

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS DE LA NUEVA CARRETERA PANAMERICANA NORTE EN EL TRAMO DE HUACHO A PATIVILCA (KM 188 A 189)

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

Kimiko Katherine Harumi Rengifo Arakaki

ASESOR: Ing. Manuel A. Olcese Franzero

Lima, abril de 2014

RESUMEN

La nueva carretera Panamericana Norte se encuentra al norte de Lima. Actualmente el tramo de Ancón – Huacho – Pativilca se encuentra en concesión a Norvial S.A.

En esta tesis se realiza el diseño del pavimento de un kilómetro de esta carretera en el tramo de Huacho a Pativilca. Específicamente, según el temario del tema de tesis el kilómetro designado por el asesor fue del 188 al 189.

La carretera Huacho – Pativilca tiene 57 kilómetros de longitud y conecta las ciudades de Huacho, Huaura, Medio Mundo, Supe, Barranca y Pativilca. En general, la Panamericana Norte es una carretera interprovincial que conecta todos los departamentos de la Costa. El tramo de estudio de esta tesis une a las provincias de Barranca y Huaura. Cabe resaltar que entre las particularidades de la zona se incluye el tránsito de gran porcentaje de vehículos pesados. Además presenta un clima templado y con pocas precipitaciones.

Se procede con el diseño del pavimento tanto flexible como rígido. Para el tipo 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 rígido se utiliza también la de la AASHTO y la de la Portland Cement Association (PCA).

Por último, una vez obtenidos los diseños definitivos para los dos tipos de pavimento se procede a una comparación económica del costo inicial de construcción de esta estructura.

DEDICATORIA

A mis padres, Georgina y James, por su amor y apoyo incondicional a pesar de la distancia.

A mi abuela Rocío por su inmenso cariño y ánimo.

A mi asesor por su guía y recomendaciones.

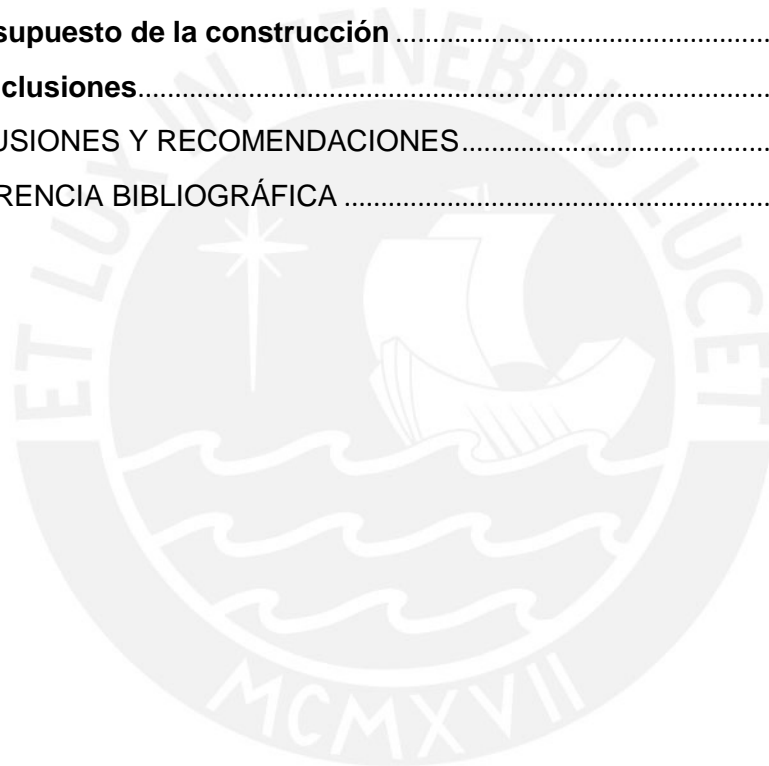
Al Mohammad Hussen y Antonioni Alejos por brindar información necesaria para la elaboración de esta tesis.

ÍNDICE

1.	GENERALIDADES.....	1
1.1.	Introducción.....	1
1.2.	Descripción del proyecto.....	1
1.2.1.	Ubicación del proyecto.....	1
1.2.2.	Características de la zona.....	1
1.3.	Objetivos, Alcance y Metodología.....	1
1.4.	Organización del documento.....	2
2.	MARCO TEÓRICO.....	3
2.1.	Definición de pavimento.....	3
2.1.1.	Tipos de pavimento.....	3
2.1.1.1.	Pavimento flexible.....	3
2.1.1.2.	Pavimento rígido.....	7
2.2.	Datos necesarios para el diseño.....	10
2.2.1.	Estudios de tráfico.....	10
2.2.1.1.	Clasificación de los vehículos.....	11
2.2.1.2.	Estimación de la tasa de crecimiento.....	11
2.2.1.3.	Factores destructivos.....	11
2.2.1.4.	Proyección del tráfico.....	11
2.2.2.	Estudios de mecánica de suelos.....	12
2.2.2.1.	Ensayo de granulometría.....	12
2.2.2.2.	Límites de Atterberg.....	12
2.2.2.3.	Ensayo de compactación Proctor modificado (Método C).....	12
2.2.2.4.	Ensayo de valor de soporte de California o CBR.....	12
2.2.3.	Estudios hidrológicos-pluviométricos.....	13
2.2.4.	Estudios de canteras y fuentes de agua.....	13
3.	ESTUDIO DE TRÁFICO.....	14
3.1.	Características del tramo de estudio.....	14
3.2.	Índice medio diario anual.....	14
3.3.	Estimación del tránsito futuro.....	15
3.4.	Factor de carga equivalente.....	16
3.5.	Factores de equivalencia.....	17

3.6.	Proyección del IMDa	18
3.7.	Tránsito de diseño	19
3.8.	Conclusiones	22
4.	ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS	24
4.1.	Resumen de las características de los suelos	24
4.2.	Ensayo granulométrico y clasificación del suelo	29
4.3.	Ensayo de compactación Proctor Modificado	29
4.4.	CBR al 95% del terreno	30
4.5.	Conclusiones	30
5.	ESTUDIOS PLUVIOMÉTRICOS	31
5.1.	Estación	31
5.2.	Clima	31
5.3.	Cantidad de días lluviosos al mes y precipitaciones promedio anuales 33	
5.4.	Conclusiones	35
6.	ESTUDIOS DE CANTERAS Y FUENTES DE AGUA	37
6.1.	Requisitos para los materiales granulares	37
6.1.1.	Subbase	37
6.1.2.	Base.....	38
6.2.	Requisitos para las fuentes de agua	39
6.3.	Canteras	40
6.3.1.	Cantera Medio Mundo	40
6.3.2.	Cantera Río Pativilca	41
6.4.	Fuentes de agua	43
6.4.1.	Río Pativilca.....	43
6.5.	Conclusiones	43
7.	DISEÑO	44
7.1.	Resumen de datos	44
7.2.	Método de la PCA para pavimentos rígidos	45
7.2.1.	Datos de entrada	45
7.2.2.	Cálculo del espesor de la losa de concreto.....	46
7.3.	Método AASHTO para pavimentos rígidos	50
7.3.1.	Datos de entrada	51
7.3.2.	Cálculo del espesor de la losa de concreto.....	55
7.4.	Método AASHTO para pavimentos flexibles	55

7.4.1.	Datos de entrada	56
7.4.2.	Diseño de la estructura del pavimento	57
7.5.	Método del Instituto del Asfalto	61
7.5.1.	Datos de entrada	61
7.5.2.	Valores de la carpeta asfáltica con las distintas alternativas	62
7.5.3.	Estructura del pavimento.....	63
7.6.	Conclusiones.....	64
8.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	67
8.1.	Análisis de precios unitarios	67
8.2.	Elección de la mejor alternativa	71
8.3.	Presupuesto de la construcción	74
8.4.	Conclusiones.....	75
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
10.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	79



LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Conteo volumétrico del tráfico	14
Tabla 3.2 Tasa de crecimiento anual del tramo Chancay – Santa Rosa	15
Tabla 3.3 Factores de equivalencia de carga según el AASHTO para pavimentos flexibles con nivel de serviciabilidad final de 3 y número estructural igual a 5.....	16
Tabla 3.4 Factores de equivalencia de carga según el AASHTO para pavimentos rígidos con nivel de serviciabilidad final de 3 y espesor de losa de 28 cm	17
Tabla 3.5 Pesos reglamentarios por eje de los vehículos que transitan por la zona y factores destructivos de cada vehículo considerando pavimento flexible.....	18
Tabla 3.6 Pesos reglamentarios por eje de los vehículos que transitan por la zona y factores destructivos de cada vehículo considerando pavimento rígido	18
Tabla 3.7 Proyección del IMDa en los próximos 20 años	19
Tabla 3.8 Parámetros de diseño para el pavimento flexible	20
Tabla 3.9 Parámetros de diseño para el pavimento rígido.....	21
Tabla 3.10 Número de ejes equivalentes para ambos tipos de pavimento	21
Tabla 4.1 Granulometría de la muestra de subrasante	29
Tabla 5.1 Días de lluvia por mes	33
Tabla 5.2 Precipitaciones medias mensuales y anuales	34
Tabla 6.1. Requerimientos granulométricos para subbase granular	37
Tabla 6.2 Requerimientos de Ensayos Especiales	38
Tabla 6.3 Requerimientos granulométricos para base granular.....	38
Tabla 6.4 Valores mínimos de CBR para base granular	38
Tabla 6.5 Requerimientos para agregado grueso	39
Tabla 6.6 Requerimientos para agregado fino	39
Tabla 6.7 Requerimientos para las fuentes de agua.....	40
Tabla 6.8 Resumen de ensayos de laboratorio cantera Medio Mundo.....	40
Tabla 6.9 Resumen de ensayos especiales cantera Medio Mundo	41
Tabla 6.10 Resumen de ensayos de laboratorio cantera Río Pativilca.....	41
Tabla 6.11 Resumen de ensayos especiales cantera Río Pativilca	42
Tabla 6.12 Resumen de ensayos Río Pativilca.....	43
Tabla 7.1 Resumen de los resultados de los estudios.....	45
Tabla 7.2 Pesos máximos reglamentarios de los ejes por tipo de vehículo (ton).....	47
Tabla 7.3 Pesos máximos reglamentarios de los ejes por tipo de vehículo (kip)	47
Tabla 7.4 Repeticiones de las cargas por eje durante el periodo de diseño del pavimento	48
Tabla 7.5 Diseño del pavimento rígido según el método de la PCA con espesor de base 15 cm y de losa de concreto 28 cm	49
Tabla 7.6 Alternativas para la conformación del pavimento rígido obtenidas del cálculo - método PCA.....	50
Tabla 7.7 Espesores recomendados para la construcción del pavimento rígido – método PCA	50

Tabla 7.8 Resumen de parámetros de diseño con el método de la AASHTO para pavimento rígido	54
Tabla 7.9 Alternativas para la conformación del pavimento rígido obtenidas del cálculo - método AASHTO	55
Tabla 7.10 Espesores recomendados para la construcción del pavimento rígido – método AASHTO.....	55
Tabla 7.11 Resumen de parámetros de diseño con el método de la AASHTO para pavimento flexible.....	57
Tabla 7.12 Coeficientes estructurales para las capas del pavimento flexible.....	58
Tabla 7.13 Coeficientes de drenaje para las capas del pavimento flexible.....	59
Tabla 7.14 Números estructurales de las capas del pavimento flexible	59
Tabla 7.15 Espesores de capa obtenidos del cálculo para pavimento flexible - método AASHTO (cm)	60
Tabla 7.16 Espesores de capas recomendados para la construcción del pavimento flexible – método AASHTO.....	61
Tabla 7.17 Espesores de carpeta asfáltica obtenidos del cálculo - método del IA (cm)	63
Tabla 7.18 Número estructural y espesores de las capas del pavimento flexible	63
Tabla 7.19 Espesores de capas para pavimento flexible obtenidos del cálculo - método del IA.....	64
Tabla 7.20 Espesores de capas recomendados para la construcción del pavimento flexible – método IA.....	64
Tabla 8.1 Dimensiones del tramo a diseñar	71
Tabla 8.2 Volumen de material asfáltico y granular (m ³).....	72
Tabla 8.3 Costo de la estructura del pavimento flexible (S/.)	72
Tabla 8.4 Conformación de la estructura del pavimento rígido	73
Tabla 8.5 Volumen de concreto y material granular (m ³)	73
Tabla 8.6 Costo de la estructura del pavimento rígido (S/.).....	73
Tabla 8.7 Costo de ambos tipos de pavimento (S/.)	73
Tabla 8.8 Presupuesto de construcción del pavimento (S/.).....	74
Tabla 8.9 Influencia de cada partida sobre el presupuesto total.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Distribución del volumen de tránsito	15
Gráfico 3.2 Proyección del IMDa en los próximos 20 años	19
Gráfico 3.3 Número de ejes equivalentes para diferentes períodos de diseño.....	22
Gráfico 5.1 Promedio de días lluviosos por mes	34
Gráfico 5.2 Promedio de precipitaciones medias mensuales	35
Gráfico 5.3 Promedio de precipitaciones medias anuales	35
Gráfico 8.1 Costo de la estructura del pavimento flexible (S/.)	72



LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 Mapa de clasificación climática del Perú..... 32

Figura 7.1 Procedimiento para determinar los espesores de las capas del pavimento flexible usando el análisis estratificado..... 60

Figura 7.2 Carta de diseño para carpeta asfáltica en todo su espesor 62



LISTA DE RESULTADOS DE ENSAYOS

Resultado de ensayo 4.1 Análisis granulométrico de la subrasante	25
Resultado de ensayo 4.2 Ensayo de Proctor modificado Método “A”	26
Resultado de ensayo 4.3 Ensayo CBR parte 1.....	27
Resultado de ensayo 4.4 Ensayo CBR parte 2.....	28



1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

En el Perú las vías de comunicación más utilizadas dentro del territorio son las terrestres. Dentro de estas se encuentran los caminos, carreteras, etc. Las carreteras permiten optimizar los tiempos de recorrido de los vehículos debido al diseño de su capa de rodadura. Es así como un buen diseño de estas carreteras es necesario para garantizar su correcto desempeño y durabilidad. En ese sentido esta tesis contempla el diseño del pavimento de un kilómetro de una carretera en particular utilizando diferentes metodologías con el fin de determinar la opción más económica.

1.2. Descripción del proyecto

El pavimento que se diseñará corresponde a la nueva carretera Panamericana Norte en el tramo entre Huacho y Pativilca.

1.2.1. Ubicación del proyecto

La zona dentro de la cual se encuentra el tramo elegido se inicia aproximadamente a 147 km de Lima y termina en el kilómetro 199. Geográficamente se encuentra entre las latitudes $10^{\circ} 40'$ a $11^{\circ} 10'$ y las longitudes $77^{\circ} 40'$ a $77^{\circ} 50'$.

Dicho tramo limita con el Río Pativilca por el Norte, con los Valles Costeños por el Este, con la punta La Viuda por el Sur y con el Océano Pacífico por el Oeste. El río Huaura atraviesa el tramo en el kilómetro 151 de la carretera.

Esta vía une las ciudades de Huacho y Barranca.

1.2.2. Características de la zona

El clima de esta zona tiene la particularidad de cambiar de árido a semi-cálido en los primeros meses del año, a templado y húmedo durante el resto del año cuando se presenta llovizna fina en algunas ocasiones.

En cuanto a la altitud del tramo donde se encuentra el trazo, esta varía desde 0 m.s.n.m. hasta 50 m.s.n.m.

1.3. Objetivos, Alcance y Metodología

El objetivo de esta tesis consiste en realizar el diseño del pavimento de un kilómetro de la nueva carretera Panamericana Norte. 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 óptima del pavimento.

1.4. Organización del documento

En el capítulo 2 se describe las características de la zona del tramo a diseñar y se hace un breve resumen de los tipos de pavimento, sus características y los datos necesarios para el diseño.

En el capítulo 3 se estima las solicitaciones de tránsito a las que será sometido el pavimento durante su vida útil.

En el capítulo 4 se muestran los resultados de ensayo de suelos de la subrasante proporcionados por el temario de tesis.

En el capítulo 5 se revisan los estudios pluviométricos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para extraer información relevante para el diseño.

En el capítulo 6 se determina si las canteras cercanas al proyecto cumplen con los requerimientos mínimos establecidos por la Norma del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

En el capítulo 7 se realiza el diseño tanto del pavimento flexible como rígido por los métodos ya mencionados en el inciso anterior.

En el capítulo 8 se compara económicamente las alternativas desarrolladas en el capítulo anterior.

En el capítulo 9 se extraen las conclusiones más relevantes de cada capítulo y se realiza una discusión de los resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de pavimento

Un pavimento es una estructura cuya finalidad es permitir el tránsito de vehículos y puede estar conformada por una o varias capas superpuestas. Las principales funciones que debe cumplir un pavimento son “*proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente 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*”¹. Además debe ser resistente al desgaste debido a la abrasión producida por las llantas y tener buenas condiciones de drenaje. En cuanto a la seguridad vial debe presentar una textura apropiada de acuerdo a la velocidad de circulación de los vehículos para mejorar la fricción, debe tener un color adecuado de tal manera que se eviten los reflejos y deslumbramientos. Con el fin de brindar comodidad a los usuarios, debe procurar tener regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal. También se debería tener en cuenta en el diseño medidas para disminuir el ruido de la rodadura. Como toda obra de infraestructura los factores de costo y de vida útil son muy importantes por lo que el pavimento debe ser durable y económico².

Existen varios tipos de pavimento; sin embargo, sólo se profundizará en dos por el alcance del presente trabajo: flexible y rígido.

2.1.1. Tipos de pavimento

2.1.1.1. Pavimento flexible

Este tipo se caracteriza por estar conformado en la superficie por una capa de material bituminoso o mezcla asfáltica que se apoya sobre capas de material granular, las cuales generalmente van disminuyendo su calidad conforme se acercan más a la subrasante. Esto se debe a que los esfuerzos que se producen por el tránsito van disminuyendo con la profundidad y por razones económicas.

La teoría que se utiliza para analizar su comportamiento es la teoría de capas de Burmister³.

Las características fundamentales que debe cumplir un pavimento flexible son⁴:

¹ Rico, A., Y Del Castillo, H. (1999) *La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 2.* México D.F.: Limusa. Pág. 99.

² Montejo, A. (2006) *Ingeniería de pavimentos* (Tercera ed.) Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Pág. 2.

³ Huang, Y. (2004) *Pavement analysis and design* (Segunda ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall. Pág. 8.

⁴ Rico, A., Y Del Castillo, H. (1999) *La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 2.* México D.F.: Limusa. Pág. 102-106.

- Resistencia estructural: el pavimento debe ser capaz de soportar las cargas debidas al tránsito de tal manera que el deterioro sea paulatino y que se cumpla el ciclo de vida definido en el proyecto.

La causa de falla en este tipo de pavimentos con mayor aceptación es los esfuerzos cortantes. Sin embargo, también se producen esfuerzos adicionales por la aceleración y frenado de los vehículos así como esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura al deformarse esta verticalmente debido a la carga que soporta. Asimismo, el pavimento se encuentra sometido a cargas actuantes repetitivas. Éstas afectan a largo plazo la resistencia de las capas de relativa rigidez, que en los pavimentos flexibles serían sobretodo las carpetas y bases estabilizadas, donde podrían ocurrir fenómenos de fatiga.

Además, la repetición de cargas puede causar la rotura de los granos del material granular modificando la resistencia de estas capas.

- Deformabilidad: el nivel de deformación del pavimento se debe controlar debido a que es una de las principales causas de falla en la estructura y si la deformación es permanentemente, el pavimento deja de cumplir las funciones para las cuales fue construido. Se presentan dos clases de deformaciones en una vía: elásticas (recuperación instantánea) y plásticas (permanentes).
- Durabilidad: una carretera que tenga un ciclo de vida prolongado en condiciones aceptables no sólo evita la necesidad de construcción nueva, sino también la molestia de los usuarios de la vía al interrumpir el tránsito.
- Costo: se debe hallar un equilibrio entre el costo de construcción inicial y el mantenimiento al que tendrá que ser sometida la vía. Asimismo influye la calidad y la disponibilidad de los materiales para la estructura.
- Requerimientos de la conservación: las condiciones de drenaje y subdrenaje juegan un rol decisivo en el ciclo de vida del pavimento.
- Comodidad: una carretera tiene que resultar cómoda para los usuarios.

Las capas que generalmente componen la estructura de un pavimento flexible son las siguientes⁵:

- Carpeta asfáltica: es la capa superficial de la estructura. Tiene tres funciones principales: servir como superficie de rodamiento uniforme y estable para permitir el tránsito, impermeabilizar la estructura para evitar en lo posible la

⁵ Montejo, A. (2006) *Ingeniería de pavimentos* (Tercera ed.) Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Pág. 4-5.

percolación del agua al interior del pavimento y ser resistente a los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas.

- Base: sirve como apoyo a la carpeta asfáltica y transmite los esfuerzos producidos por el tránsito a las capas inferiores en un nivel adecuado.
- Sub-base: principalmente cumple con una función económica ya que permite la utilización de materiales de menor calidad en un porcentaje del espesor del pavimento. Entonces, dependiendo de la calidad y el costo del material disponible, se puede utilizar sólo base o sub-base y base. Con la construcción de la sub-base, puede ser que el espesor final de la capa sea mayor pero aun así resultar en un diseño más económico.

Además puede servir como una capa de transición ya que actúa como un filtro que separa a la base de la subrasante impidiendo que los finos penetren en la primera y la dañen estructuralmente.

Esta capa ayuda a controlar los cambios volumétricos que podrían tomar lugar en la subrasante debido a cambios en su contenido de agua o a cambios de temperatura. De esta manera, las deformaciones serían absorbidas por la sub-base evitando que se reflejen en la carpeta asfáltica.

En cuanto a resistencia cumple la misma función que las capas superiores de transmitir los esfuerzos a la subrasante. Por último, a través de esta capa se puede drenar el agua e impedir la ascensión capilar.

Además en la fase de construcción se pueden utilizar ciertos tratamientos como: la capa de sellado que se coloca encima de la carpeta asfáltica para impermeabilizar la superficie, el riego de liga y la capa de imprimación que sirven para asegurar la adherencia entre asfalto antiguo y nuevo en el primer caso, y entre el material granular y la mezcla asfáltica que se colocará encima en el segundo.

Desde que se comenzaron a construir pavimentos flexibles se han ido elaborando teorías y desarrollando mejoras para el diseño y el análisis de estas estructuras. Algunos de estos avances son mencionados por Huang⁶. Los métodos de diseño pueden ser clasificados dentro de cinco categorías y se detallan a continuación:

- Métodos empíricos: se caracterizan, como su nombre lo indica, por estar basados en datos recolectados de campo. Justamente esta característica resulta una desventaja en sí misma ya que el método sólo puede ser utilizado bajo las condiciones ambientales, de los materiales y de carga de las muestras originales. Los resultados no pueden ser

⁶ Huang, Y. (2004) *Pavement analysis and design* (Segunda ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall. Pág.1-5.

extrapolados directamente y haría falta desarrollar un nuevo método para corregir este inconveniente.

- Métodos para limitar la falla por corte: el objetivo de estos métodos es evitar que la falla por corte ocurra. Para esto se deben tener en cuenta principalmente las propiedades de cohesión y el ángulo interno de fricción del suelo de las diferentes capas del pavimento y de la subrasante.

Este procedimiento ya no es tan popular debido a que con el incremento del volumen del tráfico y la mayor velocidad a la que llegan los vehículos se hace necesario brindar comodidad a los usuarios y no solo prevenir la falla por corte de los pavimentos.

- Métodos para limitar las deformaciones: con estas técnicas se diseña el pavimento con un espesor que impida que se exceda el límite permisible de deflexiones verticales.

La ventaja de utilizar deflexiones como criterio principal es que se pueden medir directamente en campo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que gran cantidad de pavimentos fallan por esfuerzos y tensiones mayores que los esperados y no por deflexiones.

- Métodos de regresión basados en el desempeño de los pavimentos o en las pruebas de las carreteras: estos procedimientos se caracterizan por utilizar ecuaciones de regresión basadas en los resultados de pruebas de caminos existentes. No obstante, presenta la misma desventaja que el método empírico en que dichas ecuaciones sólo corresponden a las condiciones del lugar en que se encontraba la vía.

- Métodos mecanísticos-empíricos: estos métodos incorporan la mecánica de materiales y los datos obtenidos del rendimiento en campo de los pavimentos. Mediante estas metodologías se llega a relacionar las solicitaciones a las que se ve sometida la estructura con la respuesta de la misma, por ejemplo la carga de las llantas con los esfuerzos ocasionados.

Utilizando este procedimiento se ha podido incrementar la confiabilidad del diseño y predecir el tipo de desgaste o deterioro que podría presentar el pavimento. Asimismo, al contrario de otros métodos antes mencionados, se puede extrapolar a partir de los datos de ciertas zonas o condiciones en que se llevan a cabo pruebas a otras circunstancias.

Un hito importante en el desarrollo de los pavimentos flexibles fue la creación de los conceptos de serviciabilidad y confiabilidad, los cuales se explicarán más a detalle posteriormente en el capítulo de diseño.

2.1.1.2. Pavimento rígido

El elemento estructural primordial en este tipo de pavimento consta de una losa de concreto que se apoya directamente en la subrasante o en una capa de material granular seleccionado denominada subbase.

La necesidad de utilizar la subbase surge sólo si la subrasante no tiene las condiciones necesarias como para resistir a la losa y las cargas sobre esta; es decir, que no actúe como un soporte adecuado. Una de las diferencias más saltantes entre los pavimentos flexibles y rígidos es la forma en que se distribuyen los esfuerzos producidos por el tránsito sobre ellos. Debido a que el concreto es mucho más rígido que la mezcla de asfalto, éste distribuye los esfuerzos en una zona mucho más amplia.

Del mismo modo, el concreto presenta un poco de resistencia a la tensión por lo que aún en zonas débiles de la subrasante su comportamiento es adecuado. Es por ello que la capacidad portante de un pavimento rígido recae en las losas en vez de en las capas subyacentes, las cuales ejercen poca influencia al momento del diseño⁷.

Otra diferencia importante es la existencia de juntas en los pavimentos rígidos, las que no se presentan en los flexibles. Es así como la teoría de análisis que se utiliza para la primera clase de pavimento es la teoría de placa o plancha en lugar de la teoría de capas utilizada para los caminos asfaltados⁸.

La resistencia del concreto utilizada usualmente es alta, entre 200 y 400 kg/cm². Por su parte las losas pueden ser de concreto simple, reforzado o preesforzado⁹.

Otro autor clasifica los pavimentos rígidos de la siguiente manera¹⁰:

- Pavimento articulado de concreto simple o Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP): es la solución más económica con juntas espaciadas de manera cercana.
- Pavimento articulado de concreto reforzado o Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP): si bien el refuerzo no aumenta la capacidad portante de la estructura, si permite espaciar las juntas un poco más. Asimismo, análogamente a otra estructura de concreto reforzado como una viga, el acero

⁷ Montejo, A. (2006) *Ingeniería de pavimentos* (Tercera ed.) Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Pág.5

⁸ Huang, Y. (2004) *Pavement analysis and design* (Segunda ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall. Pág.11.

⁹ Rico, A., Y Del Castillo, H. (1999) *La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Volumen 2.* México D.F.: Limusa. Pág. 205.

¹⁰ Huang, Y. (2004) *Pavement analysis and design* (Segunda ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall. Pág. 14-17.

puede mantener el concreto unido en caso se produzca una grieta o rotura.

- Pavimento continuo de concreto reforzado o Continuous Reinforced Concrete Pavement (CRCP): con esta clase se pueden eliminar las juntas transversales pero el espesor de la losa es igual al de los dos tipos antes mencionados (JPCP y JRCP).
- Pavimento de concreto preesforzado o Prestressed Concrete Pavement (PCP): al ser aplicada una precompresión, los esfuerzos de tensión o tracción disminuyen cuando la estructura es sometida a cargas. Por lo tanto, la probabilidad de agrietamiento es menor y también se puede utilizar un menor número de juntas transversales.

No obstante, no es una solución ni muy económica ni muy práctica si se tiene en cuenta el enorme trabajo que implica la etapa de construcción.

Son dos las capas que forman parte de un pavimento rígido, la sub-base y la losa de concreto, y sus funciones se detallan a continuación:

- Sub-base o base: los distintos autores citados en el presente documento concuerdan en que las funciones de la sub-base deberían ser las siguientes:
 - Servir como apoyo uniforme a la losa.
 - Control de bombeo: se debe tratar de evitar el bombeo, eyección de agua con suelo (mayormente finos), a través de las juntas, grietas y extremos del pavimento. El agua proviene de la infiltración por medio de las juntas, luego por acción de los movimientos repetitivos de la losa, por las pesadas cargas axiales del tránsito, los finos se van segregando y se licúan para posteriormente salir a la superficie.
Para que ocurra el bombeo se necesita que el suelo se encuentre saturado, por ello contar con un adecuado sistema de drenaje es una de las medidas más eficientes para contrarrestar ese efecto.
 - Mejorar el drenaje: otra opción a la situación descrita en el párrafo anterior es el uso de la sub-base para elevar el pavimento en caso la napa freática se encuentre muy superficial. Además utilizar material uniformemente gradado para que conforme la capa, permitiría que el agua sea drenada rápidamente evitando la acumulación.
 - Reducir las consecuencias del congelamiento de los suelos: el limo es más susceptible al congelamiento que la arcilla por lo que habría que limitar el

- porcentaje existente en la sub-base. Para que se produzca congelamiento debe haber una fuente continua de agua, entonces si la napa freática se encuentra muy cercana a la sub-base se podría optar por deprimirla.
- Controlar los cambios de volumen de la subrasante y disminuir los efectos que tales cambios puedan producir en la superficie.
 - Aumentar un poco la capacidad portante del suelo de la subrasante.
 - Facilitar la construcción: la sub-base se puede usar como plataforma para el paso de los equipos pesados de construcción.
- Losa de concreto: sus funciones son similares a las de la carpeta asfáltica además de soportar y transmitir adecuadamente los esfuerzos provenientes de la superficie a las capas inferiores.

El principal criterio de diseño de un pavimento rígido considerado hasta hoy es el esfuerzo debido a la flexión. Los primeros diseños consideraban que el esfuerzo debido a cargas en las esquinas de la losa era el más crítico. No obstante, ahora es el esfuerzo en los extremos de la losa, debido a las cargas en el borde, el que se considera más crítico. Al igual que en los pavimentos flexibles, también en los rígidos se desarrollaron diversos métodos de análisis y diseño. Seguidamente se nombran algunos de ellos¹¹:

- Soluciones analíticas: son tres, la fórmula de Goldbeck, el análisis de Westergaard basado en fundaciones o cimientos líquidos y el análisis de Pickett basado en cimientos sólidos. La primera considera al pavimento como una viga con una cara concentrada en la esquina. La segunda asume que la presión reactiva entre la losa y la subrasante en un punto es proporcional a la deflexión en ese mismo punto, así como que la losa y la capa inferior se encuentran en contacto pleno. El método de la PCA se basa en este análisis. Por último, el análisis de Pickett desarrolló soluciones teóricas en las cuales las losas de concreto se desenvolvían en un medio-espacio elástico.
- Soluciones numéricas: en las soluciones analíticas se asumió que la losa y la capa adyacente se encontraban en contacto total pero en la realidad este hecho no se cumple. Por ende, se desarrollaron métodos de elementos discretos y de elementos finitos.

¹¹ Huang, Y. (2004) *Pavement analysis and design* (Segunda ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall. Pág. 6-8

Debido a que el comportamiento o la respuesta del pavimento no siempre se podrá predecir con total seguridad a partir de resultados teóricos fue necesario recopilar y cotejar con datos reales de desempeño. Es así como se reconoció lo siguiente:

- Fatiga del concreto: un esfuerzo de flexión repetido no causa necesariamente la ruptura del concreto siempre y cuando no se exceda el cincuenta por ciento del módulo de ruptura.
- Bombeo: con el incremento del tráfico en las carreteras, se hizo evidente el importante rol que desempeñaba el tipo de subrasante que existía bajo el pavimento para su funcionamiento. Es así como se determinó que el uso de material granular como base ayudaba a contrarrestar el bombeo.

En resumen el espesor y tipo de pavimento dependerá fundamentalmente de dos aspectos: las cargas y las solicitaciones climáticas a las que se verá sometido y al material que compone el suelo donde se va a asentar.

2.2. Datos necesarios para el diseño

Aunque algunas metodologías pueden variar entre sí, los siguientes factores son necesarios para el diseño del pavimento en la mayoría de ellas:

- 2.3.1. Estudios de tráfico
- 2.3.2. Estudios de mecánica de suelos
- 2.3.3. Estudios hidrológicos-pluviométricos
- 2.3.4. Estudios de canteras y fuentes de agua

2.2.1. Estudios de tráfico

Uno de los aspectos más importantes, si no el determinante para el diseño es determinar el flujo de vehículos; es decir, qué tipo de vehículos transitan por la zona a analizar, según la clasificación del Reglamento Nacional de Vehículos¹², y con qué frecuencia lo hacen.

Asimismo, una vez obtenida esta información es necesario estimar una tasa de crecimiento para proyectar cuál será el flujo de vehículos dentro de los años que contemplará el diseño.

Este flujo vehicular se expresa utilizando un parámetro conocido como ESAL (Equivalent Single Axle Load) o carga equivalente de eje simple, que considera un eje simple equivalente de 18 kips. Este valor representa el efecto dañino que producen los vehículos sobre el pavimento. O el valor del consumo de fatiga y el daño por erosión en el caso de la metodología de la PCA.

¹² Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2003) *Reglamento Nacional de Vehículos*. Lima: Perú

2.2.1.1. Clasificación de los vehículos

Según el Reglamento Nacional de Vehículos, estos se clasifican según la cantidad y el tipo de ejes que lo componen (simple, tándem o trídem), además del peso máximo permitido para cada uno de ellos. El peso bruto vehicular máximo permitido es de 48 toneladas. Asimismo, el máximo peso permitido por eje es:

- Eje simple: 7 ton de rueda simple y 11 ton de rueda doble.
- Eje tándem: 12, 16 y 18 ton.
- Eje trídem: 16, 23 y 25 ton.

Con esta clasificación se determina el tipo de vehículo que transita por la zona de acuerdo al tipo de ejes que lo conforman y a la cantidad de ellos. Esto es importante porque dependiendo del peso que cargue cada eje se le asignará un factor destructivo sobre la vía dependiendo del tipo de pavimento a utilizar.

2.2.1.2. Estimación de la tasa de crecimiento

Se requiere de datos históricos que ayuden a tener una idea de cómo va aumentando la cantidad de vehículos que transitan por esa carretera. Depende de las actividades de la zona, del crecimiento poblacional, etc.

2.2.1.3. Factores destructivos

Para hallar el número de ejes equivalentes que se presentan en el tramo, primero se debe uniformizar los tipos de vehículos que circulan bajo un mismo estándar. Dicho estándar está representado por el factor equivalente de carga por eje, teniendo como base los ejes de 18 kip u 80 kN. Este factor es el denominado factor destructivo.

Cada eje que conforma algún vehículo tiene un peso que puede ser igual o diferente a la carga estándar. Para el caso de nuestra Norma, todos son diferentes por lo que resulta necesaria la aplicación de factores.

Por otro lado, dependiendo del tipo de pavimento a utilizar, existen dos ecuaciones diferentes para estimar estos factores. Si el pavimento es flexible se utilizarán los valores proporcionados por el Instituto del Asfalto, en cambio si es rígido se utilizarán los de la AASHTO.

2.2.1.4. Proyección del tráfico

Una vez obtenidos el tránsito medio diario anual (AADT) de la zona, la tasa de crecimiento (r) y los factores de carga

equivalente para cada eje en cada vehículo, se procede a establecer los parámetros de diseño. Estos son:

- Factor de distribución direccional (D)
- Factor de distribución de carril (L)
- Período de diseño (Y)
- Factor de crecimiento (G)

2.2.2. Estudios de mecánica de suelos

Estos ensayos son necesarios para caracterizar el material granular que servirá como base o subbase. Asimismo, para hallar uno de los parámetros de diseño más importantes, el módulo de resiliencia de la subrasante, se puede realizar una correlación en base al CBR del terreno natural.

2.2.2.1. Ensayo de granulometría

Se realizará ensayos de granulometría tanto en el material del terreno natural o subrasante, así como en el material de las canteras que será utilizado como base o subbase. De acuerdo a las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras (EG-2000) del MTC¹³ se debe cumplir con una granulometría específica para que el agregado sea considerado aceptable. Más adelante se detallará más sobre estos requisitos.

2.2.2.2. Límites de Atterberg

Permite conocer las propiedades del material tales como su límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en el caso de suelos cohesivos.

2.2.2.3. Ensayo de compactación Proctor modificado (Método C)

Se realiza el ensayo Proctor modificado por el método C, que aplica 56 golpes por capa de suelo (5 capas) a una muestra dentro de un molde de tamaño estándar. El objetivo del ensayo es determinar la máxima densidad seca a la que puede llegar el material y el contenido de humedad óptimo que permita aquella condición. Este ensayo se encuentra normado en la Norma MTC E 115.

2.2.2.4. Ensayo de valor de soporte de California o CBR

Este ensayo compara el comportamiento de un suelo determinado con el de una roca chancada de calidad estándar. Se aplica carga sobre la muestra compactada previamente mediante el ensayo Proctor, así como saturada en agua por 4 días y se va registrando la carga necesaria para producir penetración en el material en intervalos de 0.1" hasta 0.5". Una

¹³ Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000). *Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras EG-2000* (Segunda edic.) Lima: Perú.

vez obtenido el valor de carga necesaria para producir 0.1" y 0.2" para todas las muestras compactadas a diferentes densidades, se procede a dividirlo entre 1000 psi en el primer caso y 1500 psi en el segundo. Esta cantidad se expresa en porcentaje y representa el CBR del suelo. Luego para la densidad requerida se elige el mayor valor de CBR entre el de 0.1" y el de 0.2", el cual será el CBR de diseño. En este caso la máxima densidad seca requerida es 95%. Este ensayo se encuentra normado en la Norma MTC E 132.

2.2.3. Estudios hidrológicos-pluviométricos

La información necesaria es la precipitación media diaria de la estación seleccionada registrada todos los días durante varios años para poder tener un registro confiable.

Estos datos son importantes para determinar el coeficiente de drenaje (Cd) necesario en la metodología de la AASHTO para pavimentos rígidos o para hallar el valor de m_i que modifica los coeficientes estructurales de las capas en los pavimentos flexibles.

Asimismo, se puede obtener la temperatura promedio del aire durante el año. Esta sería el parámetro del Mean Annual Air Temperature (MAAT) requerido para elegir el gráfico correspondiente y hallar el espesor de la carpeta asfáltica en la metodología del Instituto del Asfalto.

2.2.4. Estudios de canteras y fuentes de agua

Otro aspecto a tomar en cuenta es el tipo de material que se encuentra disponible en la zona porque de ello dependerá la capacidad de soporte de las capas granulares y, por tanto, del pavimento como estructura.

Las especificaciones que debe cumplir el material granular son muchas pero dos de las más importantes son la granulometría y el CBR mínimo.

En cuanto a las fuentes de agua, se debe tener en consideración la cantidad de sulfatos, sólidos en suspensión y el pH del agua.

3. ESTUDIO DE TRÁFICO

El estudio de tráfico se basa en los datos históricos de los tramos de la carretera desde Ancón hasta Huacho, registrados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

3.1. Características del tramo de estudio

Esta carretera se caracteriza por ser interprovincial ya que conecta toda la costa peruana.

Asimismo, transitan una gran variedad y cantidad de vehículos livianos y pesados, desde camiones hasta traylers con insumos y maquinaria pesada para las minas del norte.

3.2. Índice medio diario anual

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones recopila los datos de índice medio diario anual (IMDa), por tipo de vehículo, de los tramos viales del país. Se tienen los datos correspondientes al año 2010, los cuales se presentan en el Anexo. A continuación, se muestra la tabla resumen de la cantidad y tipo de vehículos de acuerdo al Reglamento Nacional de Vehículos:

Configuración vehicular	Cantidad de vehículos
Automóviles	5,033
C2	609
T2S1	23
T2S2	20
T2S3	30
T3S1	70
T3Se2	3
C2R2	5
C2R3	15
C3R2	70
C3R3	58
C3	289
C4	58
T3S2	70
T3S3	970
B2	609
B3-1	770
TOTAL	8,702

Tabla 3.1 Conteo volumétrico del tráfico

Elaboración propia. Basado en el Índice Medio Diario Anual, por tipo de vehículos, según tramos viales: 2010. Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Estadísticas de Transporte Carretero 2010, Portal web del MTC (<http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/index.html>)

Distribución del volumen de tránsito

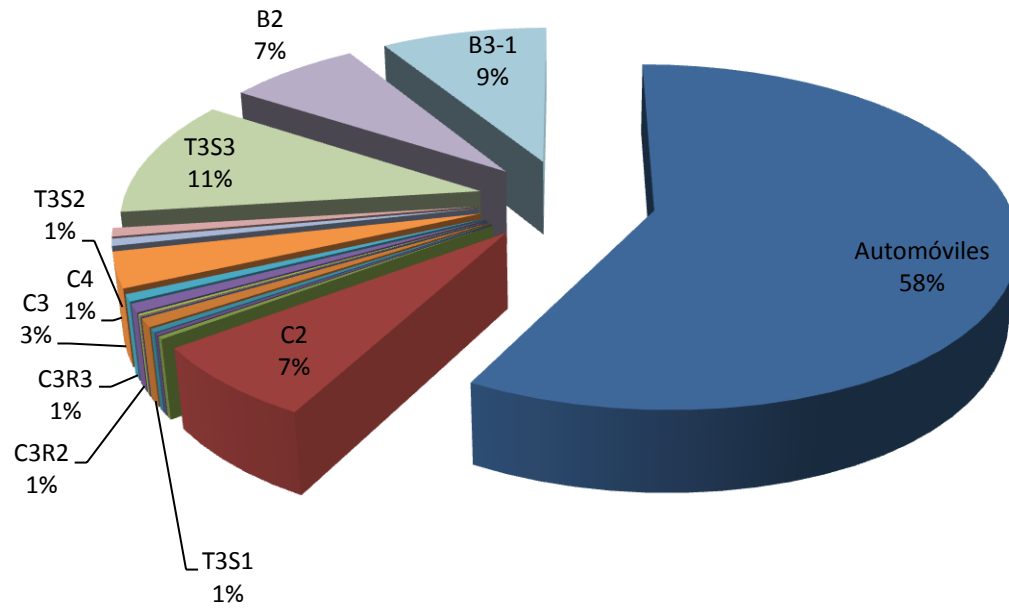


Gráfico 3.1 Distribución del volumen de tránsito

Del gráfico se observa que la mayor cantidad de vehículos que transitan por la zona son automóviles, seguidos por los semitrailers T3S3 y luego por buses de transporte público. El porcentaje de camiones simples C2 también es significativo.

3.3. Estimación del tránsito futuro

Se toma de base los datos históricos obtenidos del estudio de tráfico realizado para esta carretera y los resultados para la tasa de crecimiento anual son:

Año	IMDA	Tasa de crecimiento anual
1985	1,650	1.4
1986	1,588	-3.8
1987	1,722	8.4
1988	1,856	7.8
1989	1,989	7.2
1990	2,123	6.7
1991	2,257	6.3
1992	2,391	5.9
1993	2,524	5.6
1994	2,658	5.3
1995	2,792	5.0
PROMEDIO		5.1

Tabla 3.2 Tasa de crecimiento anual del tramo Chancay – Santa Rosa

Fuente: Serie histórica proporcionada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones para el estudio de tráfico de esta carretera

Se observa en la Tabla 3.2 que el promedio de la tasa de crecimiento de esos 10 años es 5.1%, además este valor representa el escenario más desfavorable en el tramo y contempla los vehículos pesados y buses que transitan por la zona.

3.4. Factor de carga equivalente

Como ya se ha mencionado anteriormente, existe la necesidad de homologar el efecto que tendrán los diferentes tipos de vehículos sobre el pavimento. Es por ello que se determina un factor de carga equivalente por eje o Equivalent Axle Load Factor (EALF) por sus siglas en inglés. Este factor define el daño producido en el pavimento por el paso del eje en cuestión relativo al daño producido por un eje estándar, usualmente el de 18 kip u 80 kN¹⁴.

También es importante recalcar que los ejes simples, tándem y trídem no producen el mismo daño sobre la estructura por lo que sus factores son distintos.

Asimismo, la guía del AASHTO establece estos factores en base a ecuaciones que tienen como parámetros el peso del eje, el tipo de eje, el nivel de serviciabilidad final y el número estructural del pavimento para el tipo flexible. Para el pavimento rígido los parámetros son también el peso y el tipo de eje así como un espesor estimado de la capa de concreto.

Tomando en consideración el conteo de vehículos mostrado anteriormente se estima que el número de ejes equivalentes será mayor de $3.0E+07$; por lo tanto, el nivel de serviciabilidad final recomendado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones es 3 para un pavimento que debe soportar ese tráfico. Asimismo, se utiliza un valor de número estructural de 5 como lo sugiere la AASHTO¹⁵.

Para el pavimento flexible se obtienen los siguientes factores de carga equivalente con las consideraciones ya mencionadas:

Tipo de eje	Carga por eje (ton)	Carga por eje (kips)	EALF
Simple	1	2.2	0.0004
Simple	7	15.4	0.577
Simple	7+7	2(15.4)	1.154
Dual	11	24.2	2.691
Tándem	16	35.3	1.285
Tándem	18	39.7	1.929
Trídem	23	50.7	1.327
Trídem	25	55.1	1.782

Tabla 3.3 Factores de equivalencia de carga según el AASHTO para pavimentos flexibles con nivel de serviciabilidad final de 3 y número estructural igual a 5.

Fuente: AASHTO (1993) Tablas D7, D8 y D9. Anexo D

¹⁴ Huang, Y. (2004) *Pavement analysis and design* (Segunda ed.) New Jersey: Pearson Prentice Hall. Pág. 257

¹⁵ American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington D.C. Pág: D-2

En el caso del pavimento rígido, también se asume un número de ejes equivalentes mayor a 3.0E+07 y consecuentemente un nivel de serviciabilidad final de 3. Se estima un espesor de losa de 28 cm.

Así los factores obtenidos para el pavimento rígido son:

Tipo de eje	Carga por eje (ton)	Carga por eje (kips)	EALF
Simple	1	2.2	0.0004
Simple	7	15.4	0.525
Simple	7+7	2(15.4)	1.050
Dual	11	24.2	3.523
Tándem	16	35.3	2.293
Tándem	18	39.7	3.769
Trídem	23	50.7	3.223
Trídem	25	55.1	4.558

Tabla 3.4 Factores de equivalencia de carga según el AASHTO para pavimentos rígidos con nivel de serviciabilidad final de 3 y espesor de losa de 28 cm

Fuente: AASHTO (1993) Tablas D16, D17 v D18. Anexo D

Una vez determinados los factores de equivalencia de carga, se debe calcular los factores destructivos de cada tipo de vehículo.

3.5. Factores de equivalencia

El factor de equivalencia o Load Equivalency Factor (LEF) se obtiene de la sumatoria de los EALF de los ejes que componen cada automóvil, camión, semitrayler o trayler:

Tipo de vehículo	Cargas (ton)				EALF				Factor de equivalencia (LEF)
	Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje	Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje	
Autos	1	1			0.000	0.000			0.001
C2	7	11			0.577	2.691			3.268
T2S1	7	11	11		0.577	2.691	2.691		5.959
T2S2	7	11	18		0.577	2.691	1.929		5.197
T2S3	7	11	25		0.577	2.691	1.782		5.050
T3S1	7	11	11	18	0.577	2.691	2.691	1.929	7.888
T3Se2	7	18	11	11	0.577	1.929	2.691	2.691	7.888
C2R2	7	11	11	11	0.577	2.691	2.691	2.691	8.650
C2R3	7	11	11	18	0.577	2.691	2.691	1.929	7.888
C3R2	7	18	11	11	0.577	1.929	2.691	2.691	7.888
C3R3	7	18	11	18	0.577	1.929	2.691	1.929	7.126
C3	7	18			0.577	1.929			2.506
									Continúa

Tipo de vehículo	Cargas (ton)				EALF				Factor de equivalencia (LEF)
	Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje	Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje	
C4	7	23			0.577	1.327			1.904
T3S2	7	18	18		0.577	1.929	1.929		4.435
T3S3	7	18	25		0.577	1.929	1.782		4.288
B2	7	11			0.577	2.691			3.268
B3-1	7	16			0.577	1.285			1.862

Tabla 3.5 Pesos reglamentarios por eje de los vehículos que transitan por la zona y factores destructivos de cada vehículo considerando pavimento flexible

Fuente: Realmento Nacional de Vehículos - MTC

Tipo de vehículo	Cargas (ton)				EALF				Factor de equivalencia (LEF)
	Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje	Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje	
Autos	1	1			0.000	0.000			0.001
C2	7	11			0.525	3.523			4.049
T2S1	7	11	11		0.525	3.523	3.523		7.572
T2S2	7	11	18		0.525	3.523	3.769		7.817
T2S3	7	11	25		0.525	3.523	4.558		8.607
T3S1	7	11	11	18	0.525	3.523	3.523	3.769	11.341
T3Se2	7	18	11	11	0.525	3.769	3.523	3.523	11.341
C2R2	7	11	11	11	0.525	3.523	3.523	3.523	11.095
C2R3	7	11	11	18	0.525	3.523	3.523	3.769	11.341
C3R2	7	18	11	11	0.525	3.769	3.523	3.523	11.341
C3R3	7	18	11	18	0.525	3.769	3.523	3.769	11.586
C3	7	18			0.525	3.769			4.294
C4	7	23			0.525	3.223			3.749
T3S2	7	18	18		0.525	3.769	3.769		8.063
T3S3	7	18	25		0.525	3.769	4.558		8.852
B2	7	11			0.525	3.523			4.049
B3-1	7	16			0.525	2.293			2.819

Tabla 3.6 Pesos reglamentarios por eje de los vehículos que transitan por la zona y factores destructivos de cada vehículo considerando pavimento rígido

Fuente: Realmento Nacional de Vehículos - MTC

3.6. Proyección del IMDa

Para estimar el crecimiento del tránsito durante el período de diseño, se utiliza el modelo exponencial propuesto en el Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos¹⁶ del MTC. Este se presenta a continuación:

¹⁶ Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. (http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4515.pdf). Lima: Perú.

$$T_n = T_o(1 + i)^{n-1}$$

Donde:

- T_n : Tránsito proyectado al año n en veh/día
- T_o : Tránsito actual o del año base en veh/día
- n : Años del período de diseño
- i : Tasa anual de crecimiento.

Con la cantidad de vehículos del año base (2010) y la tasa de crecimiento calculada en la sección anterior (5.1%), se obtienen los siguientes resultados:

n (años)	Vehículos/día
5	11,159
10	14,310
15	18,351
20	23,533

Tabla 3.7 Proyección del IMDa en los próximos 20 años

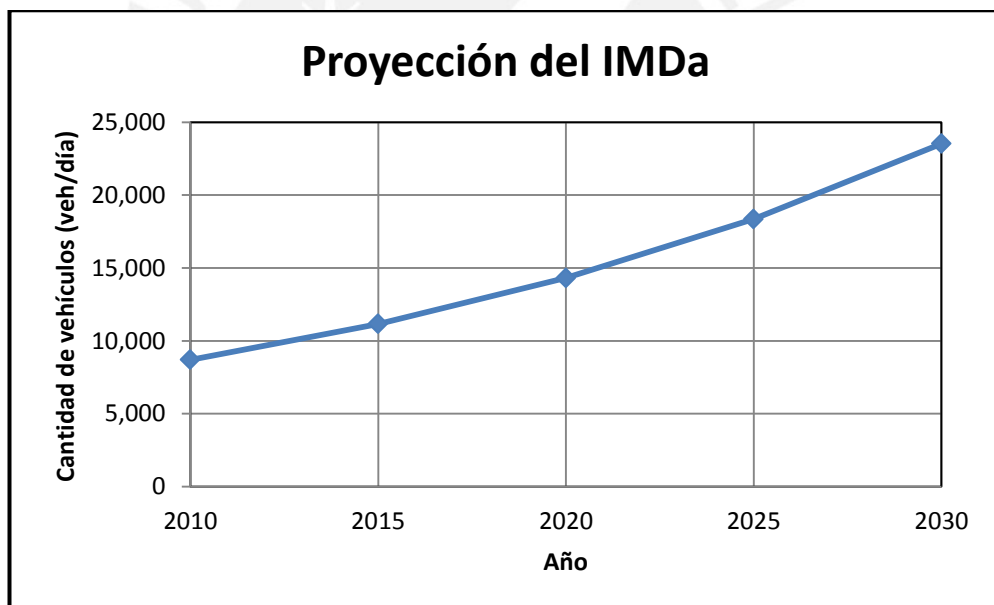


Gráfico 3.2 Proyección del IMDa en los próximos 20 años

3.7. Tránsito de diseño

Una vez obtenidos todos los datos anteriores, se procede a calcular el número de ejes equivalentes o Equivalent Single Axle Load (ESAL) para los dos casos (flexible y rígido). Para esto se necesita el tráfico medio diario o Average Daily Traffic (ADT) el cual se obtiene del conteo vehicular y los factores EALF. Además son necesarios otros parámetros:

- Factor de distribución direccional (D)

- Factor de distribución de carril (L)
- Período de diseño (Y)
- Factor de crecimiento (G)
- Porcentaje de camiones en el ADT (T)
- Número aplicaciones de carga de ejes de 18 kip por camión (T_f)

El ADT_o se obtiene de la sumatoria de la multiplicación del número de repeticiones de un vehículo por su factor destructivo para todos los que transitan por la vía.

El factor de distribución direccional depende como su nombre lo indica de la cantidad de sentidos que tendrá la vía a diseñar. En este caso como son dos sentidos se considera 0.5.

El factor de distribución de carril depende de la cantidad de carriles que haya en cada sentido ya que los vehículos se reparten entre ellos. Para el caso de dos carriles según la Tabla 6.16 de la AASHTO, L vale 80%.

El período de diseño se considera de 15 años al tratarse de una carretera importante y construida para el Estado.

La AASHTO recomienda el uso de un factor total de crecimiento que es equivalente al producto del factor de crecimiento por el período de diseño y se calcula con ayuda de la siguiente fórmula:

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

Donde:

r = la tasa de crecimiento en porcentaje.

Y = período de diseño en años.

Por último, como se contaba con el conteo real de los vehículos no es necesario estimar el porcentaje de camiones con lo que T y T_f tienen el valor de 1.

Los parámetros para el pavimento flexible son:

Parámetro	Valor
ADT _o	12,819
T=	1
T _f =	1
D=	0.5
L=	0.8
Y=	15 años
r=	0.051
GY=	21.742

Tabla 3.8 Parámetros de diseño para el pavimento flexible

Para el pavimento rígido se tienen los siguientes valores finales:

Parámetro	Valor
ADT _o	20,823
T=	1
T _f =	1
D=	0.5
L=	0.8
Y=	15 años
r=	0.051
GY=	21.742

Tabla 3.9 Parámetros de diseño para el pavimento rígido

La fórmula propuesta por la AASHTO para calcular el número de ejes equivalentes es la siguiente:

$$ESAL = (ADT_o)(T)(T_f)(GY)(D)(L)(365)$$

Con lo cual se obtiene un número de ejes equivalentes (ESAL) final para cada tipo de pavimento de:

Tipo de pavimento	ESAL
Flexible	4.1E+07
Rígido	6.6E+07

Tabla 3.10 Número de ejes equivalentes para ambos tipos de pavimento

Para hacer una comparación se calcularon el número de ejes equivalentes para diversos períodos de diseño. Sólo se varió el número de años en la fórmula de GY. Con esto se obtuvo:

ESAL para diversos períodos de diseño

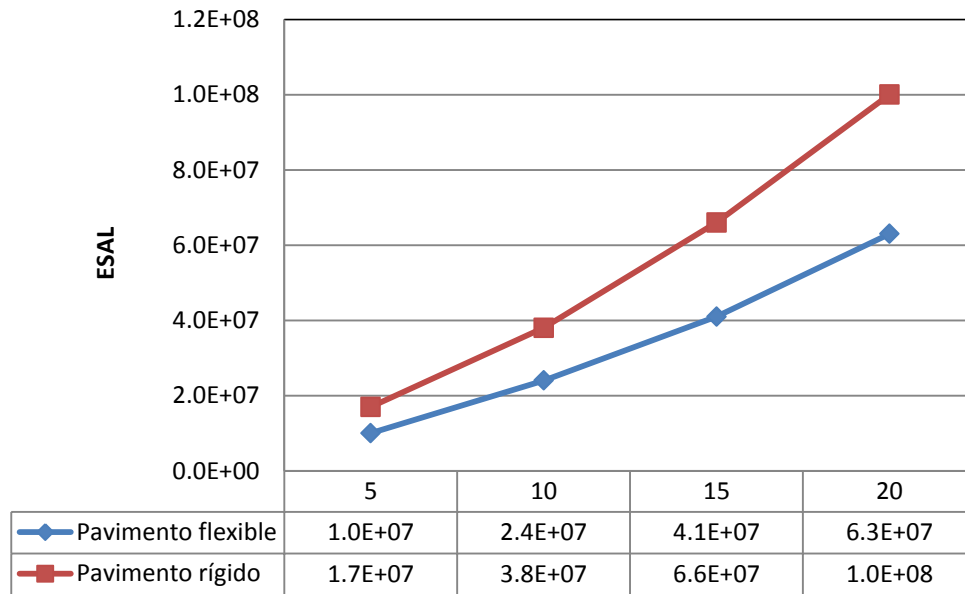


Gráfico 3.3. Número de ejes equivalentes para diferentes períodos de diseño

3.8. Conclusiones

- La distribución de vehículos en el IMDa muestra que la mayoría son vehículos livianos. Sin embargo, los vehículos pesados, en especial semitrailers y buses de transporte público, también conforman un porcentaje representativo del tránsito que circula por la zona.
- La tasa de crecimiento anual de tráfico obtenida de los datos de 10 años (1985 a 1995) dan como resultado un promedio de 5.1%, el cual es utilizado para la estimación del tránsito futuro.
- De la proyección del IMDa se observa que a cabo de 10 años el tránsito se incrementará en un 50% respecto al año base, a los 15 años se duplicará y a los 20 será más de 2.5 veces el tráfico inicial.
- Para determinar los factores de carga equivalente por eje (EALF) se utilizó la metodología de la AASHTO asumiendo valores iniciales recomendados por la misma guía.
- Se observa que los EALF para pavimento rígido son menores que para flexible cuando la carga por eje no es tan grande, mientras que ocurre lo inverso conforme la carga aumenta.
- Considerando los factores de diseño anotados anteriormente, el número de ejes equivalentes para el pavimento flexible es 4.1E+07.
- Para el pavimento rígido el ESAL calculado es 6.6E+07.

- Se observa que el número de ejes equivalentes siempre es mayor para el pavimento rígido que para el flexible.
- Según el Manual de diseño geométrico para carreteras¹⁷ (DG-2001), como en este tramo circulan más de 4,000 vehículos al día y existe control de los accesos proporcionando un flujo vehicular continuo, esta carretera es considerada una autopista.



¹⁷ Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2001). *Manual de diseño geométrico para carreteras (DG-2001)*. Lima. Pág: 27.

4. ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

El pavimento se apoya sobre la subrasante, por lo cual sus características son importantes datos de entrada para efectuar el diseño.

Los datos proporcionados para esta tesis incluyen las características del suelo, el ensayo Proctor Modificado Método “A” y el ensayo de CBR. Los resultados de los ensayos de laboratorio son los siguientes:

4.1. Resumen de las características de los suelos

Los datos obtenidos del ensayo de clasificación de la subrasante (Resultado de ensayo 4.1) fueron los siguientes:

- Límite líquido: 31
- Límite plástico: 19
- Índice de plasticidad: 12
- Porcentaje que pasa la malla N° 200: 83.8%

En cuanto a los resultados de compactación del suelo (Resultado de ensayo 4.2), estos fueron:

- Densidad seca máxima: 1.92 g/cm³
- Humedad óptima: 12.6%

El ensayo de CBR (Resultado de ensayo 4.4) arrojó un resultado de 7%.

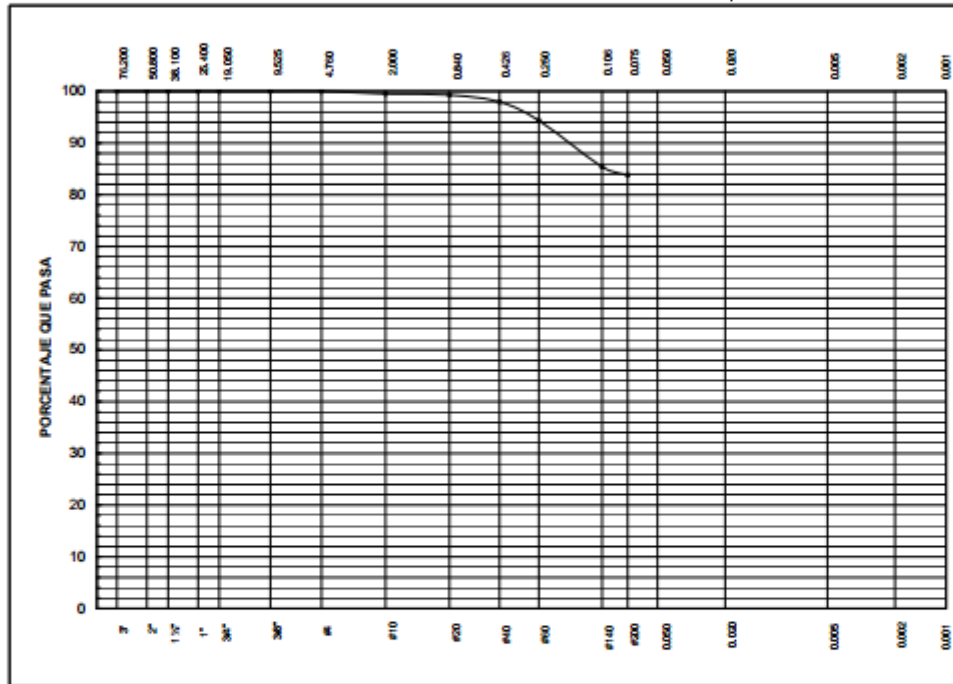
DEPARTAMENTO
DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



PUCP

ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN
NTP 339.127, 339.128, 339.129, 339.131

Solicitante : <u>Kimiko Rengifo Arakaki</u>	Expediente
Proyecto : <u>Diseño de los pavimentos de un tramo de la carretera</u>	
Muestra : <u>Subrasante</u>	Profundidad: <u>0.60-0.90 m</u> Fecha : <u>27-Nov-2012</u>



Tamiz ASTM	Porcentaje que pasa	Diámetro en mm	Porcentaje que pasa	LL = 31	LP = 19	IP = 12	CLASIFICACIÓN
3"	100.0	-----	-----	-----	-----	-----	SUCS CL
2"	100.0	-----	-----	-----	-----	-----	AASHTO A-6(9)
1 1/2"	100.0	-----	-----	-----	-----	-----	
1"	100.0	-----	-----	-----	-----	-----	
3/4"	100.0	-----	-----	-----	-----	-----	
3/8"	100.0	-----	-----	-----	-----	-----	
#4	100.0	-----	-----	-----	-----	-----	
#10	99.5	-----	-----	-----	-----	-----	
#20	99.3	-----	-----	-----	-----	-----	
#40	97.9	-----	-----	-----	-----	-----	
#60	94.3	-----	-----	-----	-----	-----	
#140	85.4	-----	-----	-----	-----	-----	
#200	83.8	-----	-----	-----	-----	-----	

MANUEL A. OLCESE FRANZERO
Ingeniero Civil CIP 12969
Jefe del Laboratorio

00/GM/1 de 1

Resultado de ensayo 4.1 Análisis granulométrico de la subrasante

DEPARTAMENTO
DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

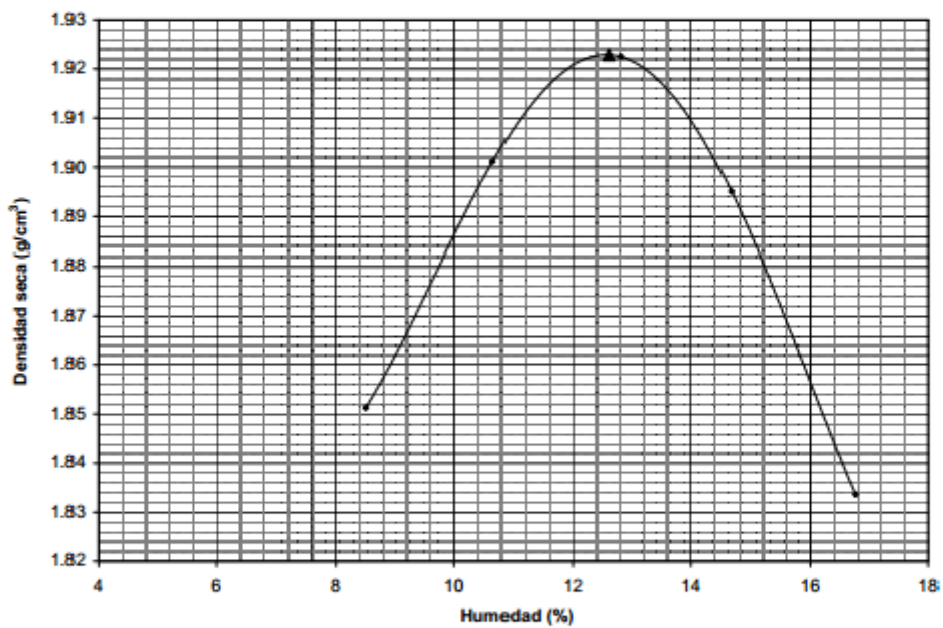


PUCP

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO MÉTODO 'A'
NTP 339.141

Solicitante : Kimiko Rengifo Arakaki	Expediente :
Proyecto : Diseño de los pavimentos de un tramo de la carretera	Fecha : 27-Nov-2012
Muestra : Subrasante	Profundidad: 0.60-0.90 m

Máxima densidad seca :	1.92 g/cm³
Humedad óptima :	12.6 %



Pto.	ω (%)	γ_d (g/cm ³)
1	8.5	1.85
2	10.7	1.90
3	12.8	1.92
4	14.7	1.90
5	16.8	1.83

MANUEL A. OLCESE FRANZERO
Ingeniero Civil CIP 12969
Jefe del Laboratorio

//Ptm/1 de 1

Av. Universitaria 1801, San Miguel, Teléfono 626 2000 Anexo 4651. Fax 626 2837. Internet: suelos@pucp.edu.pe

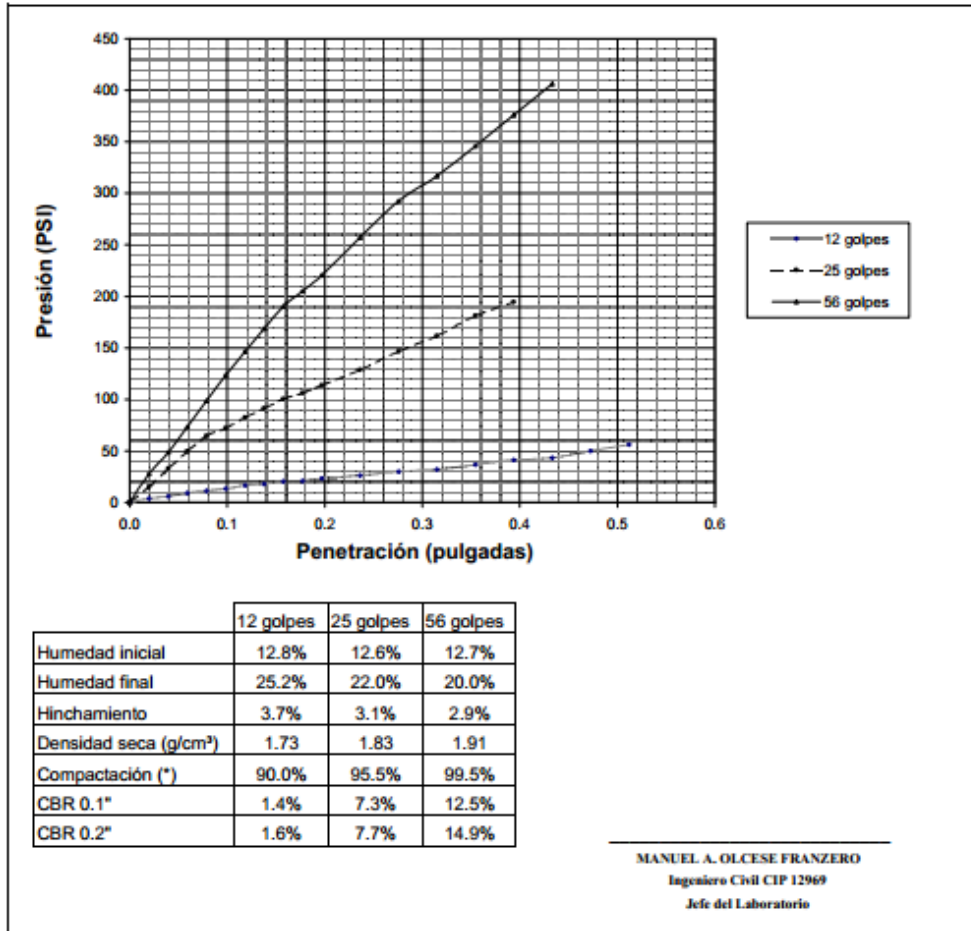
Resultado de ensayo 4.2 Ensayo de Proctor modificado Método "A"

DEPARTAMENTO
DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



**ENSAYO C.B.R.
NTP 339.145**

Solicitante : <u>Kimiko Rengifo Arakaki</u>	Expediente :
Proyecto : <u>Diseño de los pavimentos de un tramo de la carretera</u>	
Muestra : <u>Subrasante</u>	Profundidad: 0.60-0.90 m Fecha : 27-Nov-2012



	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Humedad inicial	12.8%	12.6%	12.7%
Humedad final	25.2%	22.0%	20.0%
Hinchamiento	3.7%	3.1%	2.9%
Densidad seca (g/cm³)	1.73	1.83	1.91
Compactación (*)	90.0%	95.5%	99.5%
CBR 0.1"	1.4%	7.3%	12.5%
CBR 0.2"	1.6%	7.7%	14.9%

MANUEL A. OLCESE FRANZERO
Ingeniero Civil CIP 12969
Jefe del Laboratorio

(*) Porcentaje respecto a la máxima densidad seca 1.92 g/cm³, en el ensayo de compactación PROCTOR MODIFICADO método 'A' (Humedad óptima = 12.6%) efectuado como parte del presente expediente.

0/3/CBR/1 de 2

Av. Universitaria 1801, San Miguel. Teléfono 626 2000 Anexo 4651. Fax 626 2837. Internet: suelos@pucp.edu.pe

Resultado de ensayo 4.3 Ensayo CBR parte 1

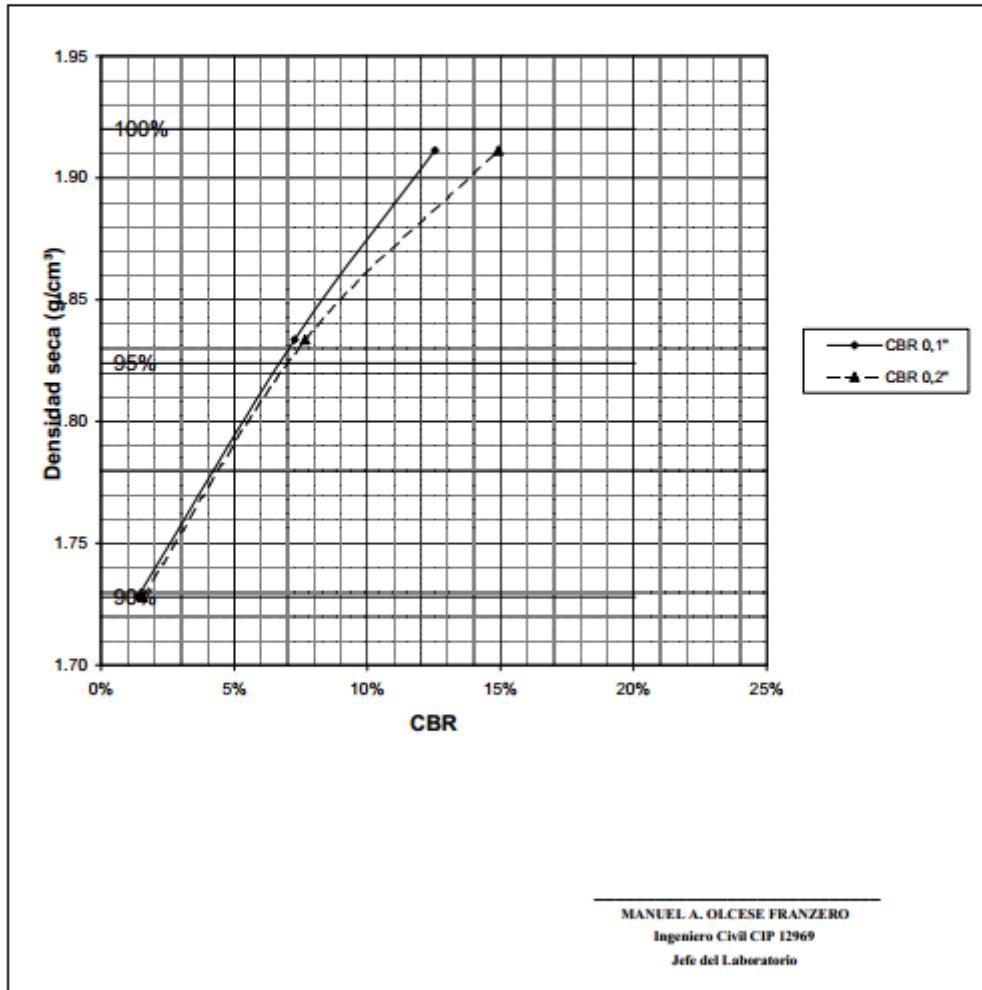
DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



PUCP

**ENSAYO C.B.R.
NTP 339.145**

Solicitante : <u>Kimiko Rengifo Arakaki</u>	Expediente :
Proyecto : <u>Diseño de los pavimentos de un tramo de la carretera</u>	
Muestra : <u>Subrasante</u>	Profundidad: <u>0.60-0.90 m</u> Fecha : <u>27-Nov-2012</u>



B/CBR/2 de 2

Av. Universitaria 1801, San Miguel, Teléfono 626 2000 Anexo 4651. Fax 626 2837. Internet: suelos@pucp.edu.pe

Resultado de ensayo 4.4 Ensayo CBR parte 2

4.2. Ensayo granulométrico y clasificación del suelo

La granulometría del suelo de la subrasante fue la siguiente:

Tamiz ASTM	Porcentaje que pasa
3"	100
2"	100
1 ½"	100
1"	100
¾"	100
⅜"	100
#4	100
#10	99.5
#20	99.3
#40	97.9
#60	94.3
#140	85.4
#200	83.8

Tabla 4.1 Granulometría de la muestra de subrasante

Utilizando la metodología del SUCS se tiene que si el porcentaje de material que pasa la malla N°200 es mayor al 50%, entonces el suelo es de grano fino. En este caso es casi 84% por lo que se cumple esta condición.

Asimismo, los límites líquido y plástico dividen los suelos finos en: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos o arcillas orgánicas. Por otro lado, si el límite líquido del suelo es menor a 50 entonces el suelo es considerando de baja plasticidad y se añade la letra L. Esto también ocurre en este caso; por lo tanto, el suelo de la subrasante es una arcilla de baja plasticidad CL según la clasificación SUCS. Según la clasificación AASHTO, este suelo es A-6(9).

4.3. Ensayo de compactación Proctor Modificado

Se realiza el ensayo Proctor modificado por el método C, que aplica 56 golpes por capa de suelo (5 capas) a una muestra dentro de un molde de tamaño estándar. El objetivo del ensayo es determinar la máxima densidad seca a la que puede llegar el material y el contenido de humedad óptimo que permita aquella condición. Este ensayo se encuentra normado en la Norma MTC E 115.

La muestra ensayada dio como resultado una máxima densidad seca de 1.92 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad de 12.6%.

4.4. CBR al 95% del terreno

El CBR o valor de soporte de California se halla mediante el ensayo MTC E 132. El objetivo de este ensayo es medir la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón de 3 plg² de área en una muestra de suelo de 6" de diámetro y 5" de altura, a una velocidad de 1.27mm/min. La fuerza requerida para que el pistón penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración. Estas fuerzas se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en una muestra de suelo patrón, el cual es piedra chancada bien graduada.

El CBR es la división entre la fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5 mm en el suelo entre la misma fuerza para la muestra patrón.

En este caso los resultados obtenidos en el Resultado de Ensayo 4.4 se observa que el mayor valor de CBR_{0.2"} es 7.7%, tomando el mayor entre el CBR_{0.1"} y CBR_{0.2"}.

4.5. Conclusiones

- El suelo de la subrasante es una arcilla de baja plasticidad, CL o A-6(9).
- La máxima densidad seca a la que llega este suelo es 1.92 g/cm³ a una humedad de 12.6%.
- El valor de CBR de diseño que se utilizará en el presente documento para efectos del diseño es 7% ya que se debe redondear hacia el número inferior, de lo contrario se le estaría otorgando una mejor capacidad al suelo de la que realmente tiene.

5. ESTUDIOS PLUVIOMÉTRICOS

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) proporciona los datos de precipitación media diaria de diversas estaciones ubicadas en diversas zonas del país. Los valores de las precipitaciones son tomados a las 7 de la mañana y a las 7 de la noche. Asimismo, se registran las temperaturas máximas y mínimas todos los días.

Además se encuentra publicado el mapa de clasificación climática del Perú del cual se puede determinar el clima típico de la zona de estudio.

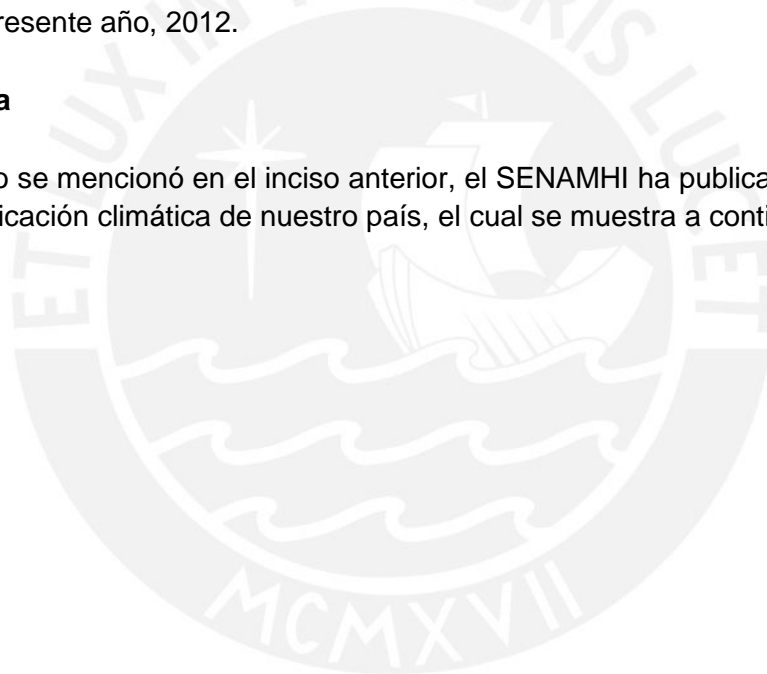
5.1. Estación

La estación que se eligió según el temario de tesis es la ubicada en las Lomas de Lachay. Esta se ubica en la provincia de Huaura, distrito de Huacho, a una latitud de $11^{\circ}22'1''$, longitud de $77^{\circ}22'1''$, a una altitud de 300 m.s.n.m.

Dicha estación cuenta con datos históricos desde el año 2007 hasta setiembre del presente año, 2012.

5.2. Clima

Como se mencionó en el inciso anterior, el SENAMHI ha publicado el mapa de clasificación climática de nuestro país, el cual se muestra a continuación:



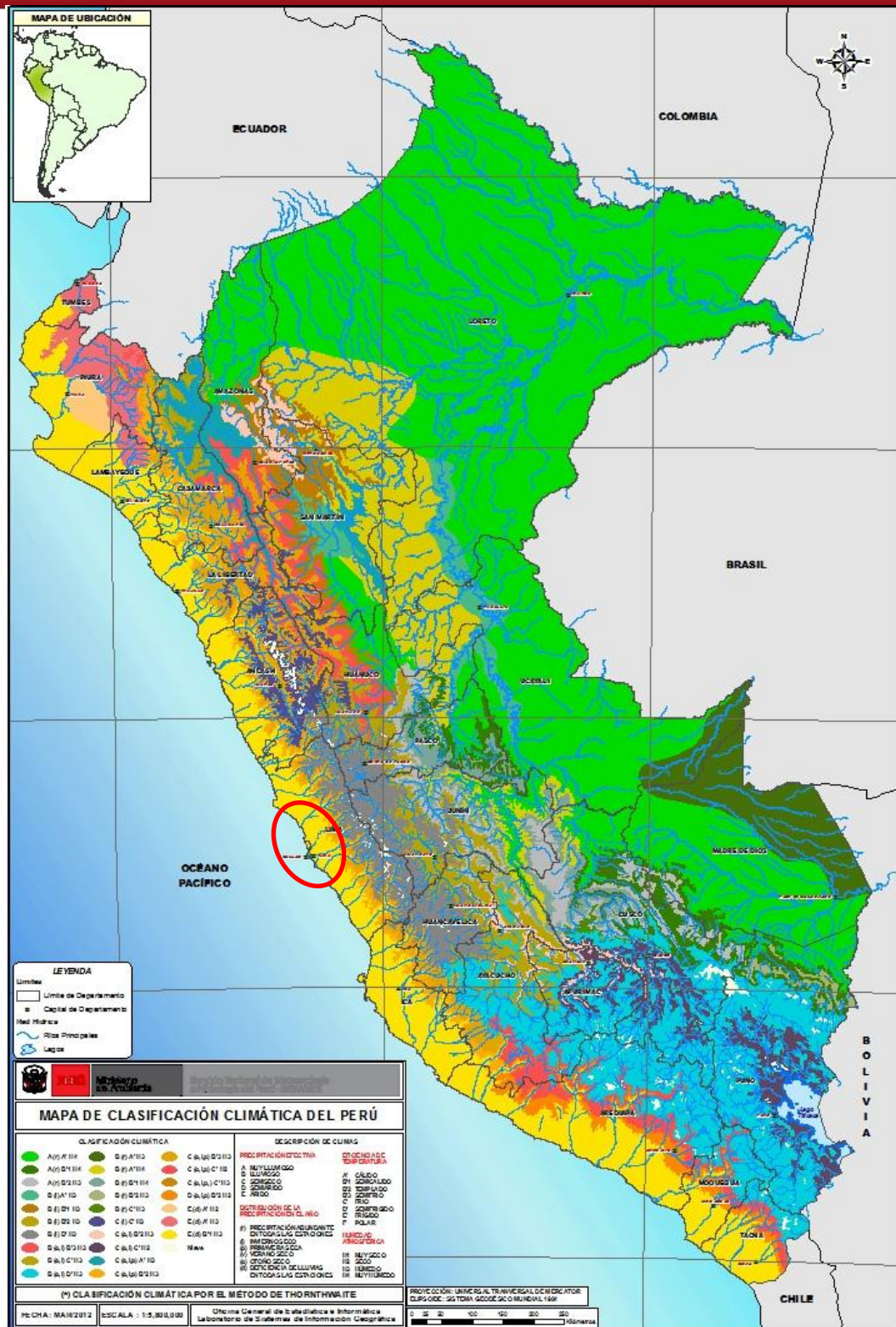


Figura 5.1 Mapa de clasificación climática del Perú.
Fuente: Portal web del SENAMHI

El lugar en el que se encuentra el tramo de esta tesis se ubica entre las ciudades de Huacho y Pativilca, en la Costa central del país. En el mapa anterior el sitio se encuentra encerrado en un círculo y pertenece a la zona

E(d) B'1 H3 a la cual le corresponde un clima árido, semicálido y húmedo con deficiencia de lluvias.

Asimismo, en dicho sector se registran temperaturas máximas entre 24 y 28°C. En cuanto a las temperaturas mínimas, según el mapa del SENAMHI estas se encuentran en el rango entre 8 y 12°C.

Con estos valores y los datos de la estación de las Lomas se puede estimar una temperatura del aire promedio anual de entre 16 y 18°C.

5.3. Cantidad de días lluviosos al mes y precipitaciones promedio anuales

Con los datos proporcionados por el SENAMHI de las precipitaciones medias diarias se determina los días de lluvia por mes, así como el promedio de precipitaciones mensuales y anuales. Los resultados se muestran a continuación:

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007									30	24	16	7
2008	2	0	1	0	13	26	9	29	28	21	15	5
2009	6	3	4	3	6	20	27	28	27	26	19	17
2010	19	4	4	2	21	27	31	31	28	25	10	8
2011	2	1	1	1	18	23	0	31	29	18	12	2
2012	0	1	5	0	14	0	18	30	30			
Promedio	5.8	1.8	3.0	1.2	14.4	19.2	17.0	29.8	28.7	22.8	14.4	7.8

Tabla 5.1 Días de lluvia por mes

*Elaboración propia, basado en los datos históricos del portal web del SENAMHI
http://www.senamhi.gob.pe/include_mapas/_dat_esta_tipo.php?estaciones=000534*

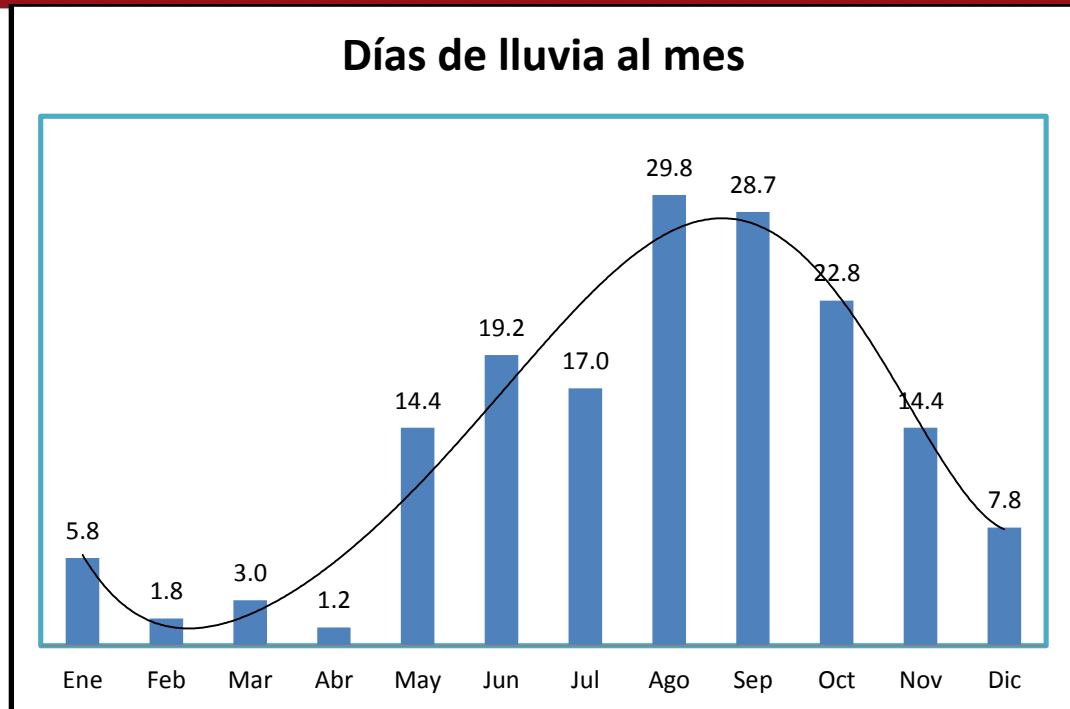


Gráfico 5.1 Promedio de días lluviosos por mes

El Gráfico 5.1 muestra que en promedio los meses con más días de lluvia son agosto, septiembre y octubre. Los meses con menos precipitaciones son los que corresponden al período de verano, de enero a abril.

Año	Mes												Total (mm)
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
2007									0.9	0.4	0.5	0.6	2.4
2008	1.8	0.0	0.8	0.0	0.5	1.8	1.0	2.2	1.5	0.9	0.4	0.7	11.5
2009	0.7	0.8	1.3	0.6	0.4	1.0	1.6	1.1	1.5	0.8	0.9	1.2	11.8
2010	1.7	0.5	0.3	0.1	0.8	0.9	0.7	0.5	0.6	0.7	0.2	0.2	7.2
2011	0.1	0.5	0.3	0.1	0.4	1.1	0.0	2.0	1.0	0.7	0.3	0.2	6.6
2012	0.0	5.1	0.2	0.0	0.8	0.0	1.3	1.9	1.0				10.2
Promedio	0.8	1.4	0.6	0.2	0.6	1.0	0.9	1.5	1.1	0.7	0.5	0.6	

Tabla 5.2 Precipitaciones medias mensuales y anuales

Elaboración propia, basado en los datos históricos del portal web del SENAMHI
http://www.senamhi.gob.pe/include_mapas/_dat_esta_tipo.php?estaciones=000534

Precipitaciones mensuales (mm)

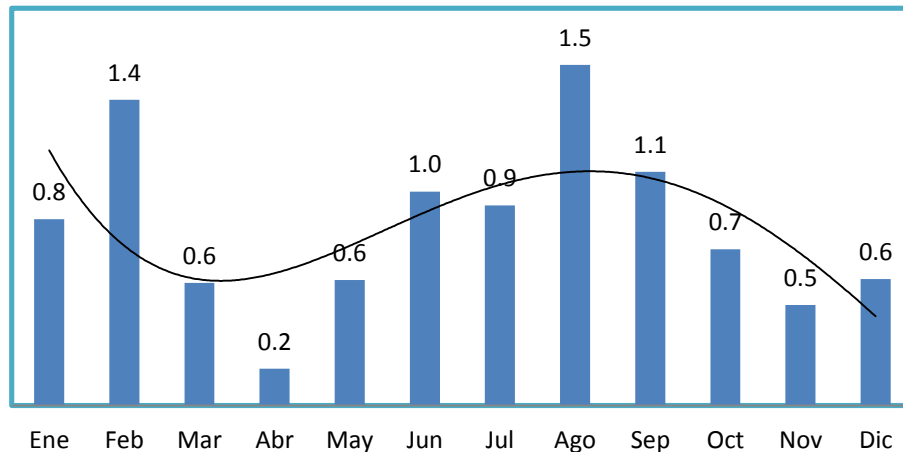


Gráfico 4.2 Promedio de precipitaciones medias mensuales

Precipitaciones anuales (mm)

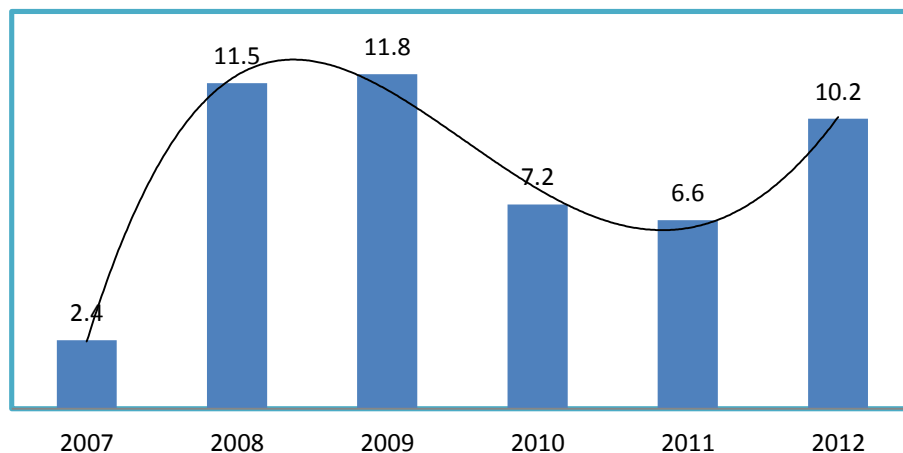


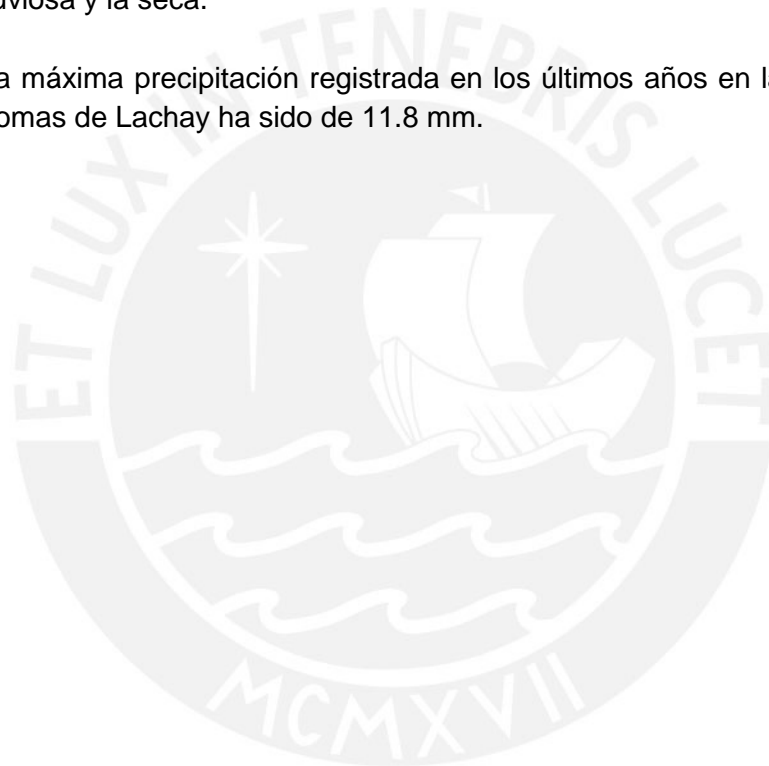
Gráfico 5.3 Promedio de precipitaciones medias anuales

Se observa que las precipitaciones anuales son bajas, varían de 6.6 a 11.8 mm al año. Es importante anotar que en lo que iba del 2012 ya se había llegado a una precipitación anual de 10.2 mm, lo que concuerda estadísticamente con los años anteriores.

5.4. Conclusiones

- El clima del lugar del tramo en estudio corresponde a la zona E(d) B'1 H3 del mapa de clasificación climática del SENAMHI, el cual es árido, semicálido y húmedo con deficiencia de lluvias.
- Las máximas temperaturas de la zona se han registrado entre 24°C y 28°C.

- Las temperaturas mínimas se ubican entre 8 y 12°C.
- La temperatura promedio del aire anual se encuentra en el rango entre 16 y 18°C.
- En el gráfico de las precipitaciones medias mensuales se observa que los meses más lluviosos son agosto y septiembre con 1.5 mm y 1.1 mm respectivamente.
- Estos meses tienen casi 30 y 29 días de lluvia cada uno, aunque en el caso de septiembre las precipitaciones diarias son menores que el mes anterior, por lo que se puede considerar un mes de traslape entre la época lluviosa y la seca.
- La máxima precipitación registrada en los últimos años en la estación Las Lomas de Lachay ha sido de 11.8 mm.



6. ESTUDIOS DE CANTERAS Y FUENTES DE AGUA

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, la estructura del pavimento está conformada por capas granulares, las cuales provienen de las canteras próximas a la obra. Asimismo se necesita de agua para el proceso constructivo. Tanto el material granular como el agua que serán usados en el proyecto deben cumplir con ciertas características indicadas en las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras (EG-2000) del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC)¹⁸.

En este caso, existen dos canteras cercanas al tramo a construir, estas son: Medio Mundo ubicada en el kilómetro 175 y Río Pativilca que se encuentra en el kilómetro 199. Las especificaciones de estas se mostrarán a continuación.

Por otro lado, la fuente de agua más cercana proviene del río Pativilca y los resultados de los ensayos también se mostrarán enseguida.

6.1. Requisitos para los materiales granulares

6.1.1. Subbase

Según la sección 303 de la EG-2000, las especificaciones que debe cumplir el material granular que será usado como base son: una granulometría específica, así como valores mínimos de CBR y valores máximos de abrasión, límite líquido, etc.

Hay cuatro tipos de gradaciones para la subbase según la Norma, en este caso como la carretera se encuentra a menos de 3000 m.s.n.m, si el material cumple con cualquiera de las gradaciones B, C o D, dicho material será aceptable.

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm (2")	100	100	---	---
25 mm (1")	---	75 – 95	100	100
9.5 mm (3/8")	30 – 65	40 – 75	50 – 85	60 – 100
4.75 mm (Nº 4)	25 – 55	30 – 60	35 – 65	50 – 85
2.0 mm (Nº 10)	15 – 40	20 – 45	25 – 50	40 – 70
4.25 um (Nº 40)	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45
75 um (Nº 200)	2 – 8	5 – 15	5 – 15	8 – 15

Tabla 6.1 Requerimientos granulométricos para subbase granular

Fuente: Manual de ensayos de materiales para carreteras (EM-2000) del MTC

Por otro lado, el material también debe cumplir con los siguientes requisitos de calidad:

¹⁸ Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000). *Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras EG-2000* (Segunda edic.) Lima: Perú

Ensayo	Norma MTC	Requerimiento	
		< 3,000 msnm	≥ 3,000 msnm
Abrasión	MTC E 207	50 % máx	
CBR (tráfico ≤ 15x10 ⁶ EE)	MTC E 132	40 % mín	
CBR (tráfico > 15x10 ⁶ EE)	MTC E 132	60 % mín	
Límite Líquido	MTC E 110	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.	
Partículas Chatas y Alargadas	MTC E 211	20% máx	

Tabla 6.2 Requerimientos de Ensayos Especiales

Fuente: Manual de ensayos de materiales para carreteras (EM-2000) del MTC

6.1.2. Base

Para el material de la base, la sección 305 de la EG-2000 especifica requerimientos granulométricos. Así como para la subbase existen cuatro gradaciones. La gradación A sólo es necesaria para carreteras que van a ser construidas por encima de los 3000 m.s.n.m, para el tramo de esta tesis cualquiera de las otras tres gradaciones es aceptable.

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm (2")	100	100	---	---
25 mm (1")	---	75 – 95	100	100
9.5 mm (3/8")	30 – 65	40 – 75	50 – 85	60 – 100
4.75 mm (Nº 4)	25 – 55	30 – 60	35 – 65	50 – 85
2.0 mm (Nº 10)	15 – 40	20 – 45	25 – 50	40 – 70
4.25 um (Nº 40)	8 – 20	15 – 30	15 – 30	25 – 45
75 um (Nº 200)	2 – 8	5 – 15	5 - 15	8 – 15

Tabla 6.3 Requerimientos granulométricos para base granular

Fuente: Manual de ensayos de materiales para carreteras (EM-2000) del MTC

Asimismo, los valores mínimos de CBR dependen de la cantidad de tráfico presente en la zona:

Valor Relativo de Soporte, CBR	Tráfico Ligero y Medio (≤5x10 ⁶ EE)	Mín 80%
	Tráfico Pesado (>5x10 ⁶ EE)	Mín 100%

Tabla 6.4 Valores mínimos de CBR para base granular

Fuente: Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC

Por otro lado, también existen requerimientos tanto para el agregado grueso como para el agregado fino:

Ensayo	Norma MTC	Requerimientos	
		Altitud	
		< Menor de 3,000 msnm	≥ 3,000 msnm
Partículas con una cara fracturada	MTC E 210	80% min.	
Partículas con dos caras fracturadas	MTC E 210	40% min.	50% min.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx	
Partículas Chatas y Alargadas	MTC E 221	15% máx.	
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	
Pérdida con Sulfato de Sodio	MTC E 209	-	12% máx.
Pérdida con Sulfato de Magnesio	MTC E 209	-	18% máx.

Tabla 6.5 Requerimientos para agregado grueso

Fuente: Manual de ensayos de materiales para carreteras (EM-2000) del MTC

Ensayo	Norma	Requerimientos	
		< Menor de 3,000 msnm	≥ 3,000 msnm
Índice Plástico	MTC E 111	4% máx	2% máx
Equivalente de arena	MTC E 114	35% mín	45% mín
Sales solubles totales	MTC E 219	0,55% máx	0,5% máx
Índice de durabilidad	MTC E 214	35% mín	35% mín

Tabla 6.6 Requerimientos para agregado fino

Fuente: Manual de ensayos de materiales para carreteras (EM-2000) del MTC

6.2. Requisitos para las fuentes de agua

Las fuentes de agua que se utilizarán para la elaboración del concreto o en el proceso constructivo para la compactación se consideran adecuadas cuando son aptas para el consumo humano como lo especifica la norma del MTC E 716-2000.

Ensayos	Tolerancias
Sólidos en Suspensión (ppm)	5,000 máx.
Materia Orgánica (ppm)	3.0 máx.
Alcalinidad NaHCO ₃ (ppm)	1,000 máx.
Sulfatos como ion Cl (ppm)	1,000 máx.
pH	5.5 a 8

Tabla 6.7 Requerimientos para las fuentes de agua
Fuente: Manual de ensayos de materiales para carreteras (EM-2000)

6.3. Canteras

Como ya se mencionó previamente cerca del tramo en estudio existen dos canteras: Medio Mundo y Río Pativilca. Los resultados de sus ensayos se muestran a continuación:

6.3.1. Cantera Medio Mundo

Ubicada en el kilómetro 175. Se tomaron diez muestras para realizar ensayos granulométricos, de los límites de Atterberg y clasificación de los suelos, las cuales dieron los siguientes resultados:

Calicata	Muestra	Capa	Prof. (m)	Análisis granulométrico % que pasa				Límites de Atterberg %			Clasificación de suelos	
				Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200	L.L.	L.P.	I.P.	SUCS	AASHTO
CMM - 1	M - 1	2	2.40 - 2.70	80.1	56.4	27.3	2.3	---	NP	NP	SP	A-1b (0)
CMM - 3	M - 2	3	1.40 - 1.60	100.0	100.0	97.5	6.4	---	NP	NP	SP - SM	A-3 (0)
CMM - 4	M - 2	3	1.30 - 1.70	60.4	37.3	12.8	3.2	---	NP	NP	SW	A-1a (0)
CMM - 5	M - 1	2	0.20 - 1.50	56.9	37.6	22.5	1.9	---	NP	NP	SW	A-1a (0)
CMM - 7	M - 1	4	0.85 - 1.15	100.0	100.0	92.9	5.9	---	NP	NP	SP - SM	A-3 (0)
CMM - 7	M - 2	5	1.15 - 2.20	54.2	37.9	26.8	4.6	---	NP	NP	SW	A-1a (0)
CMM - 8	M - 1	2	0.20 - 3.20	61.9	39.0	19.1	2.1	---	NP	NP	SW	A-1a (0)
CMM - 8	M - 2	3	3.20 - 4.50	63.1	38.2	13.7	4.3	---	NP	NP	SW	A-1a (0)
CMM - 9	M - 1	2	0.40 - 2.00	60.4	47.0	29.5	3.9	---	NP	NP	SP	A-1a (0)
CMM - 10	M - 1	2	0.40 - 2.20	57.8	42.1	29.2	4.1	---	NP	NP	SP	A-1a (0)

Tabla 6.8 Resumen de ensayos de laboratorio cantera Medio Mundo
Fuente: Estudio de canteras realizado para la carretera Ancón-Huacho-Pativilca

Como se observa del cuadro anterior, el material predominante es arena bien graduada. En el caso de la granulometría requerida para la subbase, este material cumple con la gradación C de la Tabla 6.1 presentada anteriormente. Para la base también cumple con la misma gradación.

Por otro lado, el CBR al 100% de la máxima densidad seca (MDS) del material de esta cantera es entre 110 y 150% que corresponden a las muestras CMM – 9 y CMM – 10, respectivamente. Los valores de CBR para estas dos muestras son un poco altos; sin embargo, históricamente se han registrado resultados mayores a 100% incluso en el laboratorio de suelos de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Los demás requerimientos referidos a la subbase y base se presentan en la siguiente tabla:

Características	Cantera	Requerimientos		Verificación	
	Medio Mundo	Subbase	Base	Subbase	Base
CBR al 95 % de M.D.S.	61% - 70%				
CBR al 100 % de M.D.S.	110% - 150%	60% min	100% min	Cumple	Cumple
Abrasión	14.40%	50 % máx	40% máx	Cumple	Cumple
Durabilidad gravas	2.90%	-	-	-	-
Durabilidad arenas	15% - 7.9%	-	-	-	-
Equivalente de Arena	61.70%	25% mín	35% mín	Cumple	Cumple
Adherencia en gravas					
- Revestimiento	100%	-	-	-	-
- Desprendimiento	95%	-	-	-	-
Adhesividad en arenas	Grado1 - Grado 2				
Límite líquido	NP	25% máx	-	Cumple	-
Índice de plasticidad	NP	6% máx	4% máx	Cumple	Cumple
Pasa malla # 4	48.4% - 100.0%				
Pasa malla # 200	1.9% - 6.4%				
<u>Suelos</u>					
Cloruros	6,737.40 ppm.	-	-	-	-
Sulfatos	1,100.00 ppm.	-	-	-	-
Sales Totales	18,630.00 ppm.	10000 ppm máx	5000 ppm máx	No cumple	No cumple

Tabla 6.9 Resumen de ensayos especiales cantera Medio Mundo
Fuente: Estudio de canteras realizado para la carretera Ancón-Huacho-Pativilca

Se observa que desafortunadamente debido a la cantidad de sales totales presente en la muestra obtenida de la cantera, el material que proviene de esta no se puede utilizar ni para la subbase ni para la base.

6.3.2. Cantera Río Pativilca

Se realizaron cuatro ensayos granulométricos, de límites de Atterberg y clasificación de los suelos. Los resultados fueron los siguientes:

Calicata	Muestra	Capa	Prof. (m)	Análisis granulométrico % que pasa				Límites de Atterberg %			Clasificación de suelos	
				Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200	L.L.	L.P.	I.P.	SUCS	AASHTO
CP - 2	M - 1	TALUD	3.00 - 3.80	44.6	42.5	38.0	6.9	---	NP	NP	GP - GM	A-1b (0)
CP - 3	M - 1	1	0.00 - 1.50	26.1	21.2	12.3	1.7	---	NP	NP	GP	A-1a (0)
CP - 4	M - 1	2	1.20 - 1.50	76.6	73.5	54.2	2.6	---	NP	NP	SP	A-3 (0)
CP - 5	M - 1	1	0.00 - 2.00	35.3	30.1	20.8	1.5	---	NP	NP	GP	A-1a (0)

Tabla 6.10 Resumen de ensayos de laboratorio cantera Río Pativilca
Fuente: Estudio de canteras realizado para la carretera Ancón-Huacho-Pativilca

En este caso se observa que dos de las cuatro muestras corresponden a gravas pobremente graduadas (GP), cuyas granulometrías se ajustan aceptablemente a la gradación B de las Tablas 6.1 y 6.3 presentadas anteriormente en los requerimientos para subbase y base respectivamente.

El valor de CBR al 100% de la MDS es 114%, lo cual cumple los requerimientos tanto para subbase como para base. Este resultado corresponde a la muestra CP-5 y aunque el valor es un poco alto (mayor a 100%) como se comentó anteriormente en el Perú y en otros países del mundo se han registrado valores parecidos.

En esta tesis se han tomado los resultados de los ensayos de laboratorio ya realizados en una investigación anterior de estudio de canteras para la construcción de la nueva carretera Panamericana Norte. Estos resultados fueron entregados a la autoridad competente para su evaluación durante la etapa de licitación siendo aceptados y, por ello, no se ha podido realizar otra interpretación de los mismos. En la sección 6.5 de este capítulo se detallará más sobre el tema.

El cuadro resumen para verificar los otros requerimientos se muestra a continuación:

Características	Cantera	Requerimientos		Verificación	
	Río Pativilca	Subbase	Base	Subbase	Base
CBR al 95 % de M.D.S.	50%				
CBR al 100 % de M.D.S.	114%	60% min	100% min	Cumple	Cumple
Abrasión	---	50 % máx	40% máx	Cumple	Cumple
Durabilidad gravas	---	-	-	-	-
Durabilidad arenas	---	-	-	-	-
Equivalente de Arena	60.20%	25% mín	35% mín	Cumple	Cumple
Adherencia en gravas					
- Revestimiento	100%	-	-	-	-
- Desprendimiento	95%	-	-	-	-
Adhesividad en arenas	Grado 1				
Límite líquido	NP	25% máx	-	Cumple	-
Índice de plasticidad	NP	6% máx	4% máx	Cumple	Cumple
Pasa malla # 4	26.1% - 44.6%				
Pasa malla # 200	1.7% - 6.9%				
<u>Suelos</u>					
Cloruros	60.99 ppm.	-	-	-	-
Sulfatos	300.00 ppm.	-	-	-	-
Sales Totales	810.00 ppm.	10000 ppm máx	5000 ppm máx	Cumple	Cumple

Tabla 6.11 Resumen de ensayos especiales cantera Río Pativilca
Fuente: Estudio de canteras realizado para la carretera Ancón-Huacho-Pativilca

Se puede verificar que el material de esta cantera cumple tanto con los requisitos de granulometría como con los otros especificados anteriormente.

6.4. Fuentes de agua

Para la construcción del pavimento, no sólo es necesario el material granular sino también una carpeta asfáltica o una capa de concreto dependiendo del tipo de pavimento elegido al final. Para ello se debe contar con una fuente de agua que cumpla con ciertos requerimientos que se mencionan en la Tabla 6.7. La fuente de agua más cercana al tramo es la del río Pativilca ubicado en el kilómetro 199.

6.4.1. Río Pativilca

A continuación se presenta un resumen de los ensayos de laboratorio a los que fue sometida una muestra proveniente de este río:

Cantera	Progresiva (Km)	PH	CL (ppm)	SO4 (ppm)	S.S.T. (ppm)	M. O. (ppm)
Río Pativilca	199 + 700	6.7	78.01	76.9	698.1	0.0

Tabla 6.12 Resumen de ensayos Río Pativilca

Fuente: Estudio de canteras realizado para la carretera Ancón-Huacho-Pativilca

6.5. Conclusiones

- En cuanto a los resultados de los ensayos de CBR que se consideran un poco altos (mayores a 100%), se ha verificado que en el Perú y en otros países se han registrado valores similares. No obstante, en otros casos la obtención de valores altos puede depender de la correcta ejecución del ensayo o de la interpretación del ingeniero a cargo del ensayo al momento de escoger los valores de carga de penetración de las curvas de penetración. En los primeros instantes del ensayo se puede presentar reacomodo de partículas, lo cual hace que los primeros valores de dicha curva no necesariamente se ajusten al resto de esta. Si es posible, se recomienda repetir los ensayos para verificar los valores obtenidos y descartar la posibilidad de un mal procedimiento, contaminación de la muestra original o toma de muestra no representativa.
- El material apropiado para la subbase y base proviene de la cantera Río Pativilca que cumple con todos los requerimientos necesarios por las Normas del MTC. Además se encuentra sólo a 11 km del lugar del proyecto por lo que se puede ahorrar en transporte de material.
- Del mismo modo, el agua proveniente del Río Pativilca cumple con todos los requerimientos de la Norma.

7. DISEÑO

Como se mencionó al principio de este documento, se contemplarán dos opciones para el pavimento a diseñar: flexible y rígido.

Para el caso del pavimento flexible se diseñará por dos métodos que son de los más reconocidos actualmente: la metodología de la AASHTO y la del Instituto del Asfalto.

Para el pavimento rígido, también se utilizará también la metodología de la AASHTO y además la de la Portland Cement Association (PCA).

En general, tanto para pavimentos flexibles como para rígidos, la AASHTO ha basado el diseño en las ecuaciones empíricas obtenidas del Test de Caminos AASHO.

La metodología de la PCA se basa en dos criterios de diseño: fatiga, para mantener dentro de los límites de seguridad los esfuerzos que se producirán en el pavimento debido a las cargas repetitivas que soportará y así evitar las grietas por fatiga; y erosión, que sirve para limitar los efectos de las deflexiones en los bordes de la losa, las juntas y las esquinas sobre el pavimento y de esa manera controlar la posible erosión de los materiales de la fundación y de los bancos¹⁹. Este método a diferencia del de la AASHTO no calcula un solo número de ejes equivalentes, los cuales no distinguen entre los tipos de falla, sino que considera los efectos de cada vehículo dependiendo de los ejes que lo componen. Con el número de repeticiones y el tipo de vehículos que circulan por la zona se puede determinar tanto el consumo de fatiga como el daño por erosión esperado en el periodo de diseño.

La AASHTO tiene más consideraciones que la PCA como confiabilidad, condiciones de drenaje o el nivel de serviciabilidad que tendrá el pavimento. Este último, llamado *present serviceability index* (PSI), es la variable de desempeño en el cual se basará el diseño.

Para los pavimentos flexibles, la AASHTO propone el uso de coeficientes estructurales para cada una de las capas que los compondrán. Estos se determinan a partir de los valores de CBR por ejemplo.

La metodología del Instituto del Asfalto está basada en un sistema elástico multicapa que también se basa en funciones empíricas²⁰. Utiliza diversas cartas de diseño basadas en la temperatura promedio del aire en la zona (MAAT).

7.1. Resumen de datos

En los capítulos anteriores se han ido obteniendo valores que son necesarios para el diseño. En esta sección se mostrará un resumen de dichos valores.

¹⁹ Packard, R.G. (1984). *Thickness Design for Concrete Highway and Streets Pavements*. Florida: Portland Cement Association. Pág. 4

²⁰ Lavin, P. (2003). *Pavement Structural Design*. Londres: Spon Press. Pág. 78

ÍTEM	VALOR
ESTUDIO DE TRÁFICO	
Tasa de crecimiento anual	5.1%
ESAL para pavimento flexible	4.1E+07
ESAL para pavimento rígido	6.6E+07
ESTUDIO DE SUELOS	
Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-6(9)
CBR de la subrasante	7%
Límite líquido	31
Índice de plasticidad	12
ESTUDIOS PLUVIOMÉTRICOS	
Temperatura promedio anual del aire	16 - 18°C
Máxima precipitación anual	11.8 mm
Días de lluvia al año	30
Días de traslape época lluviosa y seca	20
ESTUDIO DE CANTERAS	
Cantera elegida	Río Pativilca
Clasificación SUCS	GP
Clasificación AASHTO	A-1(0)
CBR del material	114%
Porcentaje que pasa la malla #200	1.7% - 6.9%
Límite líquido	NP
Índice de plasticidad	NP

Tabla 7.1 Resumen de los resultados de los estudios

7.2. Método de la PCA para pavimentos rígidos

Este método tiene la particularidad de calcular los efectos que cada tipo de eje tendrá sobre el pavimento y no convertirlo todo a un valor general como sucede con el procedimiento del AASHTO.

Por otro lado, se efectúan dos análisis, un análisis por fatiga y otro por erosión. Se calcula el daño debido a estas dos condiciones que se producirá sobre el pavimento en el periodo de diseño y para obtener los espesores de las capas de la estructura, el daño que se producirá debe ser menor que el permitido.

7.2.1. Datos de entrada

- Módulo de reacción de la subrasante:
Como la subrasante tiene un valor de CBR de 7%, el módulo de reacción según la Figura 2 de la página 7 de la guía del PCA es 170 psi.

- Módulo de reacción efectivo
Al agregar una capa de material granular a la estructura del pavimento, mejora el nivel de soporte de la subrasante y las condiciones de apoyo pudiéndose reducir el espesor de la losa de concreto. Este efecto se refleja en el módulo de reacción efectivo (k_{efect}).
Considerando un espesor de subbase de 6" (15cm) y utilizando la Tabla 1 de la página 6 de la guía de la PCA se interpoló y se obtuvo un k_{efect} de 203 pci.
- Módulo de rotura del concreto (s'_c)
Este se refiere al valor obtenido del ensayo de la resistencia a la flexión de una viga de concreto apoyada en dos puntos y cargada en el centro. El Instituto Americano del concreto o American Concrete Institute (ACI)²¹ sugiere la siguiente fórmula para estimar s'_c a partir de f'_c :

$$s'_c = \alpha(f'_c)^{\frac{1}{2}} \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \text{ según el ACI 363}$$

Donde el valor de α varía entre 1.99 y 3.18. Para esta tesis se consideró un valor promedio de α igual a 2.59.

Lo que da como resultado 48.45 kg/cm² o 689 psi.

- Factor de seguridad de carga o load safety factor (LSF)
Para las carreteras interestatales como esta con altos volúmenes esperados de tráfico, la PCA recomienda en la página 10 de su manual un valor de LSF de 1.2.
- Otros parámetros
Se debe decidir si se utilizarán pasadores o dowels en las juntas para mejorar la capacidad de transmisión de la carga.
Asimismo, se debe especificar si se utilizarán bermas de concreto o de asfalto. Las del primer tipo ayudan a que el pavimento sea continuo; sin embargo son más costosas.
Para este proyecto se decidió utilizar los pasadores y las bermas de asfalto.

7.2.2. Cálculo del espesor de la losa de concreto

En primer lugar, se debe determinar los tipos de eje que circularán por la carretera y la carga reglamentaria de cada uno de acuerdo al vehículo al que pertenecen.

²¹ American Concrete Institute ACI (2005). *High-strength concrete (ACI-363R)*. Washington D.C.

Tipo de vehículo	Conteo	Cargas ton			
		Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje
Automóviles	5,033	1	1		
C2	609	7	11		
T2S1	23	7	11	11	
T2S2	20	7	11	18	
T2S3	30	7	11	25	
T3S1	70	7	11	11	18
T3Se2	3	7	18	11	11
C2R2	5	7	11	11	11
C2R3	15	7	11	11	18
C3R2	70	7	18	11	11
C3R3	58	7	18	11	18
C3	289	7	18		
C4	58	7	23		
T3S2	70	7	18	18	
T3S3	970	7	18	25	
B2	609	7	11		
B3-1	770	7	16		

Tabla 7.2 Pesos máximos reglamentarios de los ejes por tipo de vehículo (ton)

Tipo de vehículo	Conteo	Cargas kip			
		Eje delantero	1 eje	2 eje	3 eje
Automóviles	5,033	2	2		
C2	609	15	24		
T2S1	23	15	24	24	
T2S2	20	15	24	40	
T2S3	30	15	24	55	
T3S1	70	15	24	24	40
T3Se2	3	15	40	24	24
C2R2	5	15	24	24	24
C2R3	15	15	24	24	40
C3R2	70	15	40	24	24
C3R3	58	15	40	24	40
C3	289	15	40		
C4	58	15	51		
T3S2	70	15	40	40	
T3S3	970	15	40	55	
B2	609	15	24		
B3-1	770	15	35		

Tabla 7.3 Pesos máximos reglamentarios de los ejes por tipo de vehículo (kip)

Luego en base a la tasa de crecimiento hallada en el capítulo tres de este documento y al periodo de diseño considerado se encontró el número de repeticiones esperadas durante esos 15 años. Para una tasa de crecimiento de 5.1%, el factor de crecimiento G resulta 1.45 en 15 años de periodo de diseño. Así multiplicando las repeticiones actuales por el número de días en el año (365) por el factor de crecimiento (G) por el periodo de diseño y por el factor de distribución direccional (D) que se considera 0.5; es decir, que el tránsito se reparte uniformemente en ambas direcciones, se tiene:

Cargas por eje (kip)	Repeticiones actuales	Repeticiones en el periodo de diseño
EJES SIMPLES		
2	10,066	40,015,793
15	3,669	14,585,530
24	1,703	6,770,007
EJES TANDEM		
35	770	3,061,013
40	1,693	6,730,254
EJES TRIDEM		
51	58	230,570
55	1,000	3,975,342

Tabla 7.4 Repeticiones de las cargas por eje durante el periodo de diseño del pavimento

Una vez obtenidos todos los datos necesarios, se sigue el procedimiento recomendado por la PCA.

Como ya se mencionó, se debe hacer un análisis por fatiga y otro por erosión. Para determinar los valores del esfuerzo equivalente por fatiga para los ejes simples y tandem se utiliza la Tabla 6.a de la página 14 del manual. Luego para los factores de erosión se utiliza la Tabla 7.a de la página 16.

Para el caso de los ejes trídem se utilizan las Tablas C1 y C2 del apéndice C para los esfuerzos equivalentes por fatiga y los factores de erosión, respectivamente.

Se realizan diseños para diversos espesores de losa, un ejemplo se presenta a continuación:

Espesor de prueba		28 cm		Juntas con pasadores		SI	
Módulo de reacción de la subrasante con subbase <i>k</i>		203 pci		Bermas de concreto		NO	
Módulo de ruptura MR		690 psi		Periodo de diseño		15 años	
Factor de seguridad de carga LSF		1.2					

Carga por eje (kips)	Multiplicado por LSF	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permitidas	Porcentaje de fatiga	Repeticiones permitidas	Porcentaje de daño
EJES SIMPLES	Esfuerzo equivalente:		154		Factor de erosión	2.4
	Factor de relación de esfuerzos:		0.223			
15	18.5	14,585,529.8	Ilimitado		Ilimitado	
24	29.1	6,770,007.4	Ilimitado		25,000,000 27.1	
EJES TANDEM	Esfuerzo equivalente:		143		Factor de erosión	2.6
	Factor de relación de esfuerzos:		0.207			
35	42.3	3,061,013.4	Ilimitado		47,500,000 6.4	
40	47.6	6,730,254.0	Ilimitado		19,800,000 34.0	
EJES TRIDEM	Esfuerzo equivalente:		110		Factor de erosión	2.7
	Factor de relación de esfuerzos:		0.159			
51	20.3	230,569.8	Ilimitado		10,900,000 2.1	
55	22.0	3,975,342.0	Ilimitado		7,000,000 56.8	
			TOTAL		TOTAL (%)	126.4

Tabla 7.5 Diseño del pavimento rígido según el método de la PCA con espesor de base 15 cm y de losa de concreto 28 cm

Se puede ver en el cuadro anterior que el porcentaje de daño por erosión en el pavimento es de 126.4%, debido a esto se debe aumentar el espesor de la losa de concreto o el de la base. Según los resultados mostrados en la Tabla 7.5, el efecto determinante en el diseño es la erosión. El daño por fatiga no es significativo ya que las repeticiones permitidas con este criterio son ilimitadas. El resumen de las alternativas de diseño, tomando en cuenta los valores exactos se presenta a continuación:

	Alternativa					
	1	2	3	4	5	6
Capa	Espesores (cm)					
Base	15	23	30	15	23	15
Losa de concreto	28	28	28	29	29	30
Tipo de daño	Porcentaje de daño					
Por fatiga	-	-	-	-	-	-
Por erosión	126	115	96	84	71	62

Tabla 7.6 Alternativas para la conformación del pavimento rígido obtenidas del cálculo - método PCA

En la Tabla 7.6 se muestran los espesores de las capas obtenidos directamente de los cálculos. Sin embargo, al momento de elegir el diseño definitivo, se debe tomar en cuenta el proceso constructivo con espesor de las capas de 15 cm, 20 cm y/o 25 cm con lo que se obtiene la siguiente tabla:

	Alternativa					
	1	2	3	4	5	6
Capa	Espesores (cm)					
Base	15	25	30	15	25	15
Losa de concreto	30	30	30	30	30	30

Tabla 7.7 Espesores recomendados para la construcción del pavimento rígido – método PCA

En la Tabla 7.6 se observa que a partir de la alternativa 3 el porcentaje de daño producido será menor que el que puede resistir el pavimento (100%). No obstante, la alternativa 3 presenta un porcentaje de daño de 96%, lo que es muy cercano al 100% y podría resultar en un deterioro rápido del pavimento o que no permita un tránsito confortable para los usuarios. Por ello se elige la alternativa 4 que funciona estructuralmente y tiene los espesores menores entre las alternativas que quedan.

En la Tabla 7.7 se muestran las diversas alternativas tomando en consideración el procedimiento constructivo y resulta que aunque del cálculo se obtienen seis alternativas diferentes, estas se reducen sólo a tres distintas y que el porcentaje de daño al cual sería sometido el pavimento podría llegar a ser 62%.

7.3. Método AASHTO para pavimentos rígidos

El diseño que se presentará a continuación está basado en el Manual "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures" (1993) del cual se extrajeron las tablas y nomogramas a los cuales se hará referencia más adelante. Estos últimos serán adjuntados en el Anexo de la presente tesis.

Con el objetivo de determinar el espesor de la losa de concreto Portland necesario para soportar las solicitaciones del tránsito vehicular, la AASHTO desarrolló la siguiente ecuación, la cual se resuelve con ayuda de nomogramas presentados en su guía.

$$\log_{10} W_{18} = z_R x S_o + 7.35x \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32p_t)x \log_{10} \left[\frac{s'_c x C_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63x \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k_{effect}} \right)^{0.25}} \right]} \right]$$

7.3.1. Datos de entrada

- Número de ejes equivalentes
Este valor fue determinado en el capítulo 3 con ayuda de los factores destructivos, el IMD y la tasa de crecimiento anual. Resultó 6.6E+07.
- Periodo de diseño
Como se trata de una carretera interprovincial, de gran importancia ya que la Panamericana Norte conecta toda la costa y tomando en cuenta el factor económico, se determina un periodo de diseño de 15 años.
- Confiabilidad:
La confiabilidad determina la probabilidad de que la estructura del pavimento se comporte satisfactoriamente durante el período de diseño resistiendo las cargas del tráfico y las condiciones climáticas de la zona. Al decir que se comporte satisfactoriamente, se habla de que mantenga su capacidad estructural, funcional y al mismo tiempo que brinde seguridad y confort al usuario.

La selección de un adecuado nivel de confiabilidad para el diseño depende principalmente del nivel de uso y las consecuencias o riesgos asociados con la construcción de un pavimento de menor espesor²².

La AASHTO clasifica las vías de acuerdo a su funcionalidad en cuatro tipos:

- Interestatales y otras autopistas.
- Arterias principales.
- Colectoras.
- Locales.

²²American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington D.C. Pág: I-63

Para una carretera interestatal rural, como lo es la de la presente tesis, la Tabla 2.2 de la página II-9 de la guía de la AASHTO señala niveles recomendados de 80 a 99.9%. Conservadoramente se elige 90% para este proyecto.

- Desviación estándar normal
Este valor depende directamente del nivel de confiabilidad elegido. Se obtiene del área de la curva normal estándar. Para un nivel de confiabilidad de 80%, la desviación estándar es -1.282 según la Tabla 4.1 en la página I-62 de la guía.
- Desviación estándar combinada o total
Como el tráfico de diseño se ha realizado en base a datos de conteos del MTC, es decir ha sido medido, la AASHTO recomienda el valor de 0.34 para pavimentos rígidos en la sección 4.3 de la página I-62.
- Pérdida de serviciabilidad
Para pavimentos rígidos, el valor de serviciabilidad inicial que indica la AASHTO es de 4.5 en la página I-8.
Para autopistas con gran volumen de tránsito como la de este proyecto la AASHTO recomienda un valor de serviciabilidad de 2.5 a 3 al final de la vida útil del pavimento. Como el tráfico diario promedio es considerable (20,800 vehículos) y esta carretera conecta a Lima con el norte del país se optó por un valor de 3 para procurar un buen desempeño del pavimento y confort a los usuarios de la vía.
Por lo tanto, la pérdida de serviciabilidad es la diferencia entre el índice inicial y el final lo que da como resultado 1.5.
- Propiedades del concreto
Se considera la resistencia a la compresión (f'_c) a los 28 días del concreto en el orden de 350 kg/cm².
Según la Norma Peruana de Concreto Armado ²³, para determinar el módulo de elasticidad del concreto (E_c) existe una correlación entre dicho módulo y la resistencia a la compresión. Esta relación es la siguiente:

$$E_c = 15,000(f'_c)^{\frac{1}{2}} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Con el valor de resistencia considerado, resulta un módulo de elasticidad de 281,000 kg/cm² o 3.99E+06 psi.
Por último, para el nomograma de diseño se necesita el valor del módulo de ruptura del concreto (s'_c). Este se calculó en la

²³ Normas Legales (2006). *Reglamento Nacional de edificaciones. Norma E.060 de concreto armado*. Lima: Diario Oficial El Peruano.

sección anterior con la fórmula propuesta por el ACI, cuyo resultado es 48.45 kg/cm² o 689 psi.

- Módulo de reacción de la subrasante
Tomando la Figura 2 de la página 7 de la guía del PCA se determina que para un CBR de 7%, el módulo de reacción de la subrasante es 170 psi.
- Módulo de reacción efectivo
Como se explicó en la sección de diseño con la metodología del PCA, considerando un espesor de subbase de 15cm y utilizando la Tabla 1 de la página 6 de la guía de dicha asociación se interpoló y se obtuvo un módulo de reacción efectivo (k_{efect}) de 203 pci.
- Coeficiente de transferencia de carga
El coeficiente de transmisión o transferencia de carga (J) cuantifica la habilidad de la estructura del pavimento para distribuir las cargas a través de las discontinuidades como las juntas o grietas.
Este valor depende de si se decide usar pasadores (dowels) o no y del tipo de berma que se construirá.
En este caso se ha decidido utilizar pasadores para procurar mejorar las condiciones de deformación en las juntas. Las bermas serán de asfalto. Bajo este contexto la AASHTO define un valor de 3.2 para J en la Tabla 2.6 de la página II-26.
- Coeficiente de drenaje
La presencia de agua puede afectar al pavimento, produciendo erosión en el material granular o degradando el material de la carpeta de rodadura por humedad.
Para obtener el coeficiente de drenaje (Cd) se debe contar con dos parámetros: la calidad de drenaje del suelo de la subbase y el porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.
Como el material a utilizar es una grava pobremente gradada, se considerará una calidad de drenaje buena.
Para estimar el segundo parámetro se recurre a las recomendaciones del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos²⁴. Ellos proponen la siguiente fórmula:

$$P = \frac{(S + R) \times 100}{365}$$

²⁴Coronado, J. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Guatemala: Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA). Pág: cáp 6-14.

Donde:

P = Porcentaje de tiempo en que el pavimento está próximo a la saturación

S = Días de traslape entre la época lluviosa y seca

R = Días con lluvia en que el pavimento puede drenar hasta el 85% del estado de saturación en 24 horas o menos.

En el capítulo 5 se determinó que los días lluviosos eran 30 mientras que los días de traslape entre época lluviosa y seca fueron 20. De este modo aplicando la fórmula señalada líneas arriba, se obtiene un porcentaje de 14%.

De acuerdo a la Tabla 2.5 de la página II-26 de la guía de la AASHTO, para una calidad de drenaje buena, Cd se encuentra en el rango de 1 a 1.1. Como el porcentaje de tiempo que el pavimento está próximo a la saturación fue de 14%, interpolando se obtiene un valor de Cd de 1.05.

Al principio de esta sección se mostró la ecuación de diseño que se emplea en esa metodología, luego se han hallado los valores de cada término justificándose debidamente. El resumen de estos se muestra en el siguiente cuadro:

Parámetro	Valor	Unidades
Número de ejes equivalentes (W_{18})	6.6E+07	ESAL
Período de diseño	15	años
Confiabilidad (R)	90%	
Desviación estándar normal (Zr)	-1.282	
Desviación estándar combinada o total (S_o)	0.34	
Índice de serviciabilidad inicial (PSI_i)	4.5	
Índice de serviciabilidad final (PSI_f)	3	
Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI)	1.5	
Resistencia a la compresión del concreto (f'_c)	350	kg/cm ²
Módulo de elasticidad del concreto (E_c)	4.0E+06	psi
Módulo de ruptura del concreto (s'_c)	689	psi
CBR de la subrasante	7.00%	
Módulo de reacción de la subrasante (k)	170	psi
Espesor de subbase	15	cm
Módulo de reacción efectivo (k_{effect})	203	pci
Coeficiente de transferencia de carga (J)	3.2	
Coeficiente de drenaje (Cd)	1.05	

Tabla 7.8 Resumen de parámetros de diseño con el método de la AASHTO para pavimento rígido

7.3.2. Cálculo del espesor de la losa de concreto

Con los datos mostrados en la Tabla 7.7 y utilizando los nomogramas de la guía de la página II-45 y II-46, se obtiene un espesor de 13 pulgadas o 33 cm.

Como se mencionó en la sección anterior, para calcular el módulo de reacción efectivo de la subrasante se asume un espesor de subbase de 15 cm, lo que da como resultado un espesor de la losa de concreto de 33 cm. Para intentar disminuir el espesor de la losa se puede aumentar el espesor de la subbase, con lo que cambiaría el módulo de reacción efectivo pero todos los demás parámetros se mantendrían constantes. Se calcularon diversas alternativas para dimensionar el pavimento:

Alternativa	1	2	3
Espesor de subbase (cm)	15	23	30
Módulo de reacción efectivo (pci)	203	237	281
Espesor de losa de concreto (cm)	33	32	32

Tabla 7.9 Alternativas para la conformación del pavimento rígido obtenidas del cálculo - método AASHTO

Los valores mostrados en la Tabla 7.9 son los conseguidos directamente del cálculo. Como se observa en dicha Tabla, a pesar de que se aumente en 15 cm la capa de la subbase, la losa sólo disminuye su espesor en 1 cm lo cual no es significativo.

Los espesores de las capas considerando el proceso constructivo se muestran a continuación:

Alternativa	1	2	3
Espesor de subbase (cm)	15	30	30
Espesor de losa de concreto (cm)	35	35	35

Tabla 7.10 Espesores recomendados para la construcción del pavimento rígido – método AASHTO

7.4. Método AASHTO para pavimentos flexibles

El diseño que se presentará a continuación está basado en el manual “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures” del cual se extrajeron las tablas y nomogramas a los cuales se hará referencia más adelante. Estos últimos serán adjuntados en el Anexo de la presente tesis.

Con el objeto de determinar el espesor de la carpeta asfáltica necesaria para soportar las sollicitaciones a las que será sometido el pavimento, la AASHTO desarrolló la siguiente ecuación, la cual se resuelve con ayuda de nomogramas presentados en su guía.

$$\log_{10} W_{18} = z_R x S_o + 9.36 x \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 x \log_{10} M_R - 8.07$$

7.4.1. Datos de entrada

- Número de ejes equivalentes
Este valor fue determinado en el capítulo 3 con ayuda de los factores destructivos, el IMD y la tasa de crecimiento anual. Resultó 4.1E+07.
- Período de diseño
Se determinó en la sección de diseño del pavimento rígido un periodo de diseño de 15 años.
- Confiabilidad
Anteriormente se decidió utilizar un valor de 90%, la justificación se presenta en la sección de diseño del pavimento rígido.
- Desviación estándar normal
Para un nivel de confiabilidad de 80%, la desviación estándar es -1.282 según la Tabla 4.1 en la página I-62 de la guía.
- Desviación estándar combinada o total
Como el tráfico de diseño se ha realizado en base a datos de conteos del MTC; es decir ha sido medido, la AASHTO recomienda el valor de 0.44 para pavimentos flexibles en la sección 4.3 de la página I-62.
- Módulo de resiliencia
Se tiene el valor de CBR de la subrasante y el valor mínimo para la subbase y base requerido por la Norma del MTC, 60% y 100% respectivamente. Al tener estos parámetros es necesario encontrar una correlación para hallar el módulo de resiliencia. Para ello se utilizó la fórmula recomendada por el Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) que figura en la guía AASHTO (2008)²⁵:

$$Mr \text{ (psi)} = 2,555 \times CBR^{0.64}$$

El valor de CBR de la subrasante es 7% con lo que resulta un módulo de resiliencia de 8,877 psi o 61.2 MPa.
- Pérdida de serviciabilidad
Para pavimentos flexibles, el valor de serviciabilidad inicial que indica la AASHTO es de 4.2 en la página I-8.
El tránsito promedio (ADT) obtenido en el capítulo 3 de este documento fue 12'800 vehículos/día aproximadamente. Para este nivel de volumen de tránsito la AASHTO recomienda un valor índice de serviciabilidad final de 2.5 a 3. En la sección anterior se comentaron las razones por las cuales se elige el valor de 3.

²⁵ American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO (2008). *Guide for design of pavement structures*. Washington D.C.

Por lo tanto, la pérdida de serviciabilidad es la diferencia entre el índice inicial y el final lo que da como resultado 1.2.

El resumen de estos parámetros es el siguiente:

Parámetro	Valor	Unidades
Número de ejes equivalentes (W_{18})	4.4E+07	ESAL
Período de diseño	15	años
Confiabilidad (R)	90%	
Desviación estándar normal (Z_r)	-1.282	
Desviación estándar combinada o total (S_o)	0.44	
Índice de serviciabilidad inicial (PSI_i)	4.2	
Índice de serviciabilidad final (PSI_f)	3	
Δ PSI	1.2	
CBR de la subrasante	7.0%	
Módulo de resiliencia de la subrasante (M_R)	8.88	ksi

Tabla 7.11 Resumen de parámetros de diseño con el método de la AASHTO para pavimento flexible

7.4.2. Diseño de la estructura del pavimento

La AASHTO presenta en su guía la siguiente fórmula para determinar el número estructural, el que es una función de los espesores de las capas, sus coeficientes estructurales y los coeficientes de drenaje:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

Donde:

SN = número estructural

a_i = coeficiente estructural de cada capa

D_i = espesor de cada capa

m_i = coeficiente de drenaje de cada capa

- Número estructural o structural number (SN)
Con el uso del nomograma de la Figura 3.1 de la página II-32 de la guía del AASHTO, se obtiene un valor de número estructural de diseño de 6.45.
- Coeficientes estructurales de las capas
Estos coeficientes son necesarios para determinar el aporte de cada capa a la estructura en su conjunto. Sirven para transformar el espesor de la capa en su equivalente del número estructural (SN). “El coeficiente de capa expresa la relación empírica entre el número estructural y el

espesor y es una medida de la habilidad relativa del material para funcionar como un componente estructural del pavimento²⁶.

La guía de la AASHTO recomienda el uso de gráficas para hallar estos coeficientes relacionándolos directamente con alguno de los cuatro resultados de pruebas de laboratorio que se muestran, incluyendo el módulo de resiliencia y el valor de CBR.

Para la base se decidió utilizar 100% y para la subbase 60% de CBR tomando en consideración las especificaciones del MTC para carreteras de tráfico pesado y que el material de la cantera seleccionada cumple con ambos requerimientos (capítulo 6).

Para el coeficiente de la base (a_2) se usa la Figura 2.6 de la página II-19 y para el de la subbase (a_3) la Figura 2.7 de la página II-21.

Para determinar el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica se toma en consideración la recomendación de la guía de la AASHTO, donde para pavimento asfáltico trabajado con mezcla en caliente pero con baja calidad de producción y supervisión, el coeficiente a_1 resulta 0.4.

Los resultados fueron:

Capa	CBR	Coefficiente estructural (a_i)
Carpeta asfáltica (a_1)	-	0.40
Base (a_2)	100%	0.14
Subbase (a_3)	60%	0.13

Tabla 7.12 Coeficientes estructurales para las capas del pavimento flexible

– Coeficientes de drenaje m_i

En la sección 7.3.1 se explica cómo determinar el porcentaje de tiempo que el pavimento puede estar expuesto a condiciones cercanas a la saturación. Además como el material elegido tanto para la base como para la subbase es grava pobremente gradada proveniente de la cantera correspondiente, la calidad de drenaje se ha considerado buena. Si el pavimento se encuentra expuesto a condiciones de humedad cercanas a la saturación y dependiendo de la calidad de drenaje que posea, los coeficientes estructurales de las capas deben ser modificados. Para ello se definen los coeficientes m_i que dependen tanto del porcentaje del tiempo que el pavimento puede estar expuesto a condiciones cercanas a la saturación como de la calidad de drenaje de la capa correspondiente.

Para calcular estos valores se trabaja con la Tabla 2.4 de la página II-25 de la guía de la AASHTO.

A continuación se presentan los coeficientes de drenaje de la base y subbase junto a los valores de CBR requeridos para ambas capas:

²⁶ American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington D.C. Pág: II-17

Capa	CBR	Coefficientes de drenaje m_i
Base (m_2)	100%	1.07
Subbase (m_3)	60%	1.07

Tabla 7.13 Coeficientes de drenaje para las capas del pavimento flexible

Por otro lado, la AASHTO recomienda espesores mínimos para las capas del pavimento dependiendo del número de ejes equivalentes que debe soportar: para ESAL más de $7.0E+06$ la carpeta asfáltica debe tener mínimo 10 cm y la capa de base mínimo 15 cm.

El pavimento flexible es una estructura conformada por varias capas y debe ser diseñada acorde con esta premisa. Se debe hallar el número estructural necesario sobre la subrasante y de la misma forma el número requerido sobre la subbase y la base. Con estos valores se pueden determinar los espesores de cada capa.

Así se tiene que los números estructurales correspondientes a cada capa son:

Capa	CBR (%)	Módulo de resiliencia M_R	SN_i
Subrasante (SN_3)	7	8,877	6.45
Subbase (SN_2)	60	35,108	3.9
Base (SN_1)	100	48,685	1.6

Tabla 7.14 Números estructurales de las capas del pavimento flexible

Para calcular los espesores de las capas que conforman el pavimento, el procedimiento especificado por la AASHTO se muestra en la siguiente figura tomada de la guía:

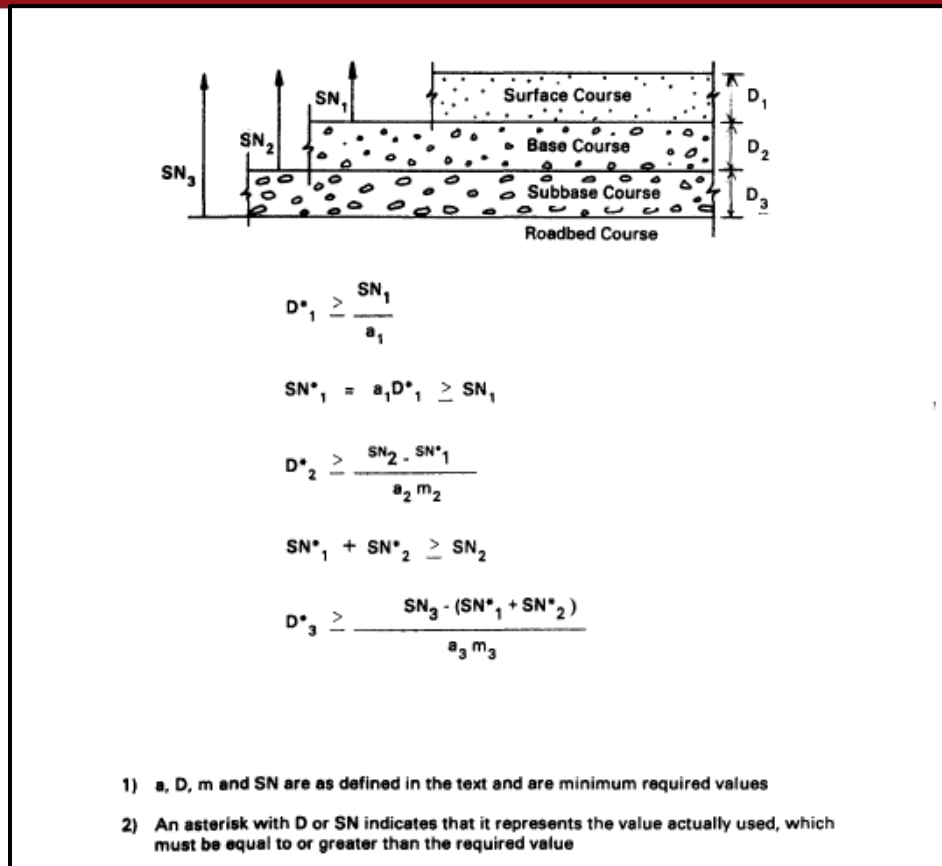


Figura 7.1 Procedimiento para determinar los espesores de las capas del pavimento flexible usando el análisis estratificado
Tomado de la guía de la AASHTO "Design of pavement structures" de la página II-36

Se procede a proponer diversas alternativas, estas cumplen con los requerimientos de espesores mínimos y con que el número estructural sea 6.45 mínimo. Asimismo, teniendo en cuenta el aspecto económico se sabe que el concreto asfáltico cuesta más que el material granular, por lo que es conveniente aumentar el espesor de estas capas y reducir el de la carpeta.

Las distintas configuraciones se presentan en la siguiente tabla:

Capa	Alternativa											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Espesores (cm)											
Carpeta asfáltica	10	10	10	10	15	15	15	15	20	20	20	20
Base	25	30	35	40	25	30	35	40	25	30	35	40
Subbase	61	56	50	45	47	41	36	30	32	27	21	16

Tabla 7.15 Espesores de capa obtenidos del cálculo para pavimento flexible - método AASHTO (cm)

Se observa en la Tabla 7.15 los espesores de las capas obtenidos del cálculo. Por otro lado, hasta la alternativa 9 se sigue manteniendo la condición de que las capas inferiores tienen mayor espesor que las superiores. No obstante, las alternativas 8, 10, 11 y 12 no cumplen con esta condición por ello no serán tomadas en cuenta.

En el capítulo de análisis económico se verá cuál es la mejor opción ya que todas cumplen con los requisitos estructurales.

Tomando en consideración el proceso constructivo, los espesores finales de las capas para cada alternativa son los siguientes:

Capa	Alternativa							
	1	2	3	4	5	6	7	9
	Espesores (cm)							
Carpeta asfáltica	10	10	10	10	15	15	15	20
Base	30	30	35	40	30	30	35	30
Subbase	65	60	55	45	50	45	40	35

Tabla 7.16 Espesores de capas recomendados para la construcción del pavimento flexible – método AASHTO

Se observa en la Tabla 7.16 que se ha sobredimensionado las capas del pavimento.

7.5. Método del Instituto del Asfalto

Para la aplicación de esta metodología se ha utilizado como referencia el manual de “Thickness Design Asphalt Pavements” del Instituto del Asfalto, del cual provienen las tablas y cartas de diseño que se utilizan en esta sección.

7.5.1. Datos de entrada

- Módulo de resiliencia de diseño de la subrasante: como se definió el tipo de suelo y los ensayos que serían utilizados para esta tesis en el temario, sólo se cuenta con un ensayo de CBR el cual se considera para determinar el módulo de resiliencia. Según el manual del IA, el valor de dicho módulo debe ser menor que el 75% del total de los valores analizados; sin embargo, como ya se mencionó sólo se utilizará un valor asumiendo que cumple con esta condición.

Así para una subrasante con CBR de 7%, se obtiene un módulo de resiliencia de diseño de $8.88E+03$ psi que equivale a 61.2 MPa con la fórmula que se mostró anteriormente en la sección 7.4.1.

- Temperatura promedio del aire (MAAT): en el capítulo 5 se mostraron las temperaturas máximas y mínimas que se registraron en la zona de estudio a lo largo de los años. De esta manera se

determina que la temperatura promedio anual en dicho tramo se encuentra en el rango entre 16 y 18°C.

El Instituto del Asfalto ha desarrollado cartas de diseño para diversos casos pero sólo en base a tres MAAT: 7°C, 15.5°C y 24°C. La temperatura promedio del tramo a diseñar se acerca más a 15.5°C que a los otros valores por lo que se utilizan estas cartas de diseño.

- Número de ejes equivalentes: en el capítulo 4 se determinó que el ESAL para pavimento flexible según los factores del AASHTO es 4.1×10^7 .

7.5.2. Valores de la carpeta asfáltica con las distintas alternativas

Como se acaba de mencionar líneas arriba, el IA tiene varias cartas de diseño dependiendo de si se utilizará base granular o no, del espesor de esta capa y de la temperatura promedio del aire. La temperatura promedio que se utiliza es 15.5°C.

Los valores de entrada en la carta de diseño correspondiente son el módulo resiliente de la subrasante (en este caso se utilizaron las cartas que tienen el módulo en MPa) y el número de ejes equivalentes. En el caso en que el encuentro de estos dos parámetros no intersecta exactamente las curvas de la carta respectiva, se procede a interpolar.

A continuación se mostrarán las diversas alternativas que contemplan un pavimento con concreto asfáltico en todo su espesor y otros con base granular.

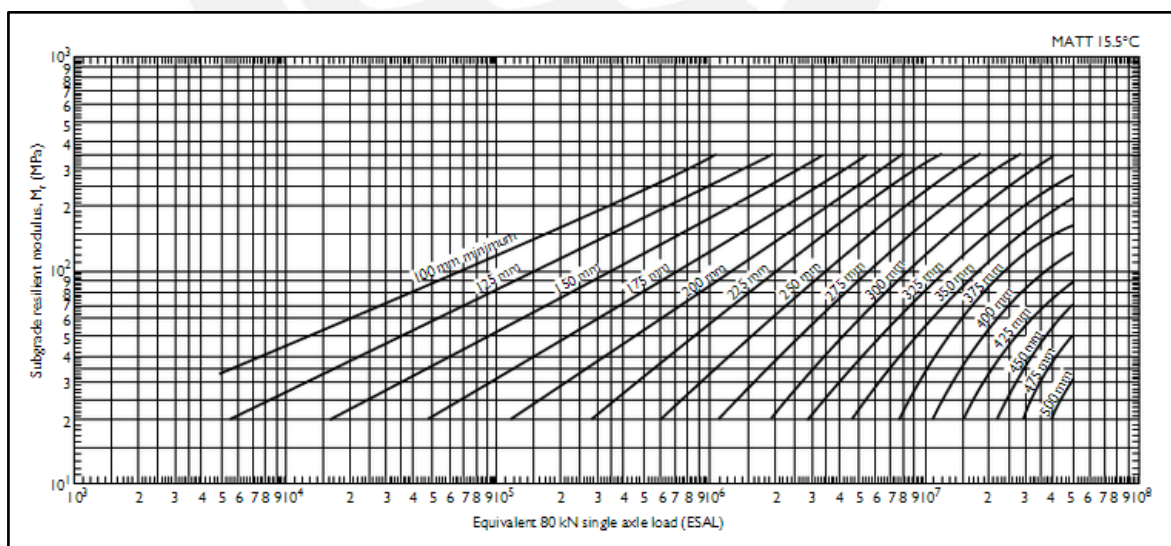


Figura 7.2 Carta de diseño para carpeta asfáltica en todo su espesor

Tomado de la guía del Instituto del Asfalto

Alternativa	Espesor de la carpeta asfáltica
Concreto asfáltico en todo su espesor	42 cm
Base de agregados no tratados de 15 cm de espesor	38 cm
Base de agregados no tratados de 30 cm de espesor	38 cm

Tabla 7.17 Espesores de carpeta asfáltica obtenidos del cálculo - método del IA (cm)

En la Tabla 7.17 se muestran tres alternativas de diseño obtenido por esta metodología con valores exactos para los espesores de las capas. La característica más sobresaliente que se observa en el diseño es el gran espesor necesario de carpeta asfáltica entre 38cm y 42 cm. En la siguiente sección se buscan otras alternativas que cumplan con los mismos requisitos estructurales pero variando la configuración final de las capas.

7.5.3. Estructura del pavimento

Por motivos económicos, una parte de la carpeta asfáltica del diseño mostrado en la sección anterior, puede ser remplazada por material granular en base y subbase.

Utilizando los coeficientes estructurales de las capas, se puede hallar el nuevo número estructural de todo el pavimento y reemplazar para hallar los nuevos espesores de las capas granulares.

Así se utilizaron los coeficientes estructurales y de drenaje hallados en la sección anterior (Ver Tablas 7.12 y 7.13). Reemplazando en la fórmula de número estructural con los espesores hallados de las cartas de diseño se obtiene:

Capa	Alternativa		
	1	2	3
	Espesores (cm)		
Carpeta asfáltica	42	38	38
Base	0	15	30
SN	6.57	6.66	7.46

Tabla 7.18 Número estructural y espesores de las capas del pavimento flexible

El valor de número estructural elegido para obtener el diseño definitivo es el mínimo de los tres hallados. Esto se debe a que si bien aún cumple con los requerimientos para un adecuado desempeño, al ser menor que los otros resultará en menores espesores de capa. Por tanto, el menor número estructural se obtiene de la primera alternativa donde

el pavimento sólo estaría conformado por la carpeta asfáltica en su totalidad. Es importante mencionar que el menor valor del número estructural obtenido con este método del IA (6.57) es mayor que el conseguido con la metodología de la AASHTO (6.45).

A partir del valor de número estructural obtenido (6.57) considerando todo el espesor de carpeta asfáltica, se calcularon diversas alternativas:

Capa	Alternativa							
	1	2	3	4	5	6	7	9
	Espesores (cm)							
Carpeta asfáltica	10	10	10	10	15	15	15	20
Base	25	30	36	41	25	30	35	25
Subbase	63	58	52	47	49	43	38	34

Tabla 7.19 Espesores de capas para pavimento flexible obtenidos del cálculo - método del IA

Tomando en consideración el proceso constructivo de la carretera, las diversas opciones para la conformación del pavimento podrían ser las siguientes:

Capa	Alternativa							
	1	2	3	4	5	6	7	9
	Espesores (cm)							
Carpeta asfáltica	10	10	10	10	15	15	15	20
Base	30	30	35	40	30	30	35	30
Subbase	65	60	55	50	50	45	40	35

Tabla 7.20 Espesores de capas recomendados para la construcción del pavimento flexible – método IA

7.6. Conclusiones

- Debido a la cercanía de una cantera apropiada a la localización del proyecto, tanto el pavimento flexible como el rígido son viables.
- Estructuralmente, cualquiera de las alternativas para los dos tipos de pavimento cumple con los requerimientos, tanto el pavimento diseñado con la metodología de la AASHTO, como con el de la PCA o la del Instituto del Asfalto. La elección final se hará tomando en consideración el aspecto económico.
- Para el pavimento rígido diseñado con la metodología de la AASHTO se obtienen tres alternativas para los espesores de las capas. La más viable

es la que tiene 33 cm de concreto hidráulico y 15 cm de base, ya que para que la losa tenga 32 cm se debe duplicar el espesor de la base lo cual no sería recomendable económicamente. Tomando en consideración el aspecto constructivo, el espesor final de la base seguiría siendo 15 cm mientras que el espesor del concreto sería 35 cm.

- Para el diseño por la PCA se exploran muchas opciones. La estructura conformada por 28 cm de concreto y 30 cm de base cumple con los requerimientos pero su porcentaje de daño por erosión es 96% que resulta elevado y muy cercano a la falla del pavimento. Por ello se decide ampliar el espesor de la losa a 29 cm y se encuentra que con 15 cm de base el porcentaje de daño es 84% lo cual resulta aceptable. El diseño final considerando el proceso constructivo contempla 30 cm de losa de concreto y 15 cm de base granular.
Además se debe considerar que se requerirá hacer mantenimiento en la vía para evitar un daño mayor prematuramente.
- En el caso del pavimento rígido se observa que mientras el diseño con el método de la AASHTO requiere 15 cm de base y 35 cm de concreto hidráulico, el diseño por la PCA sólo requiere 30 cm de concreto con el mismo espesor de base. Es por ello que se realizará el análisis económico sólo con esta última opción que obviamente resultaría menos costosa por el volumen de material necesario y a la vez puede soportar las sollicitaciones del tránsito de la zona.
- Para el pavimento flexible, la fórmula de número estructural permite obtener diversas opciones para la conformación de la estructura. Así con el método de la AASHTO se presenta la Tabla 7.16 con ocho diversas opciones, las cuales se analizarán económicamente.
- Con la metodología del Instituto del Asfalto se requiere 42 cm de concreto asfáltico si el pavimento sólo estuviera conformado por asfalto en todo su espesor. Mientras que con una base de 15 cm se necesita 38 cm de espesor de la carpeta asfáltica.
- Asimismo, en base a los espesores de las capas calculados para las diversas alternativas con las cartas de diseño del IA, se utiliza la fórmula del número estructural y el menor valor de este, considerando concreto asfáltico en todo el espesor, resulta 6.57.
- El número estructural del pavimento diseñado con el método del IA (6.57) es mayor al hallado con la metodología de la AASHTO (6.45); por tanto los espesores, cualquiera que sea la distribución de estos, serán mayores con la primera metodología. Esto se demuestra en la Tabla 7.19, en la que se calcularon los espesores de la subbase con los mismos espesores para la carpeta asfáltica y para la base que se tomaron en cuenta en la Tabla 7.15.

Allí claramente se ve que el espesor de la subbase es mayor en todos los casos.

- Con lo expuesto en el párrafo anterior, sólo se considerarán las opciones obtenidas con el método de la AASHTO para realizar el análisis económico en el siguiente capítulo.



8. ANÁLISIS ECONÓMICO

En el capítulo 7 se presentaron dos alternativas para el pavimento: flexible y rígido. En este capítulo se evaluará cuál de las opciones del pavimento flexible (diseñado con el método de la AASHTO) es la más económica y luego se hará una comparación entre esta y la alternativa del pavimento rígido (diseñado con la metodología de la PCA).

Para esto se realiza un análisis de precios unitarios de las partidas involucradas en la construcción del pavimento y luego se elabora un presupuesto. Los resultados se muestran a continuación.

8.1. Análisis de precios unitarios

En primer lugar se presentan algunas subpartidas necesarias para elaborar las partidas finales:

Partida	MATERIAL PARA SUBBASE					
Rendimiento	m3/DIA	MO	EQ	Costo unitario directo por : m3		22.13
Descripción de recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Subpartidas						
TRANSPORTE INTERNO	m3		1.0000	3.79	3.79	
EXTRACCION DE MATERIAL DE CANTERA	m3		1.1000	6.68	7.35	
CHANCADO DE AGREGADOS PARA SUBBASE	m3		1.0000	10.99	10.99	
						22.13

Fuente: Propia

Partida	MATERIAL PARA BASE					
Rendimiento	m3/DIA	MO	EQ	Costo unitario directo por : m3		22.13
Descripción de recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Subpartidas						
TRANSPORTE INTERNO	m3		1.0000	3.79	3.79	
EXTRACCION DE MATERIAL DE CANTERA	m3		1.1000	6.68	7.35	
CHANCADO DE AGREGADOS PARA BASE	m3		1.0000	10.99	10.99	
						22.13

Fuente: Propia

Partida	EXTENDIDO Y COMPACTADO DE SUBBASE GRANULAR						
Rendimiento	m3/DIA	MO	520.00	EQ	520.00	Costo unitario directo por: m3	10.05
Descripción de recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.		
Mano de obra							
CAPATAZ	hh	0.5000	0.0077	19.68	0.15		
OFICIAL	hh	1.0000	0.0154	13.43	0.21		
PEON	hh	6.0000	0.0923	12.12	1.12		
						1.48	
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	1.48	0.07		
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPL	hm	1.0000	0.0154	146.21	2.25		
MOTONIVELADORA	hm	1.0000	0.0154	221.58	3.41		
						5.73	
Subpartidas							
TRANSPORTE DE AGUA PARA LA OBRA	m3		0.1700	16.68	2.84		
						2.84	

Fuente: Propia

Partida EXTENDIDO Y COMPACTADO DE BASE GRANULAR						
Rendimiento	m3/DIA	MO	500.00	EQ	500.00	Costo unitario directo por : m3 10.49
Descripción de recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de obra						
CAPATAZ	hh	1.0000	0.0160	19.68	0.31	
OFICIAL	hh	1.0000	0.0160	13.43	0.21	
PEON	hh	6.0000	0.0960	12.12	1.16	
						1.68
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	1.68	0.08	
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO	hm	1.0000	0.0160	146.21	2.34	
MOTONIVELADORA	hm	1.0000	0.0160	221.58	3.55	
						5.97
Subpartidas						
TRANSPORTE DE AGUA PARA LA OBRA	m3		0.1700	16.68	2.84	
						2.84

Fuente: Propia

Partida EXTENDIDO Y COMPACTADO DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE						
Rendimiento	m3/DIA	MO	300.00	EQ	300.00	Costo unitario directo por : m3 12.83
Descripción de recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de obra						
CAPATAZ	hh	1.0000	0.0267	19.68	0.53	
OPERARIO	hh	1.0000	0.0267	15.16	0.4	
PEON	hh	6.0000	0.1600	12.12	1.94	
						2.87
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	2.87	0.14	
RODILLO TANDEM EST 8-10 ton	hm	1.0000	0.0267	77.91	2.08	
RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 5.5 - 20 ton	hm	1.0000	0.0267	137.01	3.66	
PAVIMENTADORA SOBRE ORUGAS 69 HP 10-16'	hm	1.0000	0.0267	152.9598153	4.08	
						9.96

Fuente: Propia

Partida	PREPARACION MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE (INC.INSUMOS)					
Rendimiento	m3/DIA	MO	304.00	EQ	304.00	Costo unitario directo por : m3 427.15
Descripción de recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de obra						
CAPATAZ	hh	1.0000	0.0263	19.68	0.52	
OPERARIO	hh	1.0000	0.0263	15.16	0.4	
OFICIAL	hh	1.0000	0.0263	13.43	0.35	
PEON	hh	3.0000	0.0789	12.12	0.96	
					2.23	
Materiales						
ADITIVO MEJORADOR DE ADHERENCIA	kg		0.5243	20.37	10.68	
FILLER MINERAL (CAL HIDRATADA)	kg		42.2800	0.47	19.91	
PETROLEO D-2	gal		4.5000	11.55	51.98	
CEMENTO ASFALTICO DE PENETRACION 60 - 70	kg		131.0680	2.20	287.99	
					370.56	
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	2.23	0.11	
GRUPO ELECTROGENO DE 150 KW	hm	1.0000	0.0263	146.24	3.85	
CARGADOR FRONTAL CAT 966F-220HP	hm	1.0000	0.0263	253.78	6.67	
PLANTA DE ASFALTO EN CALIENTE 120 ton/h	hm	1.0000	0.0263	450.15	11.84	
					22.47	
Subpartidas						
PIEDRA PARA ASFALTO	m3		0.5000	22.16	11.08	
ARENA PARA ASFALTO	m3		0.7300	28.50	20.81	
					31.89	

Fuente: Propia

Partida	CONCRETO F'C=350 KG/CM2 CON BOMBA					
Rendimiento	M3/DIA	MO	64.00	EQ.	64.00	Costo unitario directo por : m3 315.85
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
OFICIAL	hh	3.0000	0.3750	7.70	2.89	
PEON	hh	6.0000	0.7500	6.87	5.15	
CAPATAZ "A"	hh	1.0000	0.125	11.14	1.39	
					9.43	
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	9.43	0.47	
VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 2.40'	hm	3.0000	0.3750	4.96	1.86	
BOMBA CONCRETO	hm	1.0000	0.1250	212.00	26.50	
					28.83	
Subpartidas						
CONCRETO PRE-MEZCLADO F'C=350 m3			1.0000	277.59	277.59	
					277.59	

Fuente: Propia

En base a estas subpartidas se elaboraron las siguientes partidas:

Partida	SUBBASE GRANULAR					
Rendimiento	m3/DIA	MO		EQ		Costo unitario directo por : m3 36.61
Descripción de recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Subpartidas						
EXTENDIDO Y COMPACTADO DE SUBBASE GRANULAR	m3		1.0000	10.05	10.05	
MATERIAL PARA SUBBASE	m3		1.2000	22.13	26.56	
					36.61	

Fuente: Propia

Partida	BASE GRANULAR					
Rendimiento	m3/DIA	MO	EQ	Costo unitario directo por : m3		37.04
Descripción de recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Subpartidas						
EXTENDIDO Y COMPACTADO DE BASE GRANULAR		m3		1.0000	10.49	10.49
MATERIAL PARA BASE		m3		1.2000	22.13	26.56
						37.04

Fuente: Propia

Partida	PAVIMENTO DE CONCRETO ASFALTICO CALIENTE (INC. INSUMOS)					
Rendimiento	m3/DIA	MO	EQ	Costo unitario directo por : m3		568.13
Descripción de recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Subpartidas						
EXTENDIDO Y COMPACTADO DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE		m3		1.0000	12.83	12.83
PREPARACION MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE (INC. INSUMOS)		m3		1.3000	427.15	555.3
						568.13

Fuente: Propia

Partida	IMPRIMACION ASFALTICA (INC. INSUMOS)						
Rendimiento	m2/DIA	MO	4200	EQ	4200	Costo unitario directo por : m2	4.15
Descripción de recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de obra							
CAPATAZ		hh	1.0000	0.0019	19.68	0.04	
PEON		hh	6.0000	0.0114	12.12	0.14	
						0.18	
Materiales							
ASFALTO DILUIDO TIPO MC-30		l		1.1355	2.83	3.21	
						3.21	
Equipos							
HERRAMIENTAS MANUALES		%mo		5.0000	0.18	0.01	
ESCOBA MECANICA		hm	1.0000	0.0019	47.40	0.09	
COMPRESORA NEUMATICA 250-330							
PCM - 87 HP		hm	1.0000	0.0019	70.22	0.13	
CAMION IMPRIMADOR DE 1800 gal		hm	1.0000	0.0019	129.76	0.25	
						0.48	
Subpartidas							
ARENA ZARANDEADA		m3		0.0150	18.83	0.28	
						0.28	

Fuente: Propia

Partida:	Dowels Ø 1½" x 0.5 m @0.45 m						
Rendimiento:	Kg/día	M.O.:	300	E.Q.:	300	Costo unitario directo por : kg	3.49
Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh	0.0100	0.0003	19.43	0.01	
Oficial		hh	1.0000	0.0267	13.01	0.347367	
						0.35	
Equipos							
Herramientas		%MO		0.0500	0.38	0.02	
Cizalla		hm	1.0000	0.0267	1.55	0.04	
						0.06	
Materiales							
Fierro liso Ø 1½"		Kg		1.0000	3.08	3.08	
						3.08	

Fuente: Propia

Partida	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR HASTA EL PRIMER KILOMETRO						
Rendimiento	m3k/DIA	MO	404.00	EQ	404.00	Costo unitario directo por : m3k	4.12
Descripción de recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de obra							
	OFICIAL	hh	0.5000	0.0099	13.43	0.13	0.13
Equipos							
	CARGADOR FRONTAL CAT 966F-220HP	hm	0.1750	0.0035	253.78	0.89	
	CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0198	156.48	3.1	3.99

Fuente: Propia

Partida	TRANSPORTE DE MATERIAL GRANULAR PARA DISTANCIAS MAYORES A 1 KILOMETRO						
Rendimiento	m3k/DIA	MO	1460.00	EQ	1460.00	Costo unitario directo por : m3k	0.86
Descripción de recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Equipos							
	CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0055	156.48	0.86	0.86

Fuente: Propia

Partida	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA HASTA EL PRIMER KILOMETRO						
Rendimiento	m3k/DIA	MO	127.00	EQ	127.00	Costo unitario directo por : m3k	10.71
Descripción de recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de obra							
	OFICIAL	hh	1.0000	0.0630	13.43	0.85	0.85
Equipos							
	CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0630	156.48	9.86	9.86

Fuente: Propia

Partida	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA PARA DISTANCIAS MAYORES A 1 KILOMETRO						
Rendimiento	m3k/DIA	MO	1186.00	EQ	1186.00	Costo unitario directo por : m3k	1.05
Descripción de recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Equipos							
	CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0067	156.48	1.05	1.05

Fuente: Propia

8.2. Elección de la mejor alternativa

En primer lugar, se realiza el análisis para hallar cuál de las alternativas es mejor para el pavimento flexible. Las dimensiones de la carretera son las siguientes:

Longitud	1,000	m
Ancho	14.6	m
Área	14,600	m ²

Tabla 8.1 Dimensiones del tramo a diseñar

Los volúmenes de material para las siete alternativas encontradas en el capítulo 7 son los siguientes:

Capa	Alternativa							
	1	2	3	4	5	6	7	9
	Volumen (m3)							
Carpeta asfáltica	1,460	1,460	1,460	1,460	2,190	2,190	2,190	2,920
Base	4,380	4,380	5,110	5,840	4,380	4,380	5,110	4,380
Subbase	9,490	8,760	8,030	6,570	7,300	6,570	5,840	5,110

Tabla 8.2 Volumen de material asfáltico y granular (m³)

Luego se multiplicaron estos volúmenes por los respectivos precios de las partidas a las que corresponden:

Partida	Alternativa							
	1	2	3	4	5	6	7	9
	Precio parcial (S/.)							
Pavimento de concreto asfáltico caliente	829,470	829,470	829,470	829,470	1,244,205	1,244,205	1,244,205	1,658,940
Base granular	162,241	162,241	189,281	216,321	162,241	162,241	189,281	162,241
Subbase granular	347,429	320,704	293,978	240,528	267,253	240,528	213,802	187,077
Imprimación asfáltica	60,590	60,590	60,590	60,590	60,590	60,590	60,590	60,590
TOTAL	1,399,729	1,373,004	1,373,319	1,346,908	1,734,288	1,707,563	1,707,878	2,068,847

Tabla 8.3 Costo de la estructura del pavimento flexible (S/.)

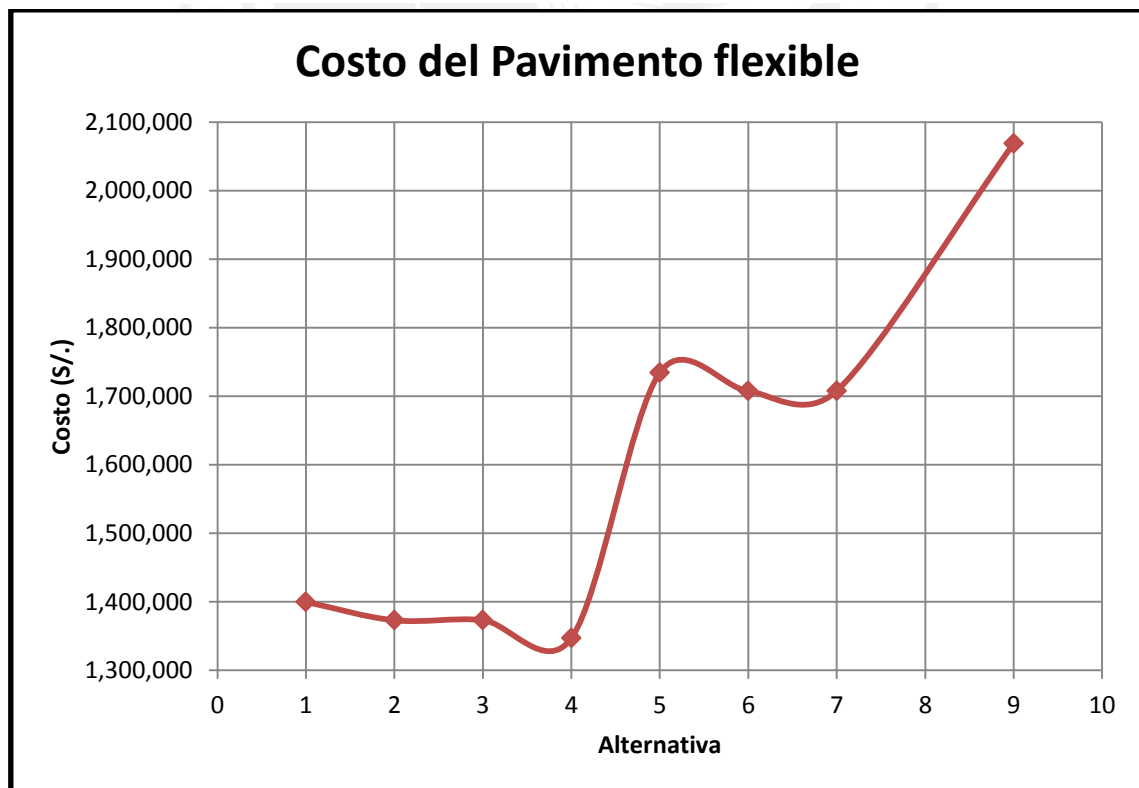


Gráfico 8.1 Costo de la estructura del pavimento flexible (S/.)

En la Tabla 8.3 y el Gráfico 8.1 se observa que la alternativa menos costosa es la 4, donde la carpeta asfáltica tiene un espesor de 10 cm, la base tiene 40 cm y la subbase 45 cm. Es esta opción la que se decide usar para la conformación del pavimento flexible.

En cuanto al pavimento rígido, la alternativa escogida en el capítulo 7 fue la siguiente:

Pavimento rígido	
Capa	Espesor (cm)
Losa de concreto	30
Base	15

Tabla 8.4 Conformación de la estructura del pavimento rígido

El volumen de material requerido para este tipo de pavimento es:

Pavimento rígido	
Capa	Volumen (m ³)
Losa de concreto	4,380
Base	2,190

Tabla 8.5 Volumen de concreto y material granular (m³)

El costo para este pavimento es el siguiente:

Partida	Parcial (S/.)
Concreto $f'c=350$ kg/cm ² + pavimentadora	81,120
Base granular	1,486,791
Dowels $\varnothing 1\frac{1}{2}$ " x 0.5 m @0.45 m	35,712
TOTAL	1,603,623

Tabla 8.6 Costo de la estructura del pavimento rígido (S/.)

Entonces el costo de la estructura del pavimento en ambos casos es:

Tipo de pavimento	Costo (S/.)
Flexible	1,453,181
Rígido	1,603,623

Tabla 8.7 Costo de ambos tipos de pavimento (S/.)

Claramente se observa que el pavimento flexible es el más económico por una diferencia de casi 260,000 soles, valor no despreciable; sobretodo si luego se extrapola a una carretera de varios kilómetros.

8.3. Presupuesto de la construcción

Se elabora el presupuesto de construcción del pavimento flexible en base a los metrados ya mostrados anteriormente. Para el transporte del material, hay que recordar que la cantera de la cual se extraerá el material se encuentra en el kilómetro 199 mientras que el tramo de la carretera se localiza en el 188. Asumiendo que la mezcla asfáltica se transportará desde algún lugar cercano a la cantera se tiene:

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	METRADO	P.U. (S/.)	PARCIAL (S/.)
1.00	SUBBASES Y BASES				
1.01	Subbase granular	m3	6,570.0	36.61	240,527.70
1.02	Base granular	m3	5,840.0	37.04	216,320.77
2.00	PAVIMENTO ASFALTICO				
2.01	Imprimación asfáltica (inc. Insumos)	m2	14,600.0	4.15	60,590.00
2.02	Pavimento de concreto asfáltico caliente (inc. Insumos)	m3	1,460.0	568.13	829,469.80
3.00	TRANSPORTE				
3.01	Transporte de material granular hasta el primer kilómetro	m3k	12,410.0	4.12	51,159.20
3.02	Transporte de material granular para distancias mayores a un kilómetro	m3k	124,100.0	0.86	106,726.00
3.03	Transporte de mezcla asfáltica hasta el primer kilómetro	m3k	1,460.0	10.71	15,636.60
3.04	Transporte de mezcla asfáltica para distancias mayores a un kilómetro	m3k	14,600.0	1.05	15,330.00
COSTO TOTAL DE UN Km DE PAVIMENTO=					S/. 1,535,730.1

Tabla 8.8 Presupuesto de construcción del pavimento (S/.)

Se observa en la Tabla 8.8 que el costo directo para el tramo de un kilómetro diseñado es aproximadamente 1.54 millones de soles.

Por otro lado, la relación de cada partida respecto al presupuesto total se muestra en la siguiente tabla:

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	Porcentaje
1.00	SUBBASES Y BASES	
1.01	Subbase granular	15.66%
1.02	Base granular	14.09%
2.00	PAVIMENTO ASFALTICO	
2.01	Imprimación asfáltica (inc. Insumos)	3.95%
2.02	Pavimento de concreto asfáltico caliente (inc. Insumos)	54.01%
3.00	TRANSPORTE	
3.01	Tansporte de material granular hasta el primer kilómetro	3.33%
3.02	Tansporte de material granular para distancias mayores a un kilómetro	6.95%
3.03	Transporte de mezcla asfáltica hasta el primer kilómetro	1.02%
3.04	Transporte de mezcla asfáltica para distancias mayores a un kilómetro	1.00%

Tabla 8.9 Influencia de cada partida sobre el presupuesto total

Se aprecia en la Tabla 8.9 que solamente el concreto asfáltico representa el 58% del total del presupuesto, la subbase el 15.7% y la base 14.1%. Todos los gastos de transporte representan el 12.3% del total.

8.4. Conclusiones

- Entre todas las opciones posibles, aquella que está compuesta por 10 cm de carpeta asfáltica, 40 cm de base y 45 cm de subbase es la mejor para el pavimento flexible.
- La opción para pavimento rígido elegida es la conformada por 30 cm de losa de concreto y 15 cm de base.
- Haciendo una comparación entre ambas alternativas se obtiene que el pavimento flexible es más económico que el rígido con un margen de diferencia de casi S/. 260,000 o 19% aproximadamente.
- Finalmente, se realiza el presupuesto de construcción del pavimento flexible que era la mejor alternativa. Este resulta 1.54 millones de soles.
- Tan sólo el material y colocación de la carpeta asfáltica representa más del 50% del presupuesto total.
- El transporte sólo significó el 12.3% debido a que la cantera se encuentra relativamente próxima al tramo a construir, a 11 kilómetros de distancia.
- El análisis económico realizado ha sido desarrollado únicamente para la etapa de construcción; las etapas de mantenimiento y operación no han sido

consideras en este análisis. Debido a que los tratamientos a los que son sometidos los pavimentos flexibles son más frecuentes y diversos que los de pavimentos rígidos, se considera que el presupuesto durante la vida útil de la estructura podría variar.



9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones a las que se llega en la presenta tesis son:

- Del estudio de tráfico se concluye que el Índice Medio Diario Anual hallado a partir de los datos proporcionados por el MTC era 8,702 vehículos por día. Por otro lado, el número de ejes equivalentes de diseño es $4.1E+07$ para el pavimento flexible y $6.6E+07$ para el pavimento rígido. No obstante es necesario recalcar que el factor de crecimiento del tráfico estimado puede ser en realidad mayor con el paso de los años debido al progreso actual de nuestro país y a las recientes demandas de transporte por parte del sector minero, agrícola, etc. Es por ello que sería aconsejable realizar un monitoreo continuo del tráfico y del peso máximo permitido por eje de cada vehículo, de tal manera que se intente no someter al pavimento a una carga mucho mayor a la esperada que pueda traducirse en fallas estructurales.
- Del estudio de suelos, se obtuvo que el material de la subrasante era una arcilla de baja plasticidad (CL) según SUCS o A-6 (9) según AASHTO, con un índice de plasticidad de 12, un porcentaje pasante de la malla $\cdot 200$ de casi 84% y un valor de CBR de 7%.
- Del estudio pluviométrico se puede concluir que el clima de la zona es árido, semicálido y húmedo con deficiencia de lluvias. Además la temperatura promedio del aire se encuentra entre 16 y 18°C. El mes más lluvioso del año es agosto, donde llueve todo el mes (30 días). Por otro lado, la precipitación máxima anual registrada fue de tan sólo 11.8mm de agua.
- Del estudio de canteras y fuentes de agua, la cantera cuyo material cumple las especificaciones es la del Río Pativilca tanto para base como subbase. En esta cantera dos de las muestras obtenidas cumplen con la granulometría requerida así como con los otros requerimientos. Por otro lado, el agua del Río Pativilca cumple con las condiciones necesarias para ser usada en el proceso constructivo de la carretera.
- Del diseño podemos concluir que si bien las tres metodologías presentadas en esta tesis son aplicables, los resultados obtenidos varían debido al enfoque que presenta cada una de ellas. Por ejemplo para pavimento rígido, mientras que la metodología de la PCA contempla análisis por fatiga y por erosión, el método de la AASHTO sólo toma en cuenta el número total de ejes equivalentes que transitan por la vía y los niveles de serviciabilidad requeridos al inicio y al final de la vida útil del pavimento. Los espesores de las capas del pavimento halladas por el primer método son menores que por el segundo. Este diseño pudo haberse obtenido justamente por el análisis más detallado de los tipos de falla. Es así que mientras con la PCA se alcanzó un espesor de losa de concreto de 30 cm para una base de 15 cm, con la AASHTO se necesita de 33 cm de losa para satisfacer las mismas condiciones.

Por otra parte, en cuanto a los pavimentos flexibles se puede decir que el método del Instituto del Asfalto es más directo ya que se utilizan ábacos de diseño. El método de la AASHTO arroja un valor de número estructural del pavimento menor que el método del IA. Debido a este hecho, los espesores obtenidos con la segunda metodología son mayores.

Finalmente, se optó por el diseño de la PCA para el pavimento de tipo rígido y por el de la AASHTO para el flexible. Para ambas opciones existían diversas alternativas, las cuales fueron analizadas en el capítulo de análisis económico.

- En cuanto al análisis de costos, se encontró que la alternativa más económica era la del pavimento flexible con carpeta asfáltica de 10 cm, base de 40 cm y 45 cm de subbase. Esta opción representaba un ahorro de S/. 260,000 o 19% aproximadamente en la construcción inicial respecto al pavimento rígido. Es importante tomar en cuenta que se trata del diseño de un solo kilómetro, la carretera está compuesta de decenas de kilómetros por lo que el ahorro se multiplica significativamente.

El presupuesto final para esta alternativa fue de 1.54 millones de soles de los cuales el 58% constaba sólo del material y la colocación de la carpeta asfáltica por lo que un espesor reducido de esta se traduce en un gran ahorro.

- Los resultados económicos de esta tesis se basan solamente en la etapa constructiva y se recomienda para un análisis más exhaustivo tomar en cuenta la etapa de operación y mantenimiento. Normalmente el deterioro en un pavimento flexible se produce más rápidamente y en forma más severa que en el rígido. Consecuentemente, aunque el costo inicial de la construcción del pavimento flexible sea menor que el del rígido, los tratamientos a los que tiene que ser sometido y la prontitud a la que tienen que llevarse a cabo pueden significar un incremento en el costo final.
- Es importante acotar que el diseño de esta tesis se basó en la metodología de la AASHTO de 1993; sin embargo, se desarrolló un nuevo método en la guía provisional de la AASHTO 2008, la cual tiene algunas otras consideraciones. Sería recomendable que alguna otra tesis se base en el diseño aplicando esta nueva metodología y poder comparar resultados. Asimismo las metodologías presentadas en este documento no son las únicas existentes actualmente, se podría diseñar tomando en cuenta más de tal modo de realizar una mejor comparación de resultados, como por ejemplo las metodologías empíricas mecánicas que aplican la teoría elástica para modelar las capas del pavimento.
- 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 pavimento existentes. Realizar un análisis de sensibilidad de estas variables podría ayudar a determinar cuáles son las más influyentes y en caso de que falten datos saber cuáles podrían ser asumidos sin afectar significativamente el diseño final.

10. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ASPHALT INSTITUTE.

1981 *Thickness Design: Asphalt Pavements For Highways and Streets*, Manual Series No. I (MS-1). Estados Unidos: College Park, MD.

RICO, A., Y DEL CASTILLO, H.

1999 *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Volumen 2. México: Limusa

MONTEJO, A.

2006 *Ingeniería de pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño*. Tercera edición. Colombia: Universidad Católica de Colombia.

OLCESE, M.

2009 *Pavimentos – Apuntes del Curso*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.

HUANG, Y.

2004 *Pavement analysis and design*. Traducción propia. Segunda edición. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

2003 Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Reglamento Nacional de Vehículos*. (En línea). Consulta: 12 de abril del 2012
<http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_21.pdf>

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

2000 Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras EG-2000*. Segunda edición (En línea). Consulta: 25 de abril del 2012
<http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/eg-2000/index.htm>

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO

1993 *Guide for design of pavement structures*. Estados Unidos: American Association Of State Highway And Transportation Officials.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

2001 Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Manual de diseño geométrico para carreteras DG-2001*. Perú: MTC.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Estadísticas de Transporte carretero*. (en línea) Portal de estadísticas del MTC. Consulta: 18 de Mayo del 2012.
<<http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/index.html>>

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

Servicio Nacional De Meteorología E Hidrología Del Perú. *Datos históricos – Estación Lomas de Lachay*. Portal web del SENAMHI.

Consulta: 28 de Junio del 2012.

<http://www.senamhi.gob.pe/include_mapas/_dat_esta_tipo.php?estacion=000534>

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES

2013 Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. (En línea). Consulta: 10 de octubre del 2012.

<http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4515.pdf>

PACKARD, R.G.

1984 *Thickness Design for Concrete Highway and Streets Pavements*. Estados Unidos: Portland Cement Association.

LAVIN, P.

2003 *Pavement Structural Design*. Reino Unido: Spon Press.

.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI

2005 *High-strength concrete (ACI-363R)*. Estados Unidos: American Concrete Institute ACI.

NORMAS LEGALES

2006 *Reglamento Nacional de edificaciones. Norma E.060 de concreto armado*. Perú: Diario Oficial El Peruano.

CORONADO, J.

2002 *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Guatemala: Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA).