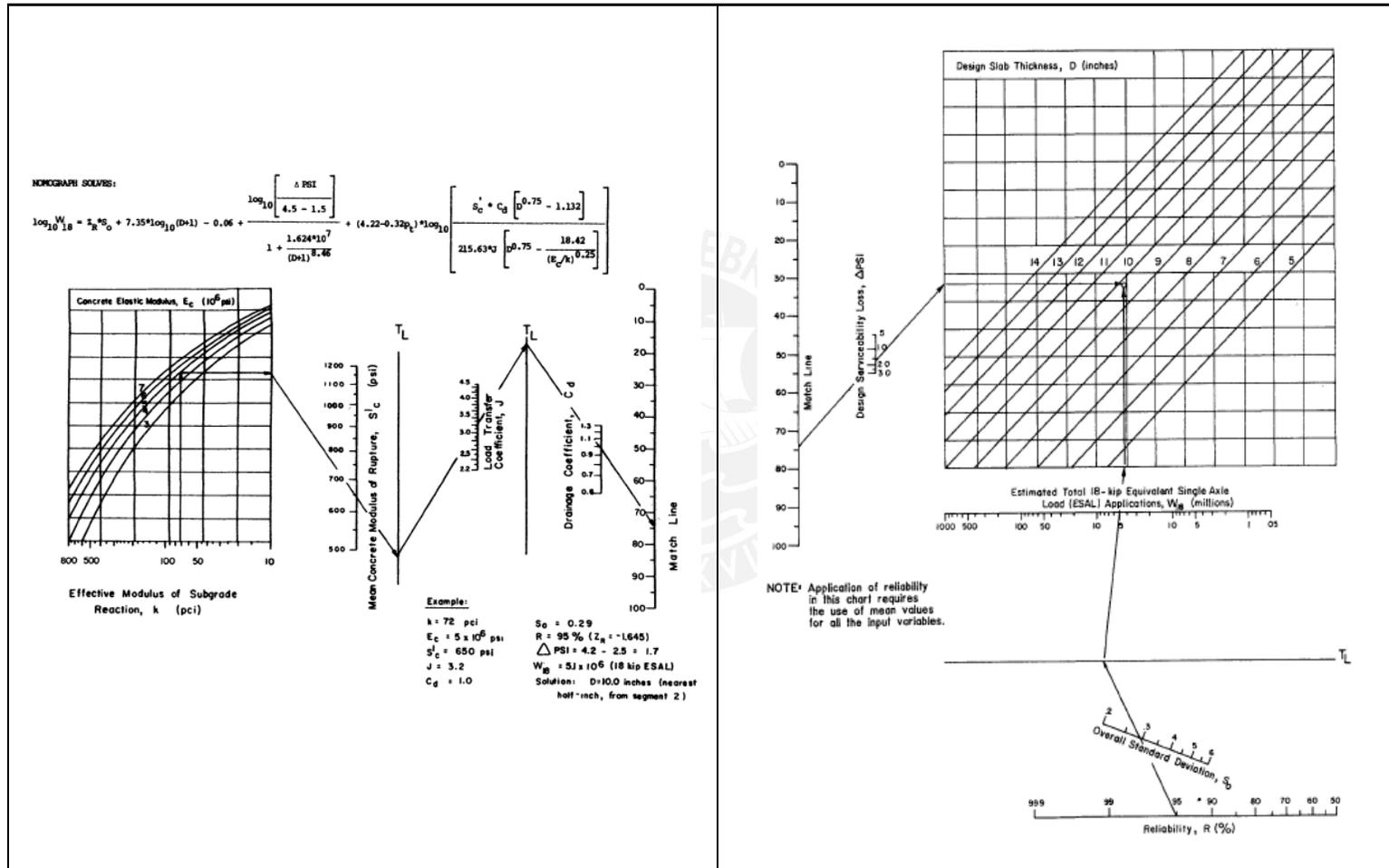
$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1.0 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32p_t) \log \frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J (D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/K)^{0.25}})}$$

Donde:  $W_{18}$  es el número estimado de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas (ESAL),  $Z_R$  es la desviación estándar normal,  $S_0$  es el error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento,  $\Delta PSI$  es la diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial ( $p_o$ ) y la serviciabilidad final ( $p_t$ ),  $S_c$  es el módulo de rotura del concreto a los 28 días,  $C_d$  es el coeficiente de drenaje,  $J$  es el coeficiente de transmisión de carga,  $E_c$  es el módulo de elasticidad del concreto,  $K$  es el módulo efectivo de reacción y  $D$  es el espesor de la losa de concreto.

Sin embargo, el uso de la ecuación mostrada resulta tediosa por lo que se utilizará, para el cálculo del espesor de la losa de concreto, los nomogramas de la figura 3.7 de la página II-45 y II-46 de la guía de la AASHTO que se muestran a continuación:

<sup>60</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-26

Imagen 24 – Nomograma para el cálculo del espesor (D) en pavimentos rígidos



Fuente - American Association of State Highway and Transportation Officials (1993)<sup>61</sup>

<sup>61</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures. Washington D.C, pp. II-45, II-46

De acuerdo a los valores hallados anteriormente los cuales se encuentran resumidos en la siguiente tabla, se procede a calcular el espesor de la losa de concreto haciendo uso de los nomogramas mostrados anteriormente.

Tabla 37 – Parámetros de diseño del espesor de la losa de concreto

Parámetro	Valor	Unidades
Módulo efectivo de reacción (k efectivo)	130	pci
Módulo de elasticidad del concreto (Ec)	$3.99 \times 10^6$	psi
Módulo de rotura del concreto (Sc)	680	psi
Coefficiente de transferencia de carga (J)	3.2	-
Coefficiente de drenaje (Cd)	1.0	-
Pérdida de serviciabilidad ( $\Delta PSI$ )	1.5	-
Confiabilidad (R%)	90%	-
Desviación estándar combinada (So)	0.34	-
Tránsito de diseño	$15.19 \times 10^6$	ESAL
<b>Espesor de losa (D)</b>	10.9	pulgadas

Fuente - Elaboración propia

El espesor calculado es de 10.9 pulgadas equivalente a 28 cm aproximadamente. Como se mencionó anteriormente se consideró un espesor de base de 15 cm para el cálculo del módulo de reacción efectivo de la subrasante; sin embargo el valor del espesor de base podría aumentar de tal manera que el espesor de la losa de concreto se vea reducida ya que al aumentar el espesor de base, el valor del módulo de reacción efectivo de la subrasante cambia y por lo tanto el espesor de la losa de concreto también. Se presentan las siguientes posibles combinaciones para los espesores de las capas del pavimento rígido:

Tabla 38 – Alternativas AASHTO de espesores de capa del pavimento rígido

Alternativa	Espesor de base (cm)	K efectivo (pci)	Espesor de losa (cm)
Alternativa 1	15	130	27.81
Alternativa 2	20	140	27.73
Alternativa 3	25	150	27.65
Alternativa 4	30	155	27.62

Fuente - Elaboración propia

Nos podemos dar cuenta que al variar el espesor de la base, varía también el módulo de reacción efectivo de la subrasante (K efectivo); sin embargo no influye significativamente en la disminución del espesor de losa, por lo que económicamente sería conveniente usar la alternativa 1, es decir, un espesor de base de 15 cm y un espesor de losa de 28 cm aproximadamente.

Imagen 25 – Sección transversal del pavimento rígido - AASHTO

<b>Losa de concreto</b>	Espesor: 28cm. Pavimento de concreto de Cemento Portland. F'c mínimo para dar apertura al tránsito: 280 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Base granular</b>	Espesor: 15cm. CBR: 112%. Compactación al 100% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Modificado
<b>Subrasante</b>	Espesor: 30cm. CBR: 6%. Compactación al 95% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Estándar

Fuente - Elaboración propia

## 5.2. MÉTODO PCA

El procedimiento de diseño de la Asociación de Cemento Portland (PCA) para carreteras y calles de concreto fue publicado en 1984, reemplazando a la publicada en 1966, y puede ser aplicado a pavimentos de concreto simple con juntas (JPCP), pavimentos de concreto con junta y con refuerzo (JRCP) y pavimentos de concreto con refuerzo continuo (CRCP). Un programa de computadora basado en elementos finitos llamado JSLAB fue empleado para calcular los esfuerzos críticos y deflexiones, los cuales se usaron luego en conjunto con algunos criterios de diseño para desarrollar las tablas y diagramas de diseño usadas por esta metodología.

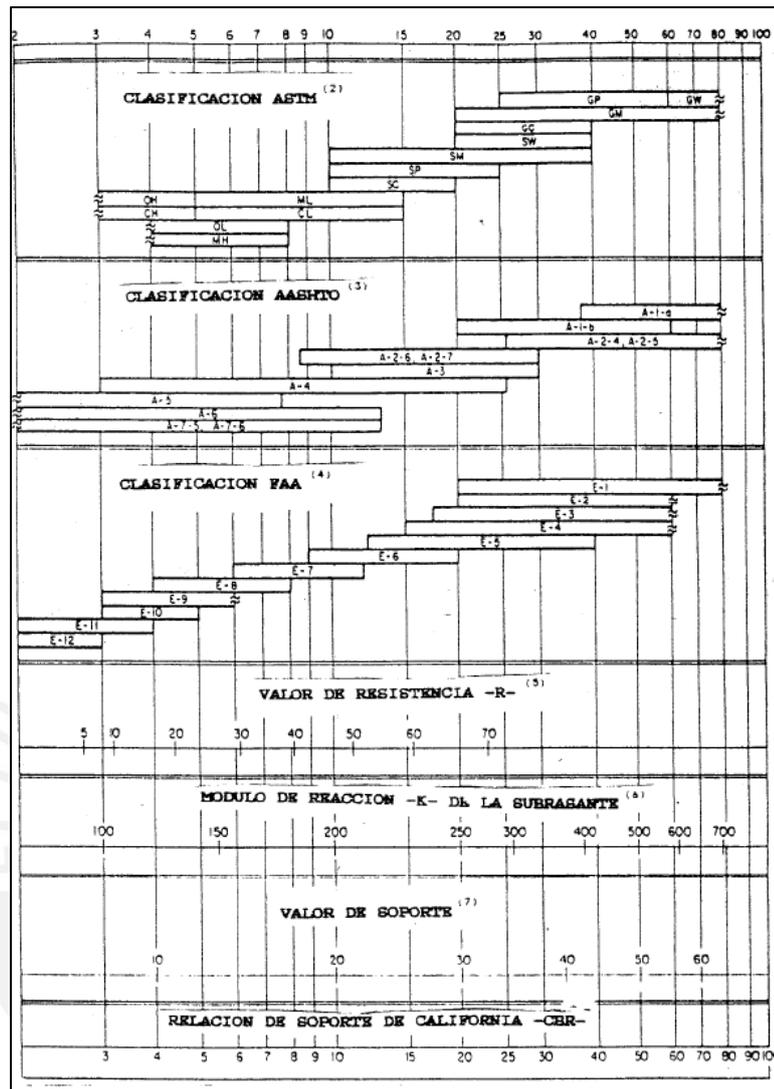
La metodología de la PCA evalúa dos criterios de diseño: fatiga y erosión. Fatiga para mantener los esfuerzos del pavimento debido a la acción de cargas repetidas, dentro de límites seguros previniendo así el agrietamiento; erosión para limitar los efectos de las deflexiones del pavimento en el borde de las losas, juntas y esquinas controlando así la erosión de la fundación y de los materiales de las bermas. Este último criterio es necesario pues algunas formas

de daño del pavimento tales como bombeo, fallas y daños de las bermas no son producto de la fatiga.

### 5.2.1. Variables de diseño

- **Tipo de junta y berma;** para el desarrollo de la presente tesis se ha optado por elegir la colocación de pasadores en las juntas transversales, es decir, un pavimento de concreto simple con juntas (JPCP). Además se ha optado por el uso de bermas de asfalto. Si bien las bermas de concreto dan una mejor continuidad al pavimento y permiten resistir mayor cantidad de cargas en el borde, su costo es mayor.
- **Módulo de rotura del concreto ( $Sc$ );** se refiere al valor obtenido del ensayo de resistencia a la flexión de una viga de concreto apoyada en dos puntos y cargada en el tercio central. Como se mencionó anteriormente, el módulo de rotura a los 28 días del concreto se encuentra definido por la siguiente fórmula:  $Sc = \alpha \sqrt{f'c}$ , donde el valor de alfa varía entre 1.99 y 3.18. Procedemos a usar el valor promedio de 2.585 y el valor de  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup> (de acuerdo a las recomendaciones del MTC para valores de ESAL mayores a  $15.00 \times 10^6$ ); por lo que el módulo de rotura tendría un valor de 48 kg/cm<sup>2</sup> o 4.8 Mpa.
- **Módulo de reacción efectivo de la subrasante;** la capacidad de soporte de la subrasante y de la base se encuentran definidos por el módulo de reacción efectivo de la subrasante. El módulo de reacción de la subrasante se puede hallar haciendo uso de la siguiente imagen de la PCA:

Imagen 26 - Módulo de reacción de la subrasante en función del valor de soporte (CBR) del suelo



Fuente - Portland Cement Association (1984)<sup>62</sup>

De acuerdo a la imagen de la PCA, para un CBR de 6%, el módulo de reacción de la subrasante tendría un valor de 160 pci; sin embargo se deberá aplicar un factor de corrección por el uso de una base granular entre la losa de concreto y la subrasante, lo cual mejorará las condiciones de soporte y por lo tanto reducirá el espesor de la losa de concreto. Este valor corregido se conoce como módulo de reacción efectivo de la subrasante (k efectivo).

<sup>62</sup> Portland Cement Association. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 7

De acuerdo a la tabla 1 de la página 6 de la guía de la PCA, que se muestra a continuación, se tienen diferentes valores k efectivo para distintos valores k de la subrasante y espesores de base

Tabla 39 – Efecto de la base sobre los valores k de la subrasante

Valor k de la subrasante (pci)	Valor k efectivo (pci)			
	4"	6"	9"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Fuente - Portland Cement Association (1984)<sup>63</sup>

Si se asume inicialmente un espesor de base de 15 cm, por interpolación se obtiene que el valor k efectivo es de 194 pci o 52.6 Mpa/m. Se usará un k efectivo de diseño de 50 Mpa/m.

- **Factor de seguridad de carga (LSF);** cada carga por eje debe ser multiplicado por este factor de seguridad para hallar la carga de diseño por eje. El factor de seguridad de carga es aquel que compensa las sobrecargas no previstas de camiones sobrecargados; y de acuerdo a la guía de la PCA<sup>64</sup>, se indica que este factor toma el valor de 1.2 para proyectos interestatales donde habrán altos volúmenes de tráfico de camiones por lo que optamos por escoger este valor.

### 5.2.2. Diseño de espesores

En primer lugar se deben determinar la distribución de ejes de carga; es decir los tipos de ejes que circularán por la carretera y la carga reglamentaria de cada uno de acuerdo al vehículo al que pertenecen. Se tiene la siguiente tabla resumen en la cual se ha considerado la participación de los automóviles a pesar de no presentar un daño considerable a la estructura del pavimento.

<sup>63</sup> Portland Cement Association. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 6

<sup>64</sup> Portland Cement Association. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 10

Tabla 40 –IMDA (ambos sentidos) y pesos reglamentarios por eje (ton)

Vehículo	IMDA	Peso máximo (ton)			
		Eje delantero	Conjunto de ejes posteriores		
			1°	2°	3°
Automóviles	2320	0.9	0.9		
C2	796	7	11		
C3	101	7	18		
C4	4	7	23		
T2S2	5	7	11	18	
T2S3	3	7	11	25	
T3S2	12	7	18	18	
T3S3	18	7	18	25	
C2R3	10	7	11	11	18
B2	18	7	11		
B3-1	14	7	16		
B4-1	12	7+7	16		

Fuente - Elaboración propia

Luego se procede a realizar el conteo de las repeticiones por tipo y peso de cada eje como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 41 – Repeticiones por tipo y peso de cada eje

Tipo y peso de eje	Eje simple (ton)			Eje tándem (ton)		Eje trídem (ton)	
	0.9	7	11	16	18	23	25
<b>Repeticiones actuales</b>	4,640	1,005	842	26	158	4	21

Fuente - Elaboración propia

Finalmente se hallan las repeticiones esperadas acumuladas al periodo de diseño de la siguiente forma:

$$n_i = (n_0)_i \times G \times D \times L \times 365 \times Y$$

Siendo  $n_i$  el número total de repeticiones de diseño por día para el grupo de carga  $i$ ,  $(n_0)_i$  es el número inicial de repeticiones por día para el grupo de carga  $i$ ,  $G$  es el factor de crecimiento,  $D$  es el factor de distribución direccional,  $L$  es el factor de distribución de carril y  $Y$  es el periodo de diseño en años. El valor  $G$  se obtiene de la tabla 3 de la página 8 de la guía de la PCA que se muestra a continuación:

Tabla 42 – Factor de crecimiento para diferentes tasas anuales de crecimiento de tráfico y diferentes periodos de diseño

Tasa anual de crecimiento de tráfico	Factor de proyección (20 años)	Factor de proyección (40 años)
1	1.1	1.2
1-1/2	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2-1/2	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3-1/2	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4-1/2	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5-1/2	1.7	2.9
6	1.8	3.2

Fuente - Portland Cement Association (1984)<sup>65</sup>

Para hacer uso de la tabla mostrada se necesita el valor de la tasa anual de crecimiento de tráfico (r) y el periodo de diseño (Y). Siendo estos valores de 4.18% y 15 años respectivamente, el valor de G resulta 1.360

Para el caso del factor direccional D se asume que el tráfico es de igual distribución en ambos carriles por lo que el valor de D es 0.5. El valor del factor de distribución de carril L es de 1.0 al ser cada carril considerado como carril de diseño. Definidas todas las variables se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 43 – Repeticiones esperadas por tipo y peso de cada eje

Tipo y peso de eje	Eje simple (ton)			Eje tándem (ton)		Eje trídem (ton)	
	0.9	7	11	16	18	23	25
Repeticiones actuales	4,640	1,005	842	26	158	4	21
Repeticiones esperadas	17,274,720	3,741,615	3,134,766	96,798	588,234	14,892	78,183

Fuente - Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, el procedimiento indicado por la PCA se basa en un análisis por fatiga y otro por erosión. Es importante mencionar que el método consiste en ensayos iterativos en donde se irá variando el espesor de la losa de concreto. Se asumirá en esta primera

<sup>65</sup> Portland Cement Association. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp.8

iteración un espesor de losa de prueba de 22 cm y para todas las iteraciones: juntas con dowels y bermas de asfalto. Cabe resaltar que la metodología de la PCA considera dos casos para el confinamiento del pavimento: con bermas de concreto o sin bermas de concreto. En este caso se asumirá que un pavimento con bermas de asfalto es equivalente a un pavimento sin bermas de concreto. En el caso del análisis por fatiga es necesario calcular los esfuerzos equivalente y los factores de relación de esfuerzo para los tres tipos de ejes: simple, tándem y trídem. Los esfuerzos equivalentes para ejes simples y tándem se hallan haciendo uso de la tabla 6a de la página 14 de la guía de la PCA, la cual se muestra a continuación:

Tabla 44 – Esfuerzo equivalente en pavimento sin berma de concreto (eje simple y tándem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Fuente - Portland Cement Association (1995)<sup>66</sup>

Dado el valor k efectivo de diseño hallado anteriormente de 50 Mpa/m procedemos a hallar por interpolación los esfuerzos equivalentes para los ejes simple y tándem, los cuales toman los valores de 1.515 Mpa y

<sup>66</sup> Portland Cement Association. (1995). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 14

1.34 Mpa respectivamente. Para el caso del esfuerzo equivalente para el eje trídem se hace uso de la tabla C1 de la página 40 de la guía de la PCA, la cual se muestra a continuación:

Tabla 45 – Esfuerzo equivalente en pavimento sin berma o con berma de concreto (eje trídem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	510/431	456/392	437/377	428/369	419/362	414/360	412/359
4.5	439/365	380/328	359/313	349/305	339/297	331/292	328/291
5	387/317	328/281	305/266	293/258	282/250	272/244	269/242
5.5	347/279	290/246	266/231	253/223	240/214	230/208	226/206
6	315/249	261/218	237/204	223/196	209/187	198/180	193/178
6.5	289/225	238/196	214/183	201/175	186/166	173/159	168/156
7	267/204	219/178	196/165	183/158	167/149	154/142	148/138
7.5	247/187	203/162	181/151	168/143	153/135	139/127	132/124
8	230/172	189/149	168/138	156/131	141/123	126/116	120/112
8.5	215/159	177/138	158/128	145/121	131/113	116/106	109/102
9	200/147	166/128	148/119	136/112	122/105	108/98	101/94
9.5	187/137	157/120	140/111	129/105	115/98	101/91	93/87
10	174/127	148/112	132/104	122/98	108/91	95/84	87/81
10.5	163/119	140/105	125/97	115/92	103/86	89/79	82/76
11	153/111	132/99	119/92	110/87	98/81	85/74	78/71
11.5	142/104	125/93	113/86	104/82	93/76	80/70	74/67
12	133/97	119/88	108/82	100/78	89/72	77/66	70/63
12.5	123/91	113/83	103/78	95/74	85/68	73/63	67/60
13	114/85	107/79	98/74	91/70	81/65	70/60	64/57
13.5	105/80	101/75	93/70	87/67	78/62	67/57	61/54
14	97/75	96/71	89/67	83/63	75/59	65/54	59/51

Fuente - Portland Cement Association (1995)<sup>67</sup>

De la tabla, por interpolación, se obtiene que el esfuerzo equivalente para el eje trídem es de 1.01 Mpa. Los factores de relación de esfuerzo se obtienen dividiendo los esfuerzos equivalentes entre el módulo de rotura del concreto ( $S_c$ ), el cual tiene un valor de 4.8 Mpa; de esta manera para los ejes simple, tándem y trídem se obtienen los valores de 0.3156, 0.2792 y 0.2104 respectivamente. Resumimos los valores obtenidos del análisis por fatiga en la siguiente tabla:

Tabla 46 – Esfuerzo equivalente y factor de relación de esfuerzo por tipo de eje

Tipo de eje	Esfuerzo equivalente (Mpa)	Factor de relación de esfuerzo
Simple	1.515	0.3156
Tándem	1.34	0.2792
Trídem	1.01	0.2104

Fuente - Elaboración propia

<sup>67</sup> Portland Cement Association. (1995). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 40

Por otro lado, en el caso del análisis por erosión es necesario calcular los factores de erosión para los tres tipos de ejes: simple, tándem y trídem.

Para el caso de los ejes simple y tándem se hace uso de la tabla 7a de la página 16 de la guía de la PCA que se muestra a continuación:

Tabla 47 – Factor de erosión para ejes simple y tándem en pavimentos de concreto con dowels y sin bermas de concreto

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

Fuente - Portland Cement Association (1995)<sup>68</sup>

Dado el valor k efectivo de diseño hallado anteriormente de 50 Mpa/m, procedemos a hallar por interpolación los factores de erosión para los ejes simple y tándem, los cuales toman los valores de 2.7 y 2.85 respectivamente. Para el caso del factor de erosión para el eje trídem se hace uso de la tabla C2 de la página 41 de la guía de la PCA, la cual se muestra a continuación:

<sup>68</sup> Portland Cement Association. (1995). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 16

Tabla 48 – Factor de erosión para ejes trídem en pavimentos de concreto con dowels, sin bermas y con bermas de concreto

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase. pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.89/3.33	3.82/3.20	3.75/3.13	3.70/3.10	3.61/3.05	3.53/3.00
4.5	3.78/3.24	3.69/3.10	3.62/2.99	3.57/2.95	3.50/2.91	3.44/2.87
5	3.68/3.16	3.58/3.01	3.50/2.89	3.46/2.83	3.40/2.79	3.34/2.75
5.5	3.59/3.09	3.49/2.94	3.40/2.80	3.36/2.74	3.30/2.67	3.25/2.64
6	3.51/3.03	3.40/2.87	3.31/2.73	3.26/2.66	3.21/2.58	3.16/2.54
6.5	3.44/2.97	3.33/2.82	3.23/2.67	3.18/2.59	3.12/2.50	3.08/2.45
7	3.37/2.92	3.26/2.76	3.16/2.61	3.10/2.53	3.04/2.43	3.00/2.37
7.5	3.31/2.87	3.20/2.72	3.09/2.56	3.03/2.47	2.97/2.37	2.93/2.31
8	3.26/2.83	3.14/2.67	3.03/2.51	2.97/2.42	2.90/2.32	2.86/2.25
8.5	3.20/2.79	3.09/2.63	2.97/2.47	2.91/2.38	2.84/2.27	2.79/2.20
9	3.15/2.75	3.04/2.59	2.92/2.43	2.86/2.34	2.78/2.23	2.73/2.15
9.5	3.11/2.71	2.99/2.55	2.87/2.39	2.81/2.30	2.73/2.18	2.68/2.11
10	3.06/2.67	2.94/2.51	2.83/2.35	2.76/2.26	2.68/2.15	2.63/2.07
10.5	3.02/2.64	2.90/2.48	2.78/2.32	2.72/2.23	2.64/2.11	2.58/2.04
11	2.98/2.60	2.86/2.45	2.74/2.29	2.68/2.20	2.59/2.08	2.54/2.00
11.5	2.94/2.57	2.82/2.42	2.70/2.26	2.64/2.16	2.55/2.05	2.50/1.97
12	2.91/2.54	2.79/2.39	2.67/2.23	2.60/2.13	2.51/2.02	2.46/1.94
12.5	2.87/2.51	2.75/2.36	2.63/2.20	2.56/2.11	2.48/1.99	2.42/1.91
13	2.84/2.48	2.72/2.33	2.60/2.17	2.53/2.08	2.44/1.96	2.39/1.88
13.5	2.81/2.46	2.68/2.30	2.56/2.14	2.49/2.05	2.41/1.93	2.35/1.86
14	2.78/2.43	2.65/2.28	2.53/2.12	2.46/2.03	2.38/1.91	2.32/1.83

Fuente - Portland Cement Association (1995)<sup>69</sup>

De la tabla, por interpolación, se obtiene que el factor de erosión para el eje trídem es de 2.975. Resumimos los valores obtenidos del análisis por erosión en la siguiente tabla:

Tabla 49 – Factor de erosión por tipo de eje

Tipo de eje	Factor de erosión
Simple	2.7
Tándem	2.85
Trídem	2.975

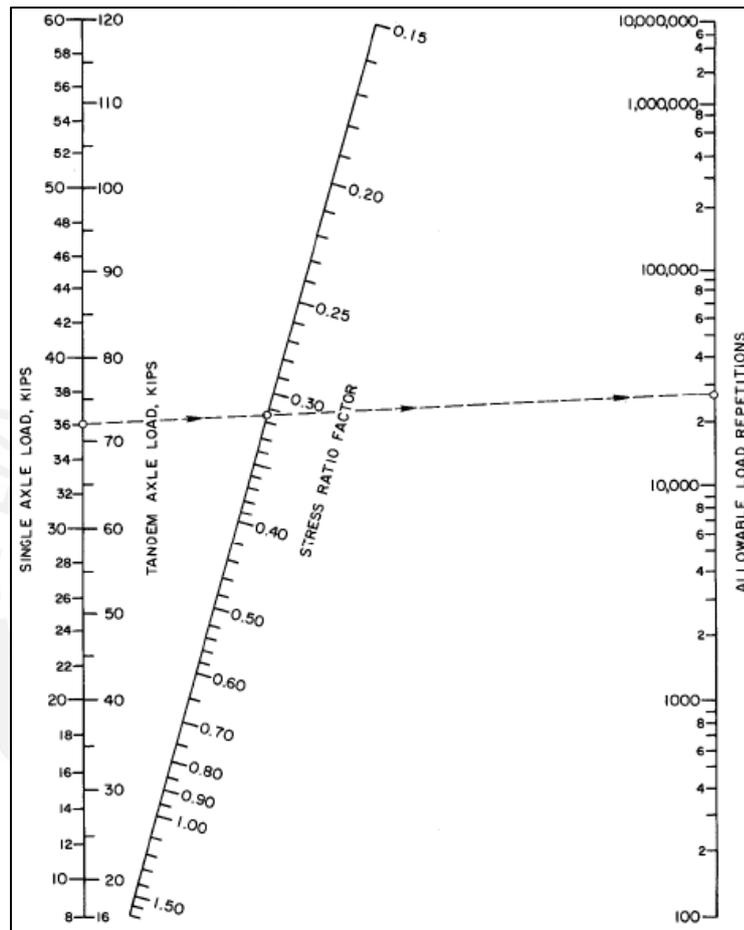
Fuente - Elaboración propia

Además de ello, el procedimiento de la PCA indica que debe ser calculado un número permisible de repeticiones de carga, por cada carga, que se encuentra en función de la carga de diseño por tipo de eje y el factor de relación esfuerzo para el caso del análisis por fatiga y en función de la carga de diseño por tipo de eje y el factor de erosión para el caso del análisis por erosión.

<sup>69</sup> Portland Cement Association. (1995). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 41

Para el caso del análisis por fatiga se hace uso de la figura 5 de la página 15 de la guía de la PCA para el cálculo del número permisible de repeticiones de carga para ejes simples y tándem. Esta gráfica se muestra a continuación:

Imagen 27 – Análisis de fatiga: Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzos en pavimentos con y sin berma de concreto

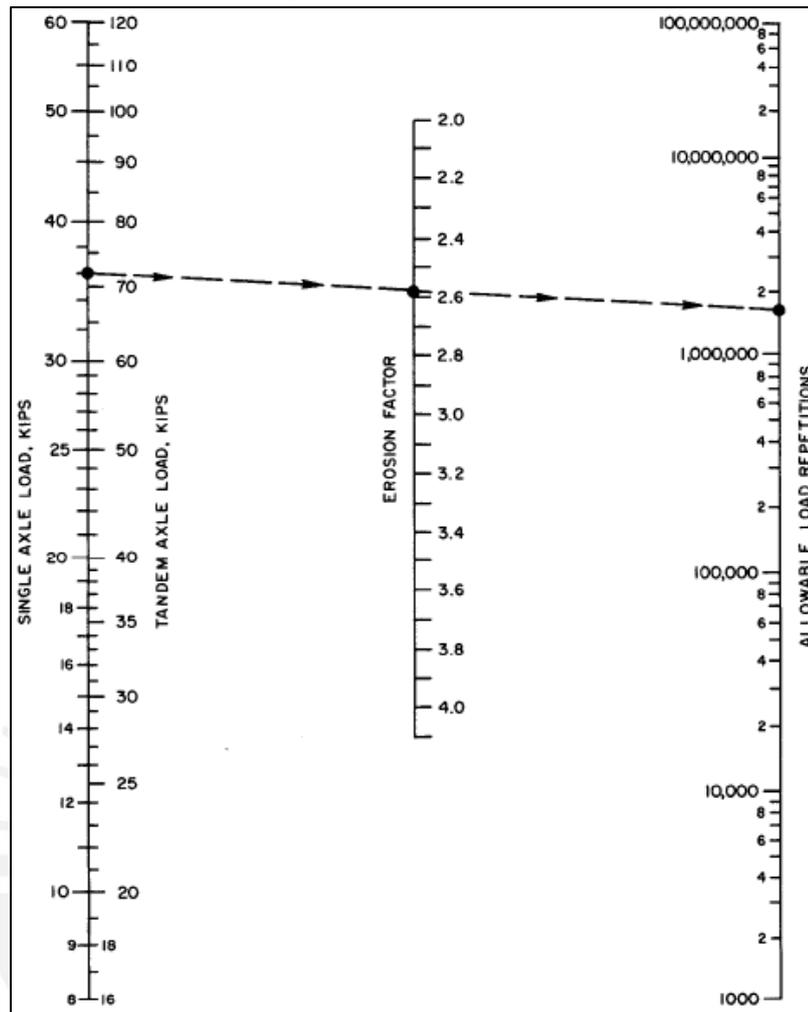


Fuente - Portland Cement Association (1995)<sup>70</sup>

Para el caso del análisis por erosión se hace uso de la figura 6a de la página 17 de la guía de la PCA para el cálculo del número permisible de repeticiones de carga para ejes simples y tándem. Esta gráfica se muestra a continuación:

<sup>70</sup> Portland Cement Association. (1995). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 15

Imagen 28 – Análisis de erosión: Repeticiones admisibles en función del factor de erosión en pavimentos sin berma de concreto



Fuente - Portland Cement Association (1995)<sup>71</sup>

En el caso de los ejes trídem, se hace uso de las 2 gráficas mostradas anteriormente con la salvedad que la carga de diseño por tipo de eje es dividida entre tres para el cálculo del número permisible de repeticiones de carga. Cabe resaltar que la guía de la PCA indica que no es necesario extrapolar los valores de las repeticiones permisibles. Si la intersección de las líneas ocurre fuera de la parte superior de la carta, las repeticiones permisibles de carga pueden ser consideradas ilimitadas.

<sup>71</sup> Portland Cement Association. (1995). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. United States of America, pp. 17

Finalmente se tiene la siguiente tabla de diseño que resume todos los términos definidos anteriormente y los resultados del análisis por fatiga y erosión:

Tabla 50 – Primera iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto

Espesor de losa (cm)	22	Juntas con dowels	SÍ
K efectivo (Mpa/m)	50	Bermas de concreto	NO
Módulo de rotura (Mpa)	4.8	Periodo de diseño	15 años
Factor de seguridad FSc	1.2	Tasa de crecimiento (%)	4.18%

Carga por eje, Tn	Carga x FSc, KN	Repeticiones esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	Porcentaje de erosión
Ejes simples	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.515			
	Factor de esfuerzo		0.3156			
	Factor de erosión		2.7			
0.9	10.58	17,274,720	ilimitado	0	ilimitado	0
7	82.32	3,741,615	ilimitado	0	91,903,941	4.07
11	129.36	3,134,766	679,936	461.04	2,504,452	125.17
Ejes tándem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.34			
	Factor de esfuerzo		0.2792			
	Factor de erosión		2.85			
16	188.16	96,798	ilimitado	0	6,498,120	1.49
18	211.68	588,234	ilimitado	0	3,006,489	19.57
Ejes tridem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.01			
	Factor de esfuerzo		0.2104			
	Factor de erosión		2.975			
23	270.48	14,892	ilimitado	0	3,615,954	0.41
25	294.00	78,183	ilimitado	0	2,147,101	3.64
<b>TOTAL</b>				<b>461.04</b>		<b>154.35</b>

Fuente - Elaboración propia

Nos damos cuenta que el diseño con un espesor de losa de 22 cm es estructuralmente deficiente pues presenta porcentajes de fatiga y de erosión por encima del 100%. Debido a esto se opta por iterar con un espesor de losa de 23 cm. Los resultados finales se muestran a continuación:

Tabla 51 – Segunda iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto

Espesor de losa (cm)	23	Juntas con dowels	SÍ
K efectivo (Mpa/m)	50	Bermas de concreto	NO
Módulo de rotura (Mpa)	4.8	Periodo de diseño	15 años
Factor de seguridad FSc	1.2	Tasa de crecimiento (%)	4.18%

Carga por eje, Tn	Carga x FSc, KN	Repeticiones esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	Porcentaje de erosión
Ejes simples	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.43			
	Factor de esfuerzo		0.2979			
	Factor de erosión		2.645			
0.9	10.58	17,274,720	ilimitado	0	ilimitado	0
7	82.32	3,741,615	ilimitado	0	240,163,710	1.56
11	129.36	3,134,766	4,400,456	71.24	3,797,903	82.54
Ejes tándem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.275			
	Factor de esfuerzo		0.2656			
	Factor de erosión		2.8			
16	188.16	96,798	ilimitado	0	9,618,619	1.01
18	211.68	588,234	ilimitado	0	4,295,032	13.70
Ejes trídem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		0.965			
	Factor de esfuerzo		0.201			
	Factor de erosión		2.935			
23	270.48	14,892	ilimitado	0	4,924,856	0.30
25	294.00	78,183	ilimitado	0	2,880,836	2.71
<b>TOTAL</b>				<b>71.24</b>		<b>101.82</b>

Fuente - Elaboración propia

Nos damos cuenta que el diseño continúa siendo estructuralmente deficiente pues a pesar de tener un porcentaje de fatiga menor al 100% aún presenta un porcentaje de erosión ligeramente mayor al 100%. Debido a esto se opta por iterar con un espesor de losa de 24 cm. Los resultados finales se muestran a continuación:

Tabla 52 – Tercera iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto

Espesor de losa (cm)	24	Juntas con dowels	Sí
K efectivo (Mpa/m)	50	Bermas de concreto	NO
Módulo de rotura (Mpa)	4.8	Periodo de diseño	15 años
Factor de seguridad FSc	1.2	Tasa de crecimiento (%)	4.18%

Carga por eje, Tn	Carga x FSc, KN	Repeticiones esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	Porcentaje de erosión
Ejes simples	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.345			
	Factor de esfuerzo		0.2802			
	Factor de erosión		2.59			
0.9	10.58	17,274,720	ilimitado	0	ilimitado	0
7	82.32	3,741,615	ilimitado	0	1,080,373,296	0.35
11	129.36	3,134,766	ilimitado	0.00	5,752,203	54.50
Ejes tándem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.215			
	Factor de esfuerzo		0.2531			
	Factor de erosión		2.755			
16	188.16	96,798	ilimitado	0	14,286,935	0.68
18	211.68	588,234	ilimitado	0	6,105,016	9.64
Ejes trídem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		0.92			
	Factor de esfuerzo		0.1917			
	Factor de erosión		2.895			
23	270.48	14,892	ilimitado	0	6,666,172	0.22
25	294.00	78,183	ilimitado	0	3,831,831	2.04
<b>TOTAL</b>				<b>0.00</b>		<b>67.42</b>

Fuente - Elaboración propia

En este caso, el diseño con un espesor de losa de 24 cm presenta un porcentaje de fatiga de 0% debido a que para los tres tipos de ejes el número de repeticiones de carga admisibles es de ilimitado. El diseño se encuentra controlado por la erosión teniendo un valor de 67.42%, lo cual es aceptable por estar debajo del 100%.

Existe la posibilidad de incrementar el espesor de la base de manera que el porcentaje de daño por erosión se vea reducido. Por ello optamos por iterar con un espesor de losa nuevamente de 24 cm pero con un espesor de base de 30 cm (15 cm mayor a las anteriores iteraciones).

Los resultados finales se muestran a continuación:

Tabla 53 – Cuarta iteración para el cálculo del espesor de la losa de concreto

Espesor de losa (cm)	24	Juntas con dowels	Sí
K efectivo (Mpa/m)	70	Bermas de concreto	NO
Módulo de rotura (Mpa)	4.8	Periodo de diseño	15 años
Factor de seguridad FSc	1.2	Tasa de crecimiento (%)	4.18%

Carga por eje, Tn	Carga x FSc, KN	Repeticiones esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	Porcentaje de erosión
Ejes simples	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.265			
	Factor de esfuerzo		0.2635			
	Factor de erosión		2.575			
0.9	10.58	17,274,720	ilimitado	0	ilimitado	0
7	82.32	3,741,615	ilimitado	0	1,796,718,981	0.21
11	129.36	3,134,766	ilimitado	0.00	6,278,479	49.93
Ejes tándem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		1.105			
	Factor de esfuerzo		0.2302			
	Factor de erosión		2.72			
16	188.16	96,798	ilimitado	0	19,503,447	0.50
18	211.68	588,234	ilimitado	0	7,996,981	7.36
Ejes trídem	Esfuerzo equivalente (Mpa)		0.835			
	Factor de esfuerzo		0.174			
	Factor de erosión		2.84			
23	270.48	14,892	ilimitado	0	10,186,141	0.15
25	294.00	78,183	ilimitado	0	5,682,416	1.38
<b>TOTAL</b>				<b>0.00</b>		<b>59.51</b>

Fuente - Elaboración propia

Nos damos cuenta que haciendo uso de una base de 30 cm, se obtiene un porcentaje de fatiga igual de 0% y un porcentaje de erosión de 59.51%, aproximadamente 7% menos que en la anterior iteración lo cual conlleva a afirmar que el aporte del espesor de la base a la reducción del porcentaje de erosión es mínimo.

En conclusión, el diseño apropiado es aquel correspondiente a la tercera iteración; un espesor de losa de 24 cm y un espesor de base de 15 cm donde se obtiene un porcentaje de fatiga de 0% y un porcentaje de erosión de 67.42%

Imagen 29 – Sección transversal del pavimento rígido - PCA

<b>Losa de concreto</b>	Espesor: 24 cm. Pavimento de concreto de Cemento Portland. F'c mínimo para dar apertura al tránsito: 280 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Base granular</b>	Espesor: 15cm. CBR: 112%. Compactación al 100% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Modificado
<b>Subrasante</b>	Espesor: 30cm. CBR: 6%. Compactación al 95% de la máxima densidad seca del Ensayo Proctor Estándar

Fuente - Elaboración propia

Además del cálculo de espesores de capas en el pavimento rígido, se procedió a realizar el modelamiento de las juntas y el dimensionamiento de los dowels que se ubicarían en cada junta de contracción y de las barras de unión que se ubicarían en la junta longitudinal de construcción que separaría ambos carriles. Tanto el modelamiento como el dimensionamiento fueron realizados tomando en cuenta las recomendaciones del MTC<sup>72</sup>:

1. Se hará uso de una junta de contracción longitudinal como separación de ambos carriles y uso de juntas de contracción transversales cada 4.50 metros formándose así paños de 3.60 metros x 4.50 metros.
2. En la junta de contracción longitudinal, se hará uso de barras de unión de diámetro de 5/8" espaciados cada 0.90 metros. Cada barra de unión tendrá una longitud de 0.80 metros.
3. En las juntas de contracción transversal, se hará uso de dowels de diámetro de 1-1/4" espaciados cada 0.30 metros. Cada dowel tendrá una longitud de 0.50 metros.

Adicionalmente, se procedió a calcular el porcentaje de elongación que requeriría el sello que se ubicaría en las juntas transversales y longitudinales haciendo uso de las siguientes fórmulas dadas por el MTC<sup>73</sup>:

$$\% \text{ Elongación} = \frac{\Delta L}{\text{Ancho de caja de sello}}$$

$$\Delta L = CL (\alpha \Delta T + \epsilon)$$

Donde  $\Delta L$  es el movimiento de las losas,  $C$  es el factor de ajuste por fricción de la losa con la base, el cual toma un valor de 0.8,  $L$  es la longitud del paño en mm (4500 mm),  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmico del concreto el cual toma un valor de  $3.3 \times 10^{-6}$  cuando el concreto tiene como agregado a la grava,  $\Delta T$  es el gradiente térmico o la diferencia entre la máxima temperatura que alcanza el concreto en su colocación y la temperatura más baja del año; consideraremos un  $\Delta T$  de 1°C (la diferencia de la máxima temperatura y la mínima que se alcanza en

<sup>72</sup> MANUAL DE CARRETERAS: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos (RD N° 10-2014 – MTC/14). Pág. 244 – pág. 248

<sup>73</sup> MANUAL DE CARRETERAS: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos (RD N° 10-2014 – MTC/14). Pág. 287 – pág. 289

Yurimaguas) y  $\epsilon$  es el coeficiente de contracción del concreto que tiene un valor aproximado de 0.03%.

De acuerdo a esto,  $\Delta L$  tendría un valor de 1.09 mm y considerando un ancho común de la caja de sello de 6 mm, necesitaríamos un sello con un porcentaje de elongación de 18%. De acuerdo al MTC los sellos de silicona son capaces de soportar hasta un 100% de elongación; sin embargo se recomienda diseñar las cajas de sello de manera que la elongación no supere el 50%, por lo que en este caso estaríamos por debajo del límite especificado por el MTC.

El detalle del plano de juntas se puede visualizar en el Anexo 1 de la presente tesis.



## 6. ANÁLISIS ECONÓMICO

En los capítulos 4 y 5 se presentaron diferentes alternativas de diseño para el pavimento flexible y rígido. En este capítulo se evaluará el diseño más económico de acuerdo al análisis de precios unitarios de las partidas que involucran la construcción de ambas estructuras y las etapas de mantenimiento. Se tendrá en cuenta que hipotéticamente, la planta de asfalto, la planta mezcladora de concreto, la chancadora, la cantera de agregados y el depósito de material excedente (DME) se ubicarán en un mismo punto y a 10 km del tramo de la carretera a diseñar. Además se considerará que el ancho de la vía de diseño es de 10 metros (3.60 metros por carril) con bermas de 1.40 metros a ambos lados, las cuales tendrán la misma capacidad estructural que la calzada.

### 6.1. Análisis económico del pavimento flexible

Para el análisis de costos de las alternativas de diseño de la estructura de los pavimentos flexibles se tienen las siguientes principales subpartidas necesarias para la elaboración de las partidas finales:

Tabla 54 – Subpartida: Conformación de subbase granular

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		11.66
	400.00	400.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0200	22.00	0.44
OFICIAL	H.H	1.0	0.0200	16.50	0.33
PEÓN	H.H	4.0	0.0800	14.83	1.19
					<b>1.96</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	1.96	0.06
RODILLO LISO VIBR. AUTOPROPULSADO 101-135 HP 10-12 TN	H.M	1.0	0.0200	146.08	2.92
MOTONIVELADORA DE 130-135 HP	H.M	1.0	0.0200	206.12	4.12
CAMIÓN CISTERNA 4x2 (AGUA) 122 HP 2,000	H.M	1.0	0.0200	130.20	2.60
					<b>9.71</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 55 – Subpartida: Material de subbase

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		18.30
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Subpartidas</b>					
ZARANDEO MECÁNICO	m3		1.110	5.11	5.67
TRANSPORTE INTERNO (PLANTA)	m3		1.110	5.55	6.16
EXTRACCIÓN DE MATERIAL (CANTERA)	m3		1.110	5.83	6.47
					<b>18.30</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 56 – Subpartida: Conformación de base granular

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		13.33
	350.00	350.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0229	22.00	0.50
OFICIAL	H.H	1.0	0.0229	16.50	0.38
PEÓN	H.H	4.0	0.0914	14.83	1.36
					<b>2.24</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	2.24	0.07
RODILLO LISO VIBR. AUTOPROPULSADO 101-135 HP 10-12 TN	H.M	1.0	0.0229	146.08	3.34
MOTONIVELADORA DE 130-135 HP	H.M	1.0	0.0229	206.12	4.71
CAMIÓN CISTERNA 4x2 (AGUA) 122 HP 2,000	H.M	1.0	0.0229	130.20	2.98
					<b>11.09</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 57 – Subpartida: Material de base

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		29.63
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Subpartidas</b>					
ZARANDEO MECÁNICO	m3		1.110	5.11	5.67
TRANSPORTE INTERNO (PLANTA)	m3		1.110	5.55	6.16
EXTRACCIÓN DE MATERIAL (CANTERA)	m3		1.110	5.83	6.47
CHANCADO DE AGREGADOS	m3		1.110	10.20	11.32
					<b>29.63</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 58 – Subpartida: Agregado fino zarandeado para imprimación

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		25.68
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Subpartidas</b>					
EXTRACCIÓN Y APILAMIENTO MATERIAL PARA AGREGADO FINO	m3		1.500	4.54	6.81
TRANSPORTE INTERNO (PLANTA)	m3		1.500	5.55	8.33
ZARANDEO MECÁNICO (AGREGADO FINO/FILTRO)	m3		1.500	7.03	10.55
					<b>25.68</b>

Fuente - Elaboración propia

En base a las subpartidas mostradas se elaboraron las siguientes partidas; adicionando aquellas correspondientes al transporte de material granular y de mezcla asfáltica para la estructura del pavimento flexible:

Tabla 59 – Partida: Conformación de subrasante

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		3.29
	1500.00	1500.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0053	22.00	0.12
OFICIAL	H.H	1.0	0.0053	16.50	0.09
PEÓN	H.H	4.0	0.0213	14.83	0.32
					<b>0.52</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.52	0.02
RODILLO PATA DE CABRA AUTOPROPULSADO	H.M	1.0	0.0053	180.00	0.96
MOTONIVELADORA DE 130-135 HP	H.M	1.0	0.0053	206.12	1.10
CAMIÓN CISTERNA 4x2 (AGUA) 122 HP 2,000	H.M	1.0	0.0053	130.20	0.69
					<b>2.77</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 60–Partida: Subbase granular

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		35.96
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	
<b>Subpartidas</b>					
CONFORMACIÓN DE SUBBASE GRANULAR	m3		1.200	11.66	14.00
MATERIAL DE SUBBASE	m3		1.200	18.30	21.96
					<b>35.96</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 61–Partida: Base granular

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		51.55
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	
<b>Subpartidas</b>					
CONFORMACIÓN DE BBASE GRANULAR	m3		1.200	13.33	16.00
MATERIAL DE BASE	m3		1.200	29.63	35.55
					<b>51.55</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 62–Partida: Imprimación asfáltica

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		4.20
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0018	22.00	0.04
OFICIAL	H.H	2.0	0.0036	16.50	0.06
PEÓN	H.H	2.0	0.0036	14.83	0.05
					<b>0.15</b>
<b>Materiales</b>					
EMULSIÓN ASFÁLTICA	LT		1.2000	2.86	3.43
					<b>3.43</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.15	0.00
CAMIÓN IMPRIMADOR DE 1800 gl	H.M	1.0	0.0018	112.64	0.20
COMPRESORA NEUMÁTICA 250-330 PCM-87 HP	H.M	1.0	0.0018	49.00	0.09
MINICARGADOR 70HP	H.M	1.0	0.0018	68.43	0.12
					<b>0.41</b>
<b>Subpartidas</b>					
AGREGADO FINO ZARANDEADO PARA IMPRIMACIÓN	m3		0.0080	25.68	0.21
					<b>0.21</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 63–Partida: Carpeta asfáltica

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		638.66
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0124	22.00	0.27
OPERARIO	H.H	4.0	0.0496	20.10	1.00
OFICIAL	H.H	2.0	0.0248	16.50	0.41
PEÓN	H.H	8.0	0.0992	14.83	1.47
					<b>3.15</b>
<b>Materiales</b>					
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	m3		1.3000	475.00	617.50
					<b>617.50</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	3.15	0.09
RODILLO NEUMÁTICO AUTOPROPULSADO 135 HP 9-26 TON	H.M	1.0	0.0124	130.10	1.61
RODILLO TÁNDEM VIBRATORIO AUTOPR. 111-130 HP 9-11 TON	H.M	1.0	0.0124	133.12	1.65
ESPARCIDORA DE ASFALTO VIBRO-ACABADORA 155 HP - 7m	H.M	1.0	0.0124	445.24	5.52
PLANTA ASFALTO EN CALIENTE 60-115 ton/h	m3		1.3000	7.02	9.13
					<b>18.01</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 64 – Partida: Transporte de material granular para d < 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		5.74	
	412.50	412.50	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.
<b>Mano de obra</b>						
OFICIAL	H.H	0.5	0.0097	16.50	0.16	<b>0.16</b>
<b>Equipos</b>						
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0194	188.87	3.66	
CARGADOR SOBRE LLANTAS 200-250 HP 4-4.1 yd3	H.M	0.5	0.0097	197.58	1.92	<b>5.58</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 65 – Partida: Transporte de material granular para d > 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		1.23	
	1225.00	1225.00	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.
<b>Equipos</b>						
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0065	188.87	1.23	<b>1.23</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 66 – Partida: Transporte de mezcla asfáltica para d < 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		6.22	
	380.80	380.80	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.
<b>Mano de obra</b>						
OFICIAL	H.H	0.5	0.0105	16.50	0.17	<b>0.17</b>
<b>Equipos</b>						
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0210	188.87	3.97	
CARGADOR SOBRE LLANTAS 200-250 HP 4-4.1 yd3	H.M	0.5	0.0105	197.58	2.08	<b>6.04</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 67 – Partida: Transporte de mezcla asfáltica para d > 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		1.34	
	1130.80	1130.80	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.
<b>Equipos</b>						
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0071	188.87	1.34	<b>1.34</b>

Fuente - Elaboración propia

De esta manera se tiene la siguiente tabla resumen de las partidas mostradas que servirán para determinar el diseño más económico de la estructura del pavimento flexible:

Tabla 68 – Costo por partida en pavimentos flexibles

Partida	Unidad	Costo (S/.)
Conformación de subrasante	m2	3.29
Subbase granular	m3	35.96
Base Granular	m3	51.55
Imprimación asfáltica	m2	4.20
Carpeta Asfáltica	m3	638.66
Transporte de material granular para d < 1 km	m3k	5.74

Transporte de material granular para $d > 1$ km	m3k	1.23
Transporte de mezcla asfáltica para $d < 1$ km	m3k	6.22
Transporte de mezcla asfáltica para $d > 1$ km	m3k	1.34

Fuente - Elaboración propia

Haciendo uso de la metodología de la AASHTO se obtuvieron las siguientes alternativas de diseño:

Tabla 69 – Alternativas de diseño del pavimento flexible (AASHTO)

Alternativa	Espesores de capas		
	D1 (pulgadas)	D2 (cm)	D3 (cm)
Alternativa 1	4.00	15.00	70.00
Alternativa 2	4.00	20.00	65.00
Alternativa 3	4.00	25.00	55.00
Alternativa 4	4.00	30.00	50.00
Alternativa 5	4.50	15.00	65.00
Alternativa 6	4.50	20.00	60.00
Alternativa 7	4.50	25.00	50.00
Alternativa 8	4.50	30.00	45.00
Alternativa 9	5.00	15.00	60.00
Alternativa 10	5.00	20.00	55.00
Alternativa 11	5.00	25.00	45.00
Alternativa 12	5.00	30.00	40.00

Fuente - Elaboración propia

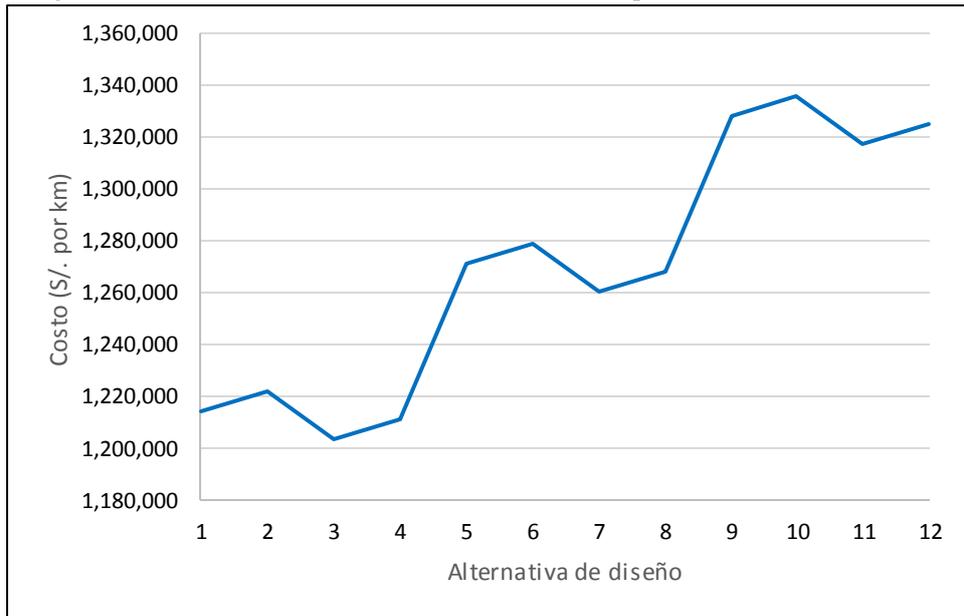
Procedemos al cálculo del costo de cada alternativa para 1 km de carretera:

Tabla 70 – Costo de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (AASHTO)

	COSTO (\$/.)						
	Subrasante	Carpeta asfáltica	Imprimación asfáltica	Base granular	Subbase granular	Transporte	Total
Alternativa 1	32,911	648,877	42,015	77,319	251,723	161,672	1,214,517
Alternativa 2	32,911	648,877	42,015	103,092	233,743	161,672	1,222,310
Alternativa 3	32,911	648,877	42,015	128,865	197,782	153,252	1,203,703
Alternativa 4	32,911	648,877	42,015	154,639	179,802	153,252	1,211,495
Alternativa 5	32,911	729,987	42,015	77,319	233,743	155,569	1,271,543
Alternativa 6	32,911	729,987	42,015	103,092	215,762	155,569	1,279,336
Alternativa 7	32,911	729,987	42,015	128,865	179,802	147,149	1,260,729
Alternativa 8	32,911	729,987	42,015	154,639	161,822	147,149	1,268,522
Alternativa 9	32,911	811,096	42,015	77,319	215,762	149,466	1,328,569
Alternativa 10	32,911	811,096	42,015	103,092	197,782	149,466	1,336,362
Alternativa 11	32,911	811,096	42,015	128,865	161,822	141,046	1,317,755
Alternativa 12	32,911	811,096	42,015	154,639	143,842	141,046	1,325,548

Fuente - Elaboración propia

Imagen 30 – Costo (S/.) de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (AASHTO)



Fuente - Elaboración propia

Nos damos cuenta que la alternativa 3 correspondiente a una estructura conformada por una subbase granular de 55 cm, una base granular de 25 cm y una carpeta asfáltica de 4 pulgadas es la opción de diseño más económica (S/. 1, 203,703). Es importante también resaltar que no es factible aumentar media pulgada a la carpeta asfáltica con la finalidad de reducir los espesores de las capas granulares pues esto conllevaría a un gran incremento del costo final de la estructura del pavimento tal y como se puede observar al pasar de la alternativa 4 a la alternativa 5 o de la alternativa 8 a la alternativa 9.

Por otro lado, haciendo uso de la metodología del Instituto del Asfalto se obtuvieron las siguientes alternativas de diseño:

Tabla 71 – Alternativas de diseño del pavimento flexible (IA)

Alternativa	Espesores de capas		
	D1 (pulgadas)	D2 (cm)	D3 (cm)
Alternativa 1	5.00	15.00	95.00
Alternativa 2	5.00	20.00	90.00
Alternativa 3	5.00	25.00	85.00
Alternativa 4	5.00	30.00	75.00
Alternativa 5	5.50	15.00	90.00
Alternativa 6	5.50	20.00	85.00
Alternativa 7	5.50	25.00	80.00
Alternativa 8	5.50	30.00	70.00

Alternativa 9	6.00	15.00	85.00
Alternativa 10	6.00	20.00	80.00
Alternativa 11	6.00	25.00	75.00
Alternativa 12	6.00	30.00	65.00

Fuente - Elaboración propia

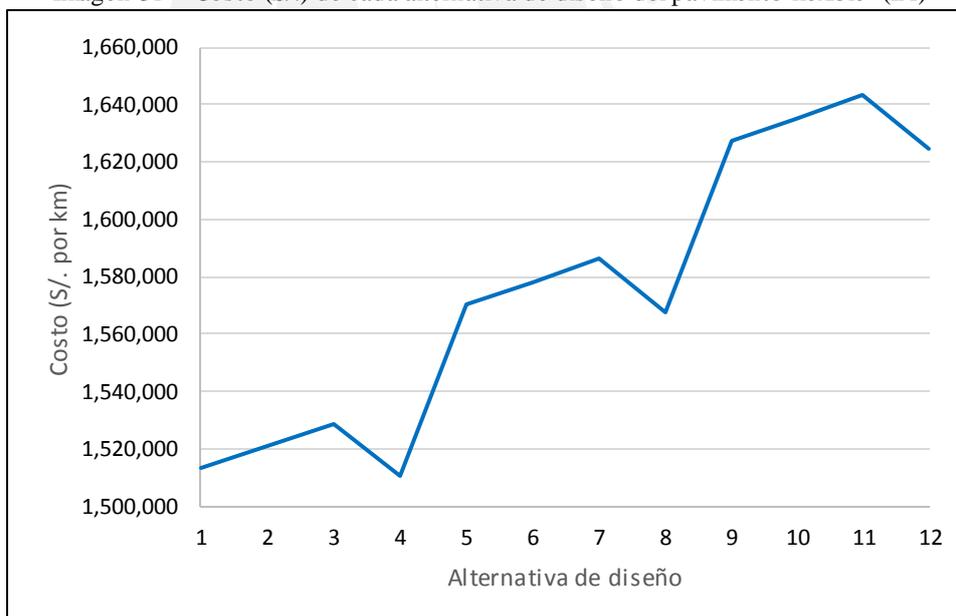
Procedemos al cálculo del costo de cada alternativa para 1 km de carretera:

Tabla 72 – Costo de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (IA)

	COSTO (S./)						
	Subrasante	Carpeta asfáltica	Imprimación asfáltica	Base granular	Subbase granular	Transporte	Total
Alternativa 1	32,911	811,096	42,015	77,319	341,624	208,405	1,513,370
Alternativa 2	32,911	811,096	42,015	103,092	323,644	208,405	1,521,163
Alternativa 3	32,911	811,096	42,015	128,865	305,663	208,405	1,528,956
Alternativa 4	32,911	811,096	42,015	154,639	269,703	199,986	1,510,349
Alternativa 5	32,911	892,206	42,015	77,319	323,644	202,302	1,570,396
Alternativa 6	32,911	892,206	42,015	103,092	305,663	202,302	1,578,189
Alternativa 7	32,911	892,206	42,015	128,865	287,683	202,302	1,585,982
Alternativa 8	32,911	892,206	42,015	154,639	251,723	193,882	1,567,375
Alternativa 9	32,911	973,316	42,015	77,319	305,663	196,199	1,627,423
Alternativa 10	32,911	973,316	42,015	103,092	287,683	196,199	1,635,216
Alternativa 11	32,911	973,316	42,015	128,865	269,703	196,199	1,643,008
Alternativa 12	32,911	973,316	42,015	154,639	233,743	187,779	1,624,401

Fuente - Elaboración propia

Imagen 31 – Costo (S./) de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (IA)



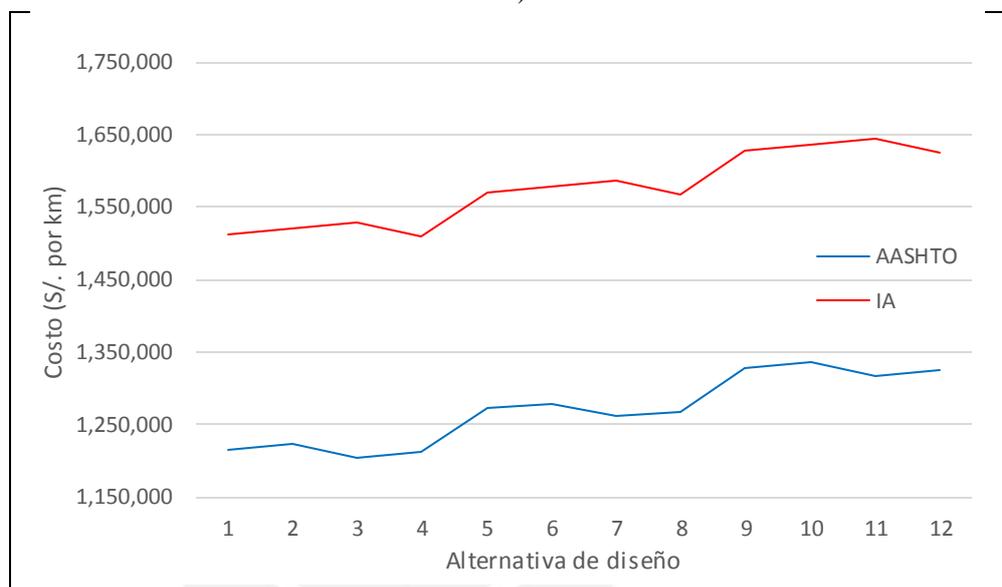
Fuente - Elaboración propia

Nos damos cuenta que la alternativa 4 correspondiente a una estructura conformada por una subbase granular de 75 cm, una base granular de 30 cm y una carpeta asfáltica de 5 pulgadas es la opción de diseño más económica (S/ 1, 510,349). Es importante también resaltar que al igual que por la metodología de la AASHTO, no es factible aumentar media pulgada a la

carpeta asfáltica con la finalidad de reducir los espesores de las capas granulares pues esto conllevaría a un gran incremento del costo final de la estructura del pavimento tal y como se puede observar al pasar de la alternativa 4 a la alternativa 5 o de la alternativa 8 a la alternativa 9.

Finalmente tenemos la siguiente gráfica que representa el costo de cada alternativa del pavimento flexible para las dos metodologías de diseño empleadas:

Imagen 32 – Costo (S/.) de cada alternativa de diseño del pavimento flexible (AASHTO vs IA)



Fuente - Elaboración propia

Se puede observar que la metodología de la AASHTO proporciona un diseño más económico en comparación a la metodología del Instituto del Asfalto para las 12 alternativas evaluadas; esto se debe a que por la metodología del Instituto del Asfalto el paquete estructural de diseño tuvo un SN de 7.06 mientras que por la AASHTO fue de 5.5; esta diferencia de SN se tradujo en mayores espesores de capa y por ende mayor costo.

La opción más económica del pavimento flexible resultó ser la alternativa 3 de la metodología de la AASHTO con un costo de S/. 1, 203,703

## 6.2. Análisis económico del pavimento rígido

En el capítulo de diseño del pavimento rígido se obtuvo una estructura de pavimento con una base de 15 cm y una losa de concreto de 28 cm, haciendo uso de la metodología de la AASHTO; mientras que por la metodología de la PCA se obtuvo una estructura de pavimento con una base también de 15 cm pero con una losa de concreto de 24 cm; por lo que el análisis económico se realizará sobre esta última alternativa por resultar más económica. Como se mencionó anteriormente, las bermas del pavimento rígido serán de asfalto por lo que el costo de ellas será tomado de la alternativa de diseño más económica del pavimento flexible.

Para el análisis de costos se tienen las partidas que se muestran a continuación; donde se incluyen las partidas correspondientes al costo por transporte de material granular y costo por transporte de la mezcla de concreto.

Tabla 73–Partida: Conformación de subrasante

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		3.29
	1500.00	1500.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0053	22.00	0.12
OFICIAL	H.H	1.0	0.0053	16.50	0.09
PEÓN	H.H	4.0	0.0213	14.83	0.32
					<b>0.52</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.52	0.02
RODILLO PATA DE CABRA AUTOPROPULSADO	H.M	1.0	0.0053	180.00	0.96
MOTONIVELADORA DE 130-135 HP	H.M	1.0	0.0053	206.12	1.10
CAMIÓN CISTERNA 4x2 (AGUA) 122 HP 2,000	H.M	1.0	0.0053	130.20	0.69
					<b>2.77</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 74–Partida: Base granular

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		51.55
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Subpartidas</b>					
CONFORMACIÓN DE BBASE GRANULAR	m3		1.200	13.33	16.00
MATERIAL DE BASE	m3		1.200	29.63	35.55
					<b>51.55</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 75–Partida: Colocación de guías para pavimentadora

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		1.75
	1000.00	1000.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0008	22.00	0.02
OPERARIO	H.H	1.0	0.0080	20.10	0.16
PEÓN	H.H	3.0	0.0240	14.83	0.36
TOPÓGRAFO	H.H	1.0	0.0080	21.89	0.18
NIVELADOR	H.H	1.0	0.0080	20.07	0.16
					<b>0.87</b>
<b>Materiales</b>					
GUÍAS Y CORDELES	m		0.0133	14.38	0.19
					<b>0.19</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.87	0.03
MONTACARGA 68 HP 3,000 KGS	H.M	0.1	0.0008	70.07	0.06
NIVEL TOPOGRÁFICO	H.M	1.0	0.0080	5.00	0.04
ESTACIÓN TOTAL	H.M	1.0	0.0080	25.75	0.21
					<b>0.33</b>
<b>Equipos</b>					
SEÑALIZACIÓN DE ESTACADO DE LÍNEAS GUÍAS	GLB		1.0000	0.36	0.36
					<b>0.36</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 76–Partida: Concreto premezclado f'c 350 kg/cm2

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		367.99
	300.00	300.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0027	22.00	0.06
					<b>0.06</b>
<b>Materiales</b>					
CONCRETO PREMEZCLADO F'c 350 KG/CM2	m3		1.0700	315.00	337.05
					<b>337.05</b>
<b>Equipos</b>					
PAVIMENTADORA	m3		1.0000	28.00	28.00
RETROEXCAVADORA	m3		1.0000	2.88	2.88
					<b>30.88</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 77–Partida: Colocación, Acabado y Texturizado

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		1.56
	1200.00	1200.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0067	22.00	0.15
OPERARIO	H.H	4.0	0.0267	20.10	0.54
OFICIAL	H.H	4.0	0.0267	16.50	0.44
PEÓN	H.H	4.0	0.0267	14.83	0.40
					<b>1.52</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	1.52	0.05
					<b>0.05</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 78–Partida: Curado del concreto

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		2.08
	1200.00	1200.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0007	22.00	0.01
OPERARIO	H.H	2.0	0.0133	20.10	0.27
PEÓN	H.H	1.0	0.0067	14.83	0.10
					<b>0.38</b>
<b>Materiales</b>					
CURADOR QUÍMICO ACRÍLICO	gln		0.0605	23.56	1.43
COMBUSTIBLE	gln		0.0020	14.00	0.03
AGUA	gln		0.0060	15.00	0.09
					<b>1.54</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	1.54	0.05
EQUIPO APLICACIÓN CURADOR	H.M	1.0	0.0067	15.70	0.10
					<b>0.15</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 79–Partida: Barras de unión Ø=5/8” @ 0.90m L=0.80 m (Junta longitudinal)

Rendimiento: kg/día	MO	EQ	Costo unitario por kg		3.21
	550.00	550.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0015	22.00	0.03
OPERARIO	H.H	1.0	0.0145	20.10	0.29
OFICIAL	H.H	1.0	0.0145	16.50	0.24
					<b>0.56</b>
<b>Materiales</b>					
FIERRO CORRUGADO FY=4200 KG/CM2 GRADO 60 Ø 5/8"	Kg		1.0500	2.41	2.53
					<b>2.53</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.56	0.02
MONTACARGA 68 HP 3,000 KGS	H.M	0.1	0.0015	70.07	0.10
					<b>0.12</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 80–Partida: Dowels Ø=1-1/4” @ 0.30m L=0.50 m (Junta transversal)

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		98.38
	300.00	300.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0027	22.00	0.06
OPERARIO	H.H	1.0	0.0267	20.10	0.54
OFICIAL	H.H	1.0	0.0267	16.50	0.44
					<b>1.03</b>
<b>Materiales</b>					
FIERRO LISO A36 Ø 1-1/4" L=0.50 m	m		1.0500	92.50	97.13
					<b>97.13</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	1.03	0.03
MONTACARGA 68 HP 3,000 KGS	H.M	0.1	0.0027	70.07	0.19
					<b>0.22</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 81–Partida: Corte de juntas de contracción transversal

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		10.70
	300.00	300.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0027	22.00	0.06
OPERARIO	H.H	1.0	0.0267	20.10	0.54
PEÓN	H.H	2.0	0.0533	14.83	0.79
					<b>1.39</b>
<b>Materiales</b>					
COMBUSTIBLE	gln		0.0107	14.00	0.15
DISCO DE CORTE H/3	pza		0.0092	752.54	6.92
AGUA	m3		0.0225	15.00	0.34
					<b>7.41</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	1.39	0.04
CORTADORA DE CONCRETO	H.M	1.0	0.0267	62.80	1.67
MONTACARGA 68 HP 3,000 KGS	H.M	0.1	0.0027	70.07	0.19
					<b>1.90</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 82–Partida: Corte para caja de sello

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		5.16
	250.00	250.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0032	22.00	0.07
OPERARIO	H.H	1.0	0.0320	20.10	0.64
PEÓN	H.H	2.0	0.0640	14.83	0.95
					<b>1.66</b>
<b>Materiales</b>					
COMBUSTIBLE	gln		0.0076	14.00	0.11
DISCO DE CORTE PARA CAJA DE SELLO	pza		0.0014	627.00	0.88
AGUA	m3		0.0150	15.00	0.23
					<b>1.21</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	1.66	0.05
CORTADORA DE CONCRETO	H.M	1.0	0.0320	62.80	2.01
MONTACARGA 68 HP 3,000 KGS	H.M	0.1	0.0032	70.07	0.22
					<b>2.28</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 83–Partida: Sellado de juntas longitudinales y transversales

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		8.07
	500.00	500.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0016	22.00	0.04
OPERARIO	H.H	5.0	0.0800	20.10	1.61
OFICIAL	H.H	5.0	0.0800	16.50	1.32
					<b>2.96</b>
<b>Materiales</b>					
CORDÓN DE RESPALO DE POLIURETANO Ø 9 mm	m		1.0000	0.61	0.61
SELLO LÍQUIDO DE SILICONA	und		0.1137	20.50	2.33
COMBUSTIBLE	gln		0.0104	14.00	0.15
AGUA	m3		0.0015	15.00	0.02
					<b>3.11</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	2.96	0.09
CAMIÓN 4 M3	H.M	0.5	0.0080	94.20	0.75
EQUIPO APLICACIÓN SELLO	H.M	1.0	0.0160	9.42	0.15
COMPRESORA SOPLADORA	H.M	1.0	0.0160	62.80	1.00
					<b>2.00</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 84 – Partida: Transporte de material granular para d < 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		5.74
	412.50	412.50			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
OFICIAL	H.H	0.5	0.0097	16.50	0.16
					<b>0.16</b>
<b>Equipos</b>					
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0194	188.87	3.66
CARGADOR SOBRE LLANTAS 200-250 HP 4-4.1 yd3	H.M	0.5	0.0097	197.58	1.92
					<b>5.58</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 85 – Partida: Transporte de material granular para d > 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		1.23
	1225.00	1225.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Equipos</b>					
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0065	188.87	1.23
					<b>1.23</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 86 – Partida: Transporte de mezcla de concreto para d < 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		6.22
	380.80	380.80			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
OFICIAL	H.H	0.5	0.0105	16.50	0.17
					<b>0.17</b>
<b>Equipos</b>					
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0210	188.87	3.97
CARGADOR SOBRE LLANTAS 200-250 HP 4-4.1 yd3	H.M	0.5	0.0105	197.58	2.08
					<b>6.04</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 87 – Partida: Transporte de mezcla de concreto para d > 1 km

Rendimiento: m3k/día	MO	EQ	Costo unitario por m3k		1.34
	1130.80	1130.80			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Equipos</b>					
CAMIÓN VOLQUETE 6x4 330 HP 15 M3	H.M	1.0	0.0071	188.87	1.34
					<b>1.34</b>

Fuente - Elaboración propia

Se tiene así el costo final de la estructura del pavimento rígido:

Tabla 88 – Costo final del pavimento rígido

Partida	Unidad	Metrado	P.unitario (S/.)	Costo (S/.)
Conformación de subrasante	m2	10,000.00	3.29	32,911
Base granular	m3	1,892.00	51.55	97,525
Berma de asfalto	-	-	-	183,932
Colocación de guías para pavimentadora	m	3,000.00	1.75	5,248
Concreto premezclado f'c 350 kg/cm2	m3	1,728.00	367.99	635,884
Colocación, acabado y texturizado	m2	7,200.00	1.56	11,258
Curado del concreto	m2	7,200.00	2.08	14,946
Barras de unión $\varnothing=5/8"$ @0.90m (L=0.80 m)	kg	1,379.56	3.21	4,433
Dowels $\varnothing=1-1/4"$ @0.30m (L=0.50 m)	m	1,627.20	98.38	160,080
Corte de juntas de contracción transversal	m	1,605.60	10.70	17,179
Corte para caja de sello	m	2,627.20	5.16	13,545
Sellado de juntas longitudinales y transversales	m	2,627.20	8.07	21,202
Transporte de material granular para d < 1 km	m3k	1,892.00	5.74	10,858
Transporte de material granular para d > 1 km	m3k	17,028.00	1.23	21,003
Transporte de mezcla de concreto para d < 1 km	m3k	1,728.00	6.22	10,742
Transporte de mezcla de concreto para d > 1 km	m3k	15,552.00	1.34	20,780
<b>TOTAL (S/.)</b>				<b>1,261,528</b>

Fuente - Elaboración propia

Se determina que el costo de la construcción del pavimento rígido es de S/. 1, 261,528; costo mayor al del pavimento flexible (S/. 1, 203,703) por una diferencia de S/. 57,826 (4.8% más caro).

A pesar de ser el pavimento flexible la opción más económica, se debe realizar una evaluación no solo en la etapa constructiva sino también en la etapa de mantenimiento en todo el periodo de vida del pavimento para así poder realizar la elección de la alternativa más rentable en el tiempo.

### 6.3. Mantenimiento y elección de la mejor alternativa

Una vez obtenidos los diseños más económicos tanto para el pavimento flexible como para el pavimento rígido se procede a realizar el análisis de costos del mantenimiento del pavimento en todo el periodo de vida del mismo.

El análisis ha sido realizado haciendo uso del software de gestión vial HDM-4 (Highway Development Management), programa desarrollado como parte de un esfuerzo del Banco Mundial, el Banco Asiático de Desarrollo, el Departamento de Desarrollo Internacional del Reino Unido, la Administración Nacional de Carreteras de Suecia y el TRRL (Transport and Road Research Laboratory). Como antecedente directo se puede encontrar al HDM-3 (Highway Maintenance and Design) desarrollado por el MIT en colaboración con el Banco Mundial, y el RTIM 3 (Road Transport Investment Model),

realizado en base a investigaciones hechas, en países en vías de desarrollo, por el TRRL.

El HDM-4 es un software de simulación desarrollado con la finalidad de predecir el comportamiento de los pavimentos durante su periodo de vida y el consecuente gasto que se tendría que realizar para su conservación.

Para el caso del pavimento flexible se ha establecido los siguientes niveles de servicio que deben cumplirse durante todo el periodo de la concesión de la Carretera de Acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas:

1. No se admitirán fisuras que no se encuentren selladas
2. No se admitirán baches
3. El porcentaje máximo admisible de agrietamiento será de 10%
4. El IRI no podrá superar el valor de 3.5 m/km

Con la finalidad de cumplir con estos niveles de servicio, se ha propuesto implementar la siguiente política de mantenimiento:

1. Sellado rutinario de fisuras
2. Sellado asfáltico cada 3 años, el cual tiene por objetivo mantener el porcentaje de agrietamiento por debajo del 10%; así como controlar la aparición de baches. Además, el sellado asfáltico tiene por finalidad recuperar las condiciones superficiales de la calzada desgastada para mejorar la fricción entre el pavimento y el neumático
3. Fresado y recapeo de 1 pulgada, el cual tiene por finalidad mantener el IRI por debajo del valor de 3.5 m/km

De acuerdo a los resultados del análisis realizado en HDM-4 (Ver Anexo 2), se tiene la siguiente tabla que resume las actividades necesarias para cumplir con los niveles de servicio establecidos:

Tabla 89 – Resumen de actividades de mantenimiento: Pavimento flexible

<b>Año</b>	<b>Descripción</b>	<b>Metrado</b>
1	Construcción	-
2	No hay intervención	-
3	No hay intervención	-
4	Sellado asfáltico	7,200 m2
5	No hay intervención	-
6	No hay intervención	-
7	Sellado asfáltico	7,200 m2
8	No hay intervención	-
9	No hay intervención	-
10	Sellado asfáltico	7,200 m2
11	Fresado y Recapeo 1”	7,200 m2
12	No hay intervención	-
13	No hay intervención	-
14	Sellado asfáltico	7,200 m2
15	No hay intervención	-

Fuente – HDM-4

Adicionalmente, en el Anexo 2 se muestra el resumen del deterioro de la estructura del pavimento flexible en dos situaciones: cuando no se realiza ninguna intervención y cuando se realizan las intervenciones propuestas de la tabla anterior.

En el caso donde no se realiza ninguna intervención, se puede observar que el porcentaje de fisuración que alcanza la estructura es de 67.76% al año 15, el número de baches de 290.69 y el IRI de 4.97 m/km, mientras que en el caso donde se realizan las intervenciones propuestas, gracias al sellado asfáltico cada tres años, se mantiene el porcentaje de fisuración en 0% y el número de baches en cero; y gracias al fresado y recapeo de 1 pulgada, el IRI pasa a ser de 3.56 en el año 11 a 2.03 en el año 12; y finaliza en el año 15 con un valor de 2.25.

Se presentan a continuación las partidas correspondientes al mantenimiento del pavimento flexible:

Tabla 90 – Partida: Mantenimiento: Sellado asfáltico

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		4.99
	4500.00	4500.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0018	22.00	0.04
OPERARIO	H.H	1.0	0.0018	20.10	0.04
OFICIAL	H.H	2.0	0.0036	16.50	0.06
					<b>0.13</b>
<b>Materiales</b>					
ARENA	m3		0.0128	26.60	0.34
MATERIAL CONFITILLO 3/8"	m3		0.0088	36.59	0.32
EMULSIÓN ASFÁLTICA	gln		0.4080	9.20	3.75
					<b>4.42</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.13	0.00
CAMIÓN IMPRIMADOR DE 1800 gl	H.M	1.00	0.0018	112.64	0.20
RODILLO TÁNDEM VIBRATORIO AUTOPR. 111-130 HP 9-11 TON	H.M	1.00	0.0018	133.12	0.24
					<b>0.44</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 91 – Partida: Mantenimiento: Fresado y Recapeo 1''

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		28.38
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Subpartidas</b>					
FRESADO DE CARPETA ASFÁLTICA DE 1"	m2		1.0000	8.50	8.50
RECAPEO DE CARPETA ASFÁLTICA EN CALIENTE DE 1"	m3		1.0000	19.87	19.87
					<b>28.38</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 92 – Subpartida: Fresado de carpeta asfáltica de 1''

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		8.50
	1200.00	1200.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0067	22.00	0.15
					<b>0.15</b>
<b>Equipos</b>					
FRESADORA Y PERFILADORA DE PAVIMENTOS	H.M	1.0	0.0067	1180.00	7.87
					<b>7.87</b>
<b>Subpartidas</b>					
TRANSPORTE DE REMOCIÓN DE ASFALTO	m3k		0.2540	1.93	0.49
					<b>0.49</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 93 – Subpartida: Recapeo de carpeta asfáltica en caliente de 1''

Rendimiento: m2/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		19.87
	7200.00	7200.00			
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	1.0	0.0011	22.00	0.02
OFICIAL	H.H	2.0	0.0022	16.50	0.04
PEÓN	H.H	8.0	0.0089	14.83	0.13
					<b>0.19</b>
<b>Materiales</b>					
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE PARA MANTENIMIENTO	m3		0.0325	475.00	15.44
					<b>15.44</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.19	0.01
RODILLO NEUMÁTICO AUTOPROPULSADO 135 HP 9-26 TON	H.M	1.0	0.0011	130.10	0.14
RODILLO TÁNDEM VIBRATORIO AUTOPR. 111-130 HP 9-11 TON	H.M	1.0	0.0011	133.12	0.15
ESPARCIDORA DE ASFALTO VIBRO-ACABADORA 155 HP - 7m	H.M	1.0	0.0011	445.24	0.49
					<b>0.79</b>
<b>Subpartidas</b>					
RIEGO DE LIGA	m2		1.0000	3.45	3.45
					<b>3.45</b>

Fuente - Elaboración propia

Para el caso del pavimento rígido se ha establecido los siguientes niveles de servicio que deben cumplirse durante todo el periodo de la concesión de la Carretera de Acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas:

1. El porcentaje máximo de juntas con despostillamiento será de 5%
2. El porcentaje máximo de losas fisuradas será de 5%
3. El IRI no podrá superar el valor de 3.5 m/km

Con la finalidad de cumplir con estos niveles de servicio, se ha propuesto implementar la siguiente política de mantenimiento:

1. Resellado de juntas cada 5 años, con la finalidad de mantener el porcentaje de juntas despostilladas por debajo del valor de 5%
2. Reemplazo de losas cuando el porcentaje de losas fisuradas supere el 5% del total
3. Cepillado de 5 mm cuando el IRI supere el valor de 3.5 m/km

De acuerdo a los resultados del análisis realizado en HDM-4 (Ver Anexo 3), se tiene la siguiente tabla que resume las actividades necesarias para cumplir con los niveles de servicio establecidos:

Tabla 94 – Resumen de actividades de mantenimiento: Pavimento rígido

<b>Año</b>	<b>Descripción</b>	<b>Metrado</b>
1	Construcción	-
2	No hay intervención	-
3	No hay intervención	-
4	No hay intervención	-
5	No hay intervención	-
6	Resellado Juntas	1,600 m
7	No hay intervención	-
8	No hay intervención	-
9	No hay intervención	-
10	No hay intervención	-
11	Resellado Juntas	1,600 m
12	No hay intervención	-
13	No hay intervención	-
14	No hay intervención	-
15	Reemplazo Losas	400.24 m <sup>2</sup>

Fuente – HDM-4

Adicionalmente, en el Anexo 3 se muestra el resumen del deterioro de la estructura del pavimento rígido en dos situaciones: cuando no se realiza

ninguna intervención y cuando se realizan las intervenciones propuestas de la tabla anterior. En el caso donde no se realiza ninguna intervención, se puede observar que el porcentaje de losas fisuradas supera el 5% en el año 15 por lo que es necesario el reemplazo de las mismas; además el porcentaje de juntas con despostillamiento supera también el valor de 5%. En el caso del IRI, este no llega a superar el valor de 3.5 m/km por lo que no sería necesario el cepillado del pavimento.

Se presentan a continuación las partidas correspondientes al mantenimiento del pavimento rígido:

Tabla 95 – Partida: Mantenimiento: Resellado Juntas

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		9.07
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Subpartidas</b>					
RETIRO DE SELLO EN JUNTAS	m		1.0000	1.00	1.00
SELLADO DE JUNTAS	m		1.0000	8.07	8.07
					<b>9.07</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 96 – Subpartida: Retiro de sello en juntas

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		1.00
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0008	22.00	0.02
PEÓN	H.H	8.0	0.0640	14.83	0.95
					<b>0.97</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	0.97	0.03
					<b>0.03</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 97 – Partida: Sellado de Juntas

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m		8.07
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0016	22.00	0.04
OPERARIO	H.H	5.0	0.0800	20.10	1.61
OFICIAL	H.H	5.0	0.0800	16.50	1.32
					<b>2.96</b>
<b>Materiales</b>					
CORDÓN DE RESPALO DE POLIURETANO Ø 9 mm	m		1.0000	0.61	0.61
SELLO LÍQUIDO DE SILICONA	und		0.1137	20.50	2.33
COMBUSTIBLE	gln		0.0104	14.00	0.15
AGUA	m3		0.0015	15.00	0.02
					<b>3.11</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	2.96	0.09
CAMIÓN 4 M3	H.M	0.5	0.0080	94.20	0.75
EQUIPO APLICACIÓN SELLO	H.M	1.0	0.0160	9.42	0.15
COMPRESORA SOPLADORA	H.M	1.0	0.0160	62.80	1.00
					<b>2.00</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 98 – Partida: Mantenimiento: Reemplazo Losas

Rendimiento: m/día	MO	EQ	Costo unitario por m2		
					<b>116.09</b>
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Subpartidas</b>					
DEMOLICIÓN DE LOSAS DE CONCRETO	m3		0.2400	54.21	13.01
BARRAS DE UNIÓN Ø=5/8" @ 0.90 m L=0.80 m	kg		0.1916	3.21	0.62
DOWELS Ø=1-1/4" @ 0.30 m L=0.50m	m		0.2260	98.38	22.23
CONCRETO PREMEZCLADO f'c 350 kg/cm2	m2		1.0000	75.60	75.60
TRANSPORTE DE MATERIAL A ELIMINAR	m3k		2.4000	1.93	4.63
					<b>116.09</b>

Fuente - Elaboración propia

Tabla 99 – Subpartida: Demolición de losas de concreto

Rendimiento: m3/día	MO	EQ	Costo unitario por m3		
	15.00	15.00			<b>54.21</b>
	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>Mano de obra</b>					
CAPATAZ	H.H	0.1	0.0016	22.00	0.04
PEÓN	H.H	5.0	0.0800	20.10	1.61
OPERARIO	H.H	5.0	0.0800	16.50	1.32
					<b>2.96</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	2.96	0.09
MARTILLO NEUMÁTICO DE 25/29 kg	H.M	0.5	0.2667	4.73	1.26
CORTADORA DE CONCRETO	H.M	0.5	0.2667	62.80	16.75
COMPRESORA NEUMÁTICA 93 HP 335-375 PCM	H.M	0.5	0.2667	124.32	33.15
					<b>51.25</b>

Fuente - Elaboración propia

Una vez definidas las partidas de mantenimiento se procede a calcular los costos de mantenimiento para ambas alternativas durante los 15 años del periodo de vida del pavimento:

Tabla 100 – Costos (S/.) de mantenimiento por alternativas

Año	Pav. Flexible	Pav. Rígido
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	35,932	0
5	0	0
6	0	14,505
7	35,932	0
8	0	0
9	0	0
10	35,932	0
11	204,314	14,505
12	0	0
13	0	0
14	35,932	0
15	0	46,465

Fuente - Elaboración propia

Se observa que el costo del mantenimiento del pavimento flexible es de S/. 348,040, mientras que el costo del mantenimiento del pavimento rígido es de S/. 75,476 (21.7% del costo del mantenimiento del pavimento flexible).

Estos valores corresponden a costos directos; sin embargo al ser la Carretera de Acceso al Nuevo Puerto de Yurimaguas parte de la Concesión de la IIRSA Norte, debe ser evaluada como una inversión privada. De esta manera se procede a capitalizar los flujos de costos directos con una tasa de descuento del 10%, tasa común para este tipo de concesiones. Los resultados para ambas alternativas se muestran a continuación:

Tabla 101 – Valor Presente Neto Acumulado (S/.) del pavimento flexible

<b>Año</b>	<b>Costo (S/.)</b>	<b>VPN (S/.)</b>	<b>VPN Acumulado (S/.)</b>
1	1,203,703	1,203,703	1,203,703
2	0	0	1,203,703
3	0	0	1,203,703
4	35,932	26,996	1,230,698
5	0	0	1,230,698
6	0	0	1,230,698
7	35,932	20,282	1,250,981
8	0	0	1,250,981
9	0	0	1,250,981
10	35,932	15,238	1,266,219
11	204,314	78,772	1,344,991
12	0	0	1,344,991
13	0	0	1,344,991
14	35,932	10,408	1,355,399
15	0	0	<b>1,355,399</b>

Fuente - Elaboración propia

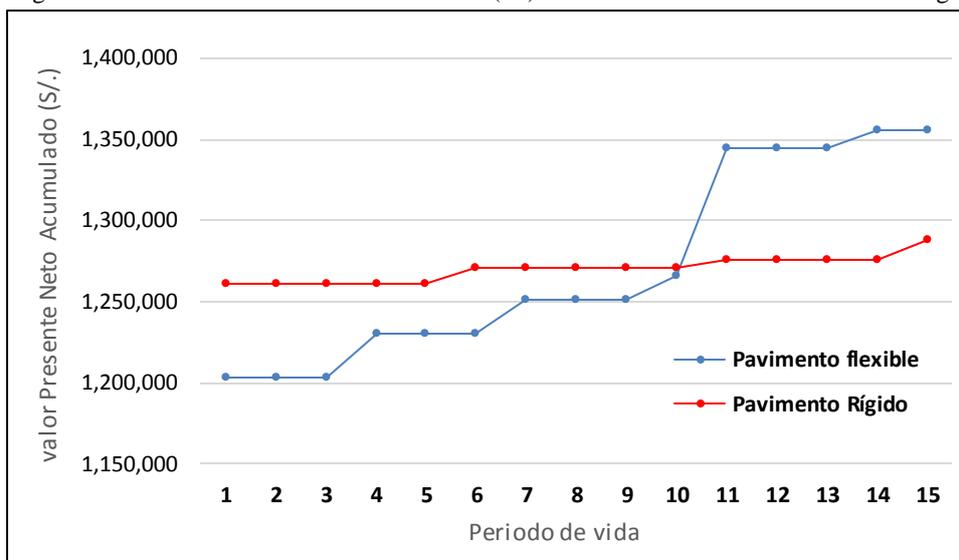
Tabla 102 – Valor Presente Neto Acumulado (S/.) del pavimento rígido

<b>Año</b>	<b>Costo (S/.)</b>	<b>VPN (S/.)</b>	<b>VPN Acumulado (S/.)</b>
1	1,261,528	1,261,528	1,261,528
2	0	0	1,261,528
3	0	0	1,261,528
4	0	0	1,261,528
5	0	0	1,261,528
6	14,505	9,007	1,270,535
7	0	0	1,270,535
8	0	0	1,270,535
9	0	0	1,270,535

10	0	0	1,270,535
11	14,505	5,592	1,276,128
12	0	0	1,276,128
13	0	0	1,276,128
14	0	0	1,276,128
15	46,465	12,236	<b>1,288,363</b>

Fuente - Elaboración propia

Imagen 33 – Valor Presente Neto Acumulado (S/.) Pavimento Flexible vs Pavimento Rígido



Fuente - Elaboración propia

En la primera tabla se observa que el costo capitalizado del pavimento flexible es de S/. 1, 355,399. Siendo el costo constructivo de este de S/. 1, 203,703, el costo de mantenimiento representaría el 12.60 % del costo constructivo.

En la segunda tabla se observa que el costo capitalizado del pavimento rígido es de S/. 1, 288,363. Siendo el costo constructivo de este de S/. 1, 261,528, el costo de mantenimiento representaría el 2.13 % del costo constructivo.

Se puede concluir que la alternativa más rentable es la del pavimento rígido por presentar un costo capitalizado 4.9% menor que el costo del pavimento flexible. Adicionalmente se puede observar en la imagen que el pavimento de concreto pasa a tener una mayor rentabilidad cuando supera el décimo año de su periodo de vida.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones que se llegaron al término de la presente tesis son las siguientes:

1. Del estudio de tráfico se obtuvo que el número de ejes equivalentes (ESAL) fue de  $12.00E+06$  para el pavimento flexible y  $15.19E+06$  para el pavimento rígido. Es necesario recalcar que el dato del ESAL fue usado solamente para los diseños por la metodología de la AASHTO y del IA. Para el caso del diseño por la metodología de la PCA se usó el IMDA y la composición de ejes por vehículo para hallar el número de repeticiones esperadas acumuladas al periodo de diseño por tipo y peso de cada eje, a diferencia del ESAL que representa el número de repeticiones esperadas acumuladas al periodo de diseño de un eje equivalente de 8.2 toneladas. El estudio de tráfico es el dato de entrada más importante en la metodología de diseño de pavimentos y es por ello que en proyectos como el de la presente tesis se recomienda instalar estaciones de pesaje que regulen las cargas máximas legales permitidas por tipo de vehículo para así no incurrir en un subdimensionamiento del pavimento.
2. Del estudio de suelos se obtuvo que el material de la subrasante estaba formado por una arcilla de mediana plasticidad, ligeramente húmeda (CL / A-7-5 (4)), el cual tenía un CBR = 6 a una compactación del 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor Estándar (wop = 14.6%, máximo gd = 1.90 gr/cm<sup>3</sup>). El diseño de la estructura del pavimento se realizó considerando las características originales de la subrasante; es decir no existió ninguna mejora sobre ella. Del estudio de canteras se obtuvo que el material usado para la subbase sería una arena arcillosa (SC / A-2-6), el cual tenía un CBR = 29 a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado (wop = 8.1%, máximo gd = 1.95 gr/cm<sup>3</sup>) y el material de base sería piedra chancada tipo B, el cual tenía un CBR = 112 a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado (wop = 6.3%, máximo gd = 2.16 gr/cm<sup>3</sup>).

Como se pudo observar en el desarrollo de la presente tesis se constató que las características de la subrasante, especialmente el CBR, afectan directamente a los espesores de capa del pavimento flexible mientras que para el pavimento

rígido su efecto en la elección del espesor de la losa de concreto es prácticamente nulo. Por ello, se recomienda hacer una investigación para determinar en qué valor del CBR de la subrasante, el costo del pavimento flexible se iguala al del pavimento rígido; pues cuando este valor disminuye, los espesores de las capas granulares del pavimento flexible aumentan considerablemente mientras que el espesor de la losa de concreto no se modifica sustancialmente.

3. Del estudio pluviométrico y meteorológico se obtuvo que de acuerdo al SENAMHI, el clima de Yurimaguas era clasificado como tropical; es decir, un clima de precipitaciones abundantes o regulares durante todo el año por lo que se pudo afirmar que el porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento estaría expuesta a niveles de humedad próximas a las saturación sería de más del 25%. Así mismo se obtuvo que de acuerdo al SENAMHI, la temperatura media anual de Yurimaguas era de 26.5°C donde el mes más frío reportaba una temperatura mínima de 26° C y el mes más caluroso, una temperatura máxima de 27°C.
4. Del capítulo de diseño del pavimento flexible se obtuvieron múltiples alternativas de diseño tanto por la metodología de la AASHTO como de la del IA. Las diferencias entre ambas radica en el enfoque aplicado. Mientras que la AASHTO utiliza conceptos de confiabilidad, desviación estándar combinada (que toma en cuenta la variabilidad del tránsito y otros factores que afectan el comportamiento del pavimento) y pérdida de serviciabilidad; el IA ofrece un método más directo a través de las cartas de diseño, derivadas del programa de computadora DAMA, clasificadas por diferentes temperaturas promedio anual del aire. En la presente tesis, al diseñar por la metodología del IA, se obtuvo un mayor SN del pavimento a comparación que el diseño por la metodología de la AASHTO lo cual se tradujo en mayores espesores de capas. Además el espesor mínimo de carpeta asfáltica por la metodología del IA fue de 5 pulgadas a diferencia de la AASHTO, donde se usó un espesor mínimo de carpeta asfáltica de 4 pulgadas. Finalmente, se recomienda hacer uso del programa DAMA para comparar los resultados finales obtenidos por la metodología del IA.

5. Del capítulo de diseño del pavimento rígido se obtuvieron dos alternativas de diseño; una por la metodología de la AASHTO y otra por la de la PCA. Las diferencias entre ambas radica en el enfoque aplicado. Mientras que la AASHTO, como se mencionó, utiliza conceptos de confiabilidad, desviación estándar combinada (que toma en cuenta la variabilidad del tránsito y otros factores que afectan el comportamiento del pavimento) y pérdida de serviciabilidad; la PCA se basa en un análisis por fatiga y por erosión donde se evalúa el porcentaje de daño al que estará expuesto el pavimento. Una clara diferencia entre ambas metodologías es que la AASHTO usa el ESAL como resultado final del estudio de tráfico mientras que la PCA usa el número de repeticiones esperadas acumuladas al periodo de diseño por tipo y peso de cada eje. Es preciso mencionar también que se halló que el aporte estructural de la base granular al pavimento rígido fue mínimo y esto se vio reflejado al momento de incrementar el espesor de dicha capa con la finalidad, fallida finalmente, de reducir el espesor de la losa de concreto. En la presente tesis, al diseñar por la metodología de la PCA, se obtuvo un espesor de base de 15 cm; al igual que por la metodología de la AASHTO, pero un espesor de losa de concreto de 24 cm; 4 cm menor que por la otra metodología; por lo que se eligió esta alternativa como la más óptima del pavimento rígido. Se recomienda hacer uso del programa JSLAB para comparar los resultados finales obtenidos por la metodología de la PCA.
6. Del capítulo de análisis económico se obtuvo que el pavimento flexible diseñado por la metodología de la AASHTO (subbase de 55 cm, base de 25 cm y carpeta asfáltica de 4 pulgadas) representó la alternativa de menor costo inicial (S/. 1, 203,703). Es preciso mencionar que el costo inicial de la estructura del pavimento rígido fue de S/. 1, 261,528; costo mayor en 4.8% al del pavimento flexible.

Para la elección de la mejor alternativa se realizó un análisis de los costos de mantenimiento de ambas alternativa de diseño haciendo uso del software de gestión vial HDM-4. En el caso del pavimento flexible se consideró una partida de sellado de fisuras, un sellado asfáltico aplicable cada tres años para mantener el porcentaje de fisuración por debajo del 10% y evitar la aparición

de baches; y un fresado y recapeo de 1 pulgada cuando el IRI superase el valor de 3.5 m/km. En el caso del pavimento rígido se consideró una partida de resellado de juntas aplicable cada cinco años para mantener el porcentaje de juntas despostilladas por debajo del 5%, un reemplazo de losas cuando el número de losas fisuradas superase el 5% y un cepillado de 5 mm cuando el IRI superase el valor de 3.5 m/km.

En base a esta política de mantenimiento se determinó que los costos directos de mantenimiento del pavimento rígido representaban a penas 21.7% de los costos directos de mantenimiento del pavimento flexible. Posteriormente se procedió a capitalizar estos costos con una tasa de descuento del 10% y se obtuvo que el valor presente neto (VPN) del pavimento rígido fue 4.9% menor que el VPN del pavimento flexible y que el pavimento rígido pasaba a tener una mayor rentabilidad a partir del año 10 de su periodo de vida por lo que se procedió a seleccionar el pavimento rígido como la mejor alternativa de diseño.

7. A lo largo de la elaboración de esta tesis se ha podido constatar el gran número de variables presentes en las diversas metodologías de diseño para cada uno de los tipos de pavimentos. Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad de estas variables para así determinar cuáles son las más y menos influyentes en el diseño final de espesores.

## 8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- AASHTO. (2015). *MECHANISTIC EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE (MEPDG)*. United States of America.
- ACI 363R-92. (1997). *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO GUIDE for Design of Pavement Structures*. Washington D.C.
- Cement Association of Canada. (2016). *CONCRETE, even smarter than you think*. Recuperado el 04 de Abril de 2015, de CONCRETE, even smarter than you think: <http://www.cement.ca>
- Concesionaria Puerto Amazonas S.A. (s.f.). Recuperado el 04 de Abril de 2015, de Concesionaria Puerto Amazonas S.A: <http://www.copam.com.pe>
- Fantozzi, E. (12 de Abril de 2012). *Centro de Documentación para la Innovación de la Cadena de Suministro*. Recuperado el 04 de Abril de 2015, de Centro de Documentación para la Innovación de la Cadena de Suministro: <http://innovasupplychain.pe>
- Huang, Y. H. (2004). *PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN* (Segunda ed.). United States of America: Pearson Prentice Hall.
- Menéndez, J. (2012). *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS: Materiales, Diseño y Conservación* (Tercera ed.). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *MANUAL DE CARRETERAS: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. Lima.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *MANUAL DE CARRETERAS: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (s.f.). *ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL*. Recuperado el 15 de Setiembre de 2015, de ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL: <http://mtcgeo2.mtc.gob.pe>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *NORMA E.060 CONCRETO ARMADO*. Lima: DIGIGRAF CORP.SA.

Montejo, A. (2002). *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS* (Vol. 1). Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.

Portland Cement Association. (1995). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. United States of America.

Reglamento Nacional de Edificaciones. (2009). *NORMA E.060 CONCRETO ARMADO* (Primera ed.). Lima.

Rico, A., & Del Castillo, H. (2005). *LA INGENIERÍA DE SUELOS EN LAS VÍAS TERRESTRES: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas* (Vol. 2). Ciudad de México: Limusa.

The Asphalt Institute. (1991). *THICKNESS DESIGN: Asphalt Pavements for Highways and Streets*. Lexington.

Vega, J. (Agosto de 2010). *Provías Nacional*. Recuperado el 04 de Abril de 2015, de Provías Nacional: <http://www.proviasnac.gob.pe>

Vivar, G. (1995). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS* (Segunda ed.). Lima: Colecciones del Ingeniero Civil.