

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE ESPESOR DE LA CAPA DE
RODADURA DE PAVIMENTOS RÍGIDOS SEGÚN LAS METODOLOGÍAS
AASHTO 93 Y PCA 84**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLERA EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORAS:

SOLANO CAHUAYA, LUZ DANIELA

ESPINOZA NIETO, LUCÍA FLORENCIA

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORES:

ZAPATA CHÁVEZ, RENZO SEBASTIAN

ZEVILLANOS BEGAZO, FRANCIS JOAO

MOGOLLÓN RIVERA, JOAO EMANUEL

ASESOR:

VILLAGÓMEZ MOLERO, DIEGO

Lima, julio, 2021

RESUMEN

En la presente investigación se realiza una comparación teórica-técnica de los métodos AASHTO 93 y PCA 84 para el diseño de los espesores de la capa de rodadura de pavimentos rígidos. El estudio de las metodologías de diseño de pavimentos es necesario para lograr un correcto diseño cumpliendo los estándares de calidad adecuados según los requerimientos de cada vía proyectada. Para lograrlo, la investigación presentada a continuación describirá y comparará los requerimientos y parámetros de los métodos en análisis y diseñará teóricamente, para cada una de las metodologías, espesores de la capa superficial para pavimentos con diferentes características. Con ello, se identifica las ventajas o desventajas de cada uno de estos. De acuerdo a la comparación teórica, a pesar que ambos métodos consideran parámetros muy similares entre sí, se obtiene que los espesores obtenidos con el método AASHTO 93 son mayores que los obtenidos con el PCA y, en consecuencia, se puede considerar a AASHTO 93 como más conservador y a PCA 84 como más económico. Sin embargo, la Norma Peruana E.050 Suelos y Cimentaciones, recomienda ambas metodologías para el diseño de pavimentos rígidos como el analizado en la investigación por lo que se puede usar adecuadamente ambos métodos teniendo en cuenta las consideraciones de cada uno.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
TABLA DE CONTENIDO	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
1 Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	1
1.3 Alcance	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
1.5 Metodología.....	3
2 Revisión de literatura.....	5
2.1 Pavimentos.....	5
2.1.1 Definición y uso	5
2.1.2 Etapas de diseño	2
2.2 Normativa peruana de diseño de pavimentos	2
2.3 Tipos de pavimentos	3
2.3.1 Pavimentos rígidos	3
2.3.2 Pavimentos flexibles.....	4
2.4 Componentes de pavimentos	5
2.4.1 Subrasante.....	5
2.4.2 Subbase.....	6
2.4.3 Carpeta de rodadura.....	7
2.5 Conceptos básicos.....	7

2.5.1	Juntas	7
2.5.2	CBR	8
2.5.3	IMD	8
2.5.4	ADTT	8
2.5.5	Módulo de Rotura (M_r o $S'c$)	8
2.5.6	Módulo de reacción de la Subrasante (K)	9
3	Desarrollo de la investigación	13
3.1	Métodos de diseño de pavimentos	13
3.1.1	AASHTO-93.....	13
3.1.1.1	Fórmula y parámetros.....	13
3.1.1.2	Aplicación de parámetros de diseño.....	14
3.1.2	PCA	18
3.1.2.1	Parámetros de Diseño del espesor del Pavimento rígido	18
3.1.2.2	Proceso de diseño	21
3.1.2.3	Proceso de Diseño sin Datos de carga por eje (Diseño Simplificado) 26	
3.2	Comparación.....	30
3.2.1	Resultados de diseño de Pavimentos rígidos.....	30
3.2.1.1	AASHTO.....	31
3.2.1.2	PCA.....	31
3.2.2	Discusión crítica	32
3.2.2.1	Comparación de metodologías	32
3.2.2.2	Comparación de resultados	33
4	Conclusiones y recomendaciones	34
4.1	Conclusiones.....	34
4.2	Recomendaciones	36

Referencias 37

ANEXOS 39

 ANEXO 1 40

 ANEXO 2 42



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Componente de pavimentos (Manjriker, 2018)	5
Figura 2.2 Distribución de esfuerzos en pavimento rígido (Pacasmayo, 2009).....	3
Figura 2.3 Distribución de esfuerzos en pavimento flexible (Pacasmayo, 2009)	5
Figura 2.4 Interrelaciones aproximadas entre clasificaciones de suelos y valores soportes (CE.010, 2010)	11
Figura 3.1 Factor de distribución de camiones en un carril cuando hay 2 o 3 en una misma dirección (PCA, 2019).....	19
Figura 3.2 Tabla de Tensión equivalente, sin berma de concreto (eje simple/ tándem). Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements	21
Figura 3.3 Tabla de Tensión equivalente, con berma de concreto (eje simple/ tándem). Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	22
Figura 3.4 Factor de tensión. Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	22
Figura 3.5 Ábaco para el análisis de fatiga para las repeticiones de carga admisible. Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	23
Figura 3.6 Tabla de factor de erosión con Dowels y sin bermas de concreto.Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	24
Figura 3.7 Tabla de factor de erosión sin Dowels y sin bermas de concreto.Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	24
Figura 3.8 Tabla de factor de erosión con Dowels y con bermas de concreto.Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	25
Figura 3.9 Tabla de factor de erosión sin Dowels y con bermas de concreto.Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	25
Figura 3.10 Tabla de factor de erosión sin Dowels y con bermas de concreto.Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.	26
Figura 3.11 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 1, pavimento con trabazón de agregados en las juntas. (PCA, 2019).....	27

Figura 3.12 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 2, pavimento con dowels en las juntas. (PCA, 2019).....	28
Figura 3.13 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 3, pavimento con dowels en las juntas (PCA, 2019).	28
Figura 3.14 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 3, pavimento con trabazón de agregados en las juntas. (PCA, 2019).....	29
Figura 3.15 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 4, pavimento con dowels en las juntas (PCA, 2019).....	29
Figura 3.16 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 4, pavimento con trabazón de agregados en las juntas. (PCA, 2019).....	30



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Infraestructura Vial existente en Perú (MTC, 2019).....	2
Tabla 2.1 Valores de f^c y M_r según el a/c (Becerra,2012).....	9
Tabla 2.2 Efecto de la Subbase no Tratada sobre los valores de K . (PCA, 2019)	12
Tabla 2.3 Valores de k de diseño para Subbases tratadas con cemento. (PCA, 2019)...	12
Tabla 3.1 Factor de líneas de tráfico. Fuente: AASHTO 1986	15
Tabla 3.2 Valor recomendado de confiabilidad (AASHTO, 1993).....	16
Tabla 3.3 Valor final de serviciabilidad recomendado (CE.010, 2010).....	17
Tabla 3.4 Valores de C_d recomendados por la AASHTO para pavimentos rígidos (CE.010, 2010)	17
Tabla 3.5 Tasas anuales de crecimiento de Tráfico y factores de Proyecciones correspondientes. Tomado de PCA (2019)	20
Tabla 3.6 Parámetros establecidos de entrada.....	31
Tabla 3.7 Resultados de diseño AASHTO	31
Tabla 3.8 Resultados de diseño PCA	32
Tabla 3.9 Resultado de diseño de Pavimentos Rígidos para cada una de las metodologías de acuerdo al valor de CBR.....	33
Tabla 4.1 Resultados de AASHTO 93 modificando parámetros de entrada.	35

1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

La Norma CE.010 Pavimentos Urbanos (2010) indica que, para el diseño de pavimentos, se puede utilizar cualquier método de diseño estructural sustentado en teorías y experiencias a largo plazo, tales como las metodologías del Instituto del Asfalto, de la AASHTO-93 y de la Portland Cement Association (PCA). Adicionalmente, se precisa que se podrá usar cualquier otro método de diseño para lo que se requerirá detallar las especificaciones en el informe del proyecto respectivo. Esta Norma señala que las juntas de control en estructuras rígidas deben estar espaciadas en intervalos no mayores de 4,60 m en casos de diseño convencionales y en el caso de pavimentos de concreto reforzado con mallas o fibras metálicas pueden llegar a tener espaciamientos entre juntas de control de hasta 9,0 m.

El conocimiento de los conceptos técnicos de la ingeniería de pavimentos es esencial para cualquier profesional encargado del diseño, construcción y control de calidad de cualquier tipo de pavimento. Los aspectos técnicos aplicados en la ingeniería de pavimentos no son iguales a los aplicados en la geotecnia tradicional debido a que el sistema de cargas aplicadas en la superficie tiene un mecanismo característico de carreteras (Manjriker, 2018). La presente investigación comparará las metodologías AASHTO 93 y PCA 83 de diseño de pavimentos rígidos. Además, se diseñará un pavimento rígido según cada método para comparar los resultados.

1.2 Justificación

El estudio del diseño de pavimentos rígidos y sus espaciamientos entre juntas en Perú es indispensable para evitar futuras fallas en próximos proyectos de infraestructura vial. Esto, principalmente, debido a que solo se encuentra pavimentado el 17% de los 168 953.9 km de carreteras del país, según el registro elaborado por el MTC (2019). En la Tabla 1.1 se muestra la infraestructura vial pavimentada y no pavimentada según redes viales nacional, departamental y vecinal. Esta tabla muestra que la red existente del sistema nacional de carreteras tiene un mayor déficit en las redes departamental y vecinal en especial. Por otro lado, la red vial nacional se encuentra pavimentada en un 82%, lo

cual es un gran avance. Sin embargo, el total de carreteras no pavimentadas es aún considerable.

Tabla 1.1 Infraestructura Vial existente en Perú (MTC, 2019)

		TOTAL (km)
LONGITUD TOTAL		168 953.9
NACIONAL	SUB TOTAL	27 053.7
	Pavimentada	22 172.5
	No Pavimentada	4 881.2
DEPARTAMENTAL	SUB-TOTAL	27 639.6
	Pavimento	4 261.3
	No Pavimentada	23 378.3
VECINAL	SUB-TOTAL	114 260.5
	Pavimento	2 335.8
	No Pavimentada	111 924.7

Teniendo en cuenta la gran cantidad de kilómetros que se proyectada en el sistema nacional de carreteras, es indispensable el correcto diseño para cumplir con dicha proyección adecuadamente con carreteras de calidad que lleguen a cumplir los estándares adecuados según sus requerimientos. Becerra, M. (2012) asegura que tener más y mejores caminos y redes viales sustentables implica prosperidad.

El correcto diseño de las estructuras en análisis puede llegar a evitar fallas ya sean transversales, longitudinales, diagonales o incluso por discontinuidad. Las causas probables, relacionadas al diseño estructural, de estas fallas pueden ser una separación excesiva de juntas, espesor insuficiente de las losas desde el diseño, transferencia ineficiente de cargas entre las losas hasta el suelo del terreno. A esto, se le suman factores externos y no predecibles (Menéndez, 2009).

1.3 Alcance

La presente investigación consiste en un estudio teórico-técnico con un análisis comparativo de dos metodologías de diseño de pavimento rígido. Las metodologías en estudio son la AASHTO-93 y PCA que son usados en el país.

El desarrollo de la investigación se dará en tres partes principales. En primer lugar, se desarrollará una descripción de los respectivos conceptos y terminología usadas en la comparación. Desde el punto de vista técnico, se presentará el análisis comparativo teórico de los dos métodos de diseño, específicamente de los refuerzos requeridos, las dimensiones, los aspectos técnicos y consideraciones generales y especiales en cada caso. En segundo lugar, según lo requerido en los métodos AASHTO-93 y PCA, se desarrolla un diseño teórico de un pavimento según cada una de estas. Por último, con lo desarrollado, se analizan las ventajas y desventajas del uso de cada uno de los métodos de diseño estudiados y se elaboran las conclusiones y recomendaciones respectivas del uso de cada una.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar el análisis comparativo del diseño teórico de pavimentos rígidos de concreto armado según dos métodos aplicados en el país.

1.4.2 Objetivos específicos

- Descripción y comparación teórica-técnica de los métodos de diseño de pavimentos rígidos a estudiar.
- Diseñar un pavimento rígido según dos metodologías.
- Identificar las ventajas y desventajas en cada uno de los métodos de diseños para su aplicación en proyectos peruanos.

1.5 Metodología

La metodología del presente trabajo de investigación consiste en la descripción y comparación de métodos de diseño de pavimentos rígidos para lo cual se plantea una metodología de estudio basada en tres partes principales. Primero, se contempla la revisión de literatura en relación al tema a estudiar en investigaciones y publicaciones de los últimos 10 años, en esta parte se investigará el uso y aplicación de las metodologías de diseño propuestas por la AASHTO-93 y la PCA. Segundo, el desarrollo de la investigación se centrará en el análisis comparativo y descripción de diferentes métodos

de diseño de pavimentos rígidos aceptados en la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos en el cual se detallarán los requerimientos y especificaciones de dimensiones y materiales a usar según cada una de esta metodología. Por último, se diseñarán pavimentos rígidos siguiendo las metodologías estudiadas para poder determinar las diferencias técnicas y cualitativas e identificar las ventajas y desventajas de cada una. Estos pavimentos considerarán diferentes valores de CBR para poder compararlos entre ellos.



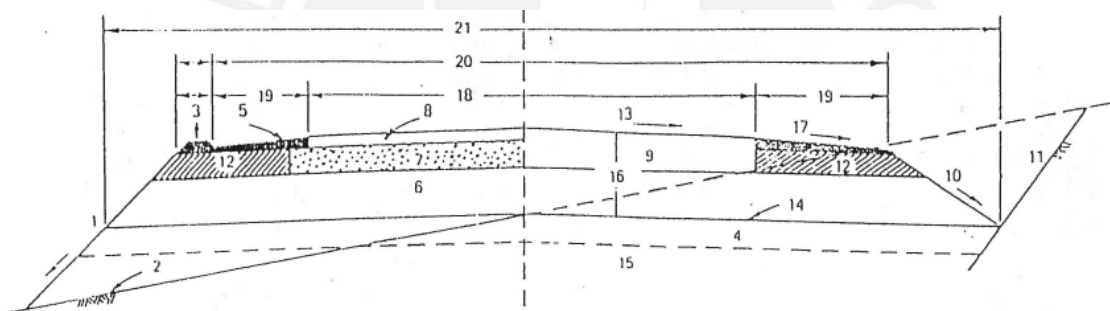
2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Pavimentos

2.1.1 Definición y uso

Un pavimento es una estructura construida sobre el suelo de un terreno destinado a la circulación de tránsito de vehículos. El objetivo de un correcto diseño de pavimentos es proporcionar una circulación segura y confortable a los usuarios de las vías en un tiempo eficiente. Además, contribuye a distribuir la carga proporcionada por el tráfico para mantener la estructura del pavimento en buen estado en el tiempo para el que ha sido planificado (Menéndez, 2009).

La estructura y sistema de pavimentos constan de capas de materiales seleccionados y suelo del terreno y una capa superior. En la Figura 1.1, se muestran las partes de la estructura de acuerdo al tipo de pavimento.



Sección de pavimento flexible

Sección de pavimento rígido

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| 1. TALUD DEL RELLENO | 11. TALUD DE CORTEBASE DE LA BERMA |
| 2. TERRENO NATURAL | 12. BOMBEO |
| 3. DIQUE | 13. SUBRASANTE |
| 4. MATERIAL SELECCIONADO | 14. SUELO DE FUNDACIÓN |
| 5. RECUBRIMIENTO DE LA BERMA | 15. ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO |
| 6. SUBBASE | 16. TALUD DE LA BERMA |
| 7. CAPA DE BASE | 17. CARRILES DE CIRCULACIÓN |
| 8. CAPA DE SUPERFICIE | 18. BERMA |
| 9. LOSA DE PAVIMENTO | 19. ANCHO DE LA VIA |
| 10. TALUD DE LA CUNETA | 20. CAMA DE LA VIA |

Figura 2.1 Componente de pavimentos (Manjriker, 2018)

2.1.2 Etapas de diseño

Según Menéndez, J. (2009), para tener un correcto diseño de pavimentos, inicialmente se debe estudiar el suelo sobre el cual se va a construir. A continuación, es necesario definir el tipo de superficie de rodadura deseada y los componentes estructurales para seleccionar los materiales requeridos. Luego, se necesita tener conocimiento de tráfico a esperar en la zona en la actualidad y a futuro, teniendo en cuenta el ciclo de vida esperado. Con todo ello, se puede diseñar según los tipos de pavimento y elegir el más adecuado teniendo en cuenta factores como economía, mantenimiento y el tipo de ejecución.

2.2 Normativa peruana de diseño de pavimentos

La Norma peruana CE.010 Pavimentos Urbanos (2010) tiene un ámbito de aplicación en todas las ciudades del Perú. Esta tiene como objeto establecer los requerimientos necesarios, principalmente, para el diseño, materiales, construcción y mantenimiento pavimentos urbanos para asegurar su buen comportamiento.

La Norma CE.010, con el objetivo de lograr la correcta ejecución del estudio de mecánica de suelos y del diseño, describe la información previa para la ejecución de los estudios como son las técnicas de investigación de campo, ensayos de laboratorio, requisitos de materiales y control de calidad durante la ejecución de pavimentos. Además, para el diseño estructural de pavimentos urbanos, se presentan las metodologías aceptadas en el país, los factores a consideración en este y las especificaciones técnicas constructivas según el tipo de vía requerida. Finalmente, se presentan los documentos que todo proyecto de pavimentación debe tener, que son el informe técnico, planos de pavimentos en planta, secciones y detalles y las especificaciones técnicas.

La Norma CE.010 propone, para el diseño de pavimentos, el uso de 3 metodologías más comúnmente usadas, las que son propuestas por el Instituto del Asfalto, la AASHTO-93 y la PCA. Adicionalmente, también se menciona que, para cualquier proyecto peruano, se puede diseñar ello siguiendo cualquier otro método de diseño propuesto si es que se explican los conceptos y aspectos técnicos necesarios para su aplicación al final del informe técnico.

2.3 Tipos de pavimentos

Los pavimentos se pueden clasificar según los materiales que los componen y, a su vez, estos se pueden subclasificar con la presencia o ausencia de refuerzo. Se explicará, a continuación, los dos tipos de pavimentos más comunes, ahondando en los tipos de pavimentos rígidos.

2.3.1 Pavimentos rígidos

Un pavimento rígido se define como una estructura de 1 o 2 capas de materiales apoyadas directamente en la base del suelo. Se compone por una losa de concreto simple o armado, la cual puede estar apoyada directamente sobre la base del suelo o sobre una sub-base: segunda capa de material granular.

Ya que el concreto posee un valor elevado del módulo de elasticidad, los esfuerzos inducidos por el tráfico son atenuados en gran medida por la losa de concreto. Los esfuerzos de compresión se distribuyen en un área amplia, las que son transmitidas a la siguiente capa en magnitudes pequeñas (Reyes y Rondon, 2015). Debido a ello, la capacidad del suelo no resulta un problema significativo para recibir esfuerzos. La losa de concreto, además, debe cumplir la función de capa impermeable, garantizando el sellado en losas y juntas, para proteger las posteriores capas. (Azevedo, 2011).

La sub-base, compuesta generalmente por material granular con aglomerantes, debe ser considerada siempre en el diseño del pavimento cuando se cuentan con cargas pesadas que puedan dañar las juntas de las losas o cuando la subrasante contenga alto porcentaje de finos que puedan entrar en suspensión (Calo, 2012). Por lo mencionado anteriormente, la sub-base de un pavimento rígido debe garantizar la estabilidad de la capa de concreto, así como la resistencia a la erosión (Azevedo, 2011).

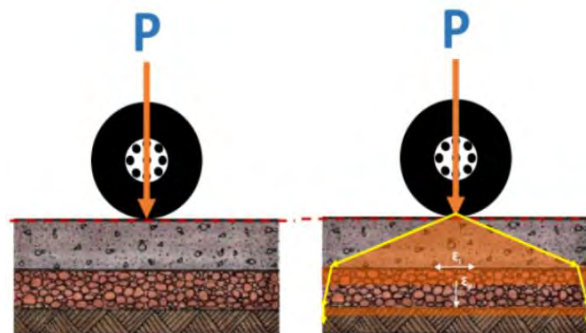


Figura 2.2 Distribución de esfuerzos en pavimento rígido (Pacasmayo, 2009)

El pavimento rígido también se caracteriza por un mayor tiempo de duración y un mayor costo de implementación, respecto al pavimento flexible.

- Pavimento rígido de concreto simple sin refuerzo

Manteniendo la estructura de un pavimento rígido, se presenta como una opción para zonas de tránsito bajo, ya que será el concreto el que resistirá todas las cargas (Becker, 2019). Debido a este motivo, para este tipo de pavimento, se deben considerar paños de distancia corta, para garantizar una correcta transferencia de cargas. Además, se debe considerar el efecto del clima, ya que no contará con una sub-base que proteja la subrasante.

- Pavimento rígido de concreto simple con refuerzo en juntas

Los pasadores, o también llamados “dowels” se colocan en las juntas entre dos paños con la función de transmitir las cargas entre las mismas. El diseño de juntas con pasadores debe ser realizado manteniendo el control de la funcionalidad de la junta por la dilatación del concreto y, a su vez, de la transferencia de cargas por el pasador (Becker, 2019). Este tipo de pavimento permite un mayor espaciamiento entre juntas (pañós de mayor longitud), pero requiere de mano de obra calificada para su implementación.

- Otros tipos de pavimento rígido

Otra opción para un pavimento rígido es mediante una capa de concreto armado, la cual aumenta la resistencia a flexión y disminuye los esfuerzos en la subrasante. Además, también se pueden considerar estructuras de pavimentos mixtos, en los cuales se cuenta con una capa de asfalto sobre una capa de concreto armado.

2.3.2 Pavimentos flexibles

Un pavimento flexible se define como una estructura de múltiples capas, las cuales disminuyen su rigidez hasta llegar a la subrasante. Un pavimento flexible está conformado por una capa asfáltica, seguidas de capas de materiales granulares definidos como base, sub-base, afirmado y, en algunos casos, material de conformación (Reyes y Rondon, 2015). A diferencia del pavimento rígido, el asfalto de la capa superior de un pavimento

flexible no distribuye las cargas en una zona amplia, es por ello que requiere de múltiples capas para disminuir y extender los esfuerzos en el suelo.

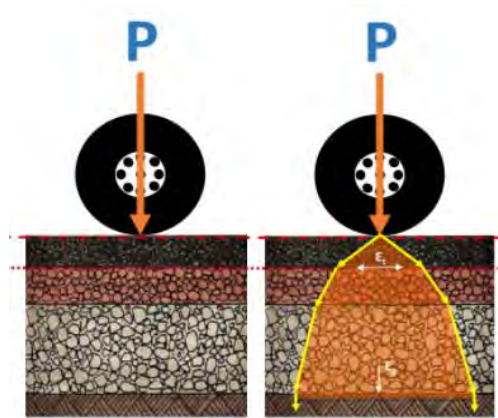


Figura 2.3 Distribución de esfuerzos en pavimento flexible (Pacasmayo, 2009)

El pavimento flexible también se caracteriza por un menor tiempo de duración y un menor costo de implementación, respecto al pavimento rígido.

2.4 Componentes de pavimentos

El diseño de un pavimento consiste en diferentes capas que se apoyarán sobre el terreno natural. Generalmente los pavimentos rígidos están compuestos por una capa Sub base y una de concreto, la cual otorga una alta rigidez propia de este tipo de pavimento. Dependiendo de la existencia (o inexistencia) de refuerzo, se puede clasificar en 4 tipos de pavimentos rígidos: sin refuerzo, con refuerzo en las juntas, continuamente reforzado y continuamente reforzado con capa de asfalto en la superficie (Nikolaides, 2015). Sin embargo, independientemente del tipo de pavimento rígido que se diseñe, las capas que lo conformen tendrán la misma distribución.

2.4.1 Subrasante

Es la capa de terreno natural sobre la que se construye el pavimento a diseñar. Su principal función es servir como una plataforma uniforme y estable sobre la que se pueda apoyar el pavimento (Nikolaides, 2015). Es por ello que el suelo debe ser tratado de tal forma que se eviten cambios bruscos en este, por ejemplo, debido a procesos de expansión-contracción. El suelo natural puede ser tratado mediante estabilización y compactación

mecánica, o también puede estar conformado por material de relleno con las características deseadas, de tal forma que funcione como la cimentación sobre la que se asiente el resto de la estructura del pavimento (Manjriker, 2018).

La capacidad de carga de la subrasante se puede expresar en términos del CBR (California Bearing Ratio) o M_R (Modulo resiliente). Los principales parámetros que afectan la capacidad de carga de la sub rasante son las condiciones de humedad y de bajas temperaturas (hielo-deshielo) (Nikolaides, 2015). Si la subrasante es susceptible a periodos de congelamiento, se debe asegurar que las capas superiores (sub base y capa de concreto) tengan un espesor mayor a la profundidad de penetración de la helada. Asimismo, se debe garantizar que, para evitar problemas de humedad, como regla general, el nivel freático se encuentre 300 mm por debajo del nivel de formación de la sub rasante. (Nikolaides, 2015)

2.4.2 Subbase

Es la capa que se encuentra inmediatamente por encima de la sub rasante y por debajo de la de concreto. Puede estar conformada por materiales granulares o materiales ligados hidráulicamente (HBMs) y proporciona una superficie uniforme sobre la que se apoyará la capa de concreto. Es importante que la sub base permita el drenaje libre del agua que pueda ingresar por las juntas o grietas de la capa superior de concreto hacia un desagüe subterráneo o hacia zanjas de drenaje.

Uno de los problemas más recurrentes en los pavimentos rígidos y relacionados con la subbase es la erosión debido a bombeo de finos; por ello se deben tomar las precauciones debidas de acuerdo al material utilizado. Si la subbase es construida con materiales ligados hidráulicamente, se eliminan los problemas de bombeo de finos. Sin embargo, de ser construida con materiales no ligados, los agregados no deben poseer altos contenidos de finos, es decir, que menos del 10% atraviese el tamiz 0.075mm, con el fin de evitar el bombeo. (Nikolaides, 2015). En general, la función de la subbase en pavimentos rígidos no es la de aumentar la resistencia estructural, sino de proveer una superficie en la que la capacidad de carga sea uniforme con el fin de evitar fallas locales; asimismo, sirve como apoyo sobre el que pueden moverse los vehículos de construcción (Nikolaides, 2015)

2.4.3 Carpeta de rodadura

Por último, esta capa superior es la carpeta de rodadura de concreto, permanece en contacto directo con el paso vehicular y las condiciones climáticas. Funciona como el principal elemento estructural de soporte para las cargas de tráfico, de tal forma que las distribuye a las capas inferiores y proporciona una superficie uniforme y segura para los vehículos (Nikolaides, 2015). Asimismo, la carpeta de rodadura debe soportar esfuerzos debido a cambios de humedad, fricción con la subbase, y cambios de temperatura.

Según el diseño del pavimento rígido, esta losa de concreto puede no contar con refuerzo alguno (con juntas menos distanciadas), tener refuerzos de acero solo en las juntas (con el fin de uniformizar cargas y deformaciones entre paños continuos) o tener refuerzos continuos a lo largo la losa.

2.5 Conceptos básicos

2.5.1 Juntas

El concreto durante todo su tiempo de vida, se ve sometido a procesos de contracción o expansión. Por un lado, la contracción, que ocurre durante el endurecimiento y secado, se produce por la pérdida de humedad de la capa de concreto, debido a una evaporación excesiva del agua de la mezcla. Por otro lado, la expansión volumétrica sucede por el incremento de la temperatura del ambiente, lo cual genera esfuerzos de compresión. Ambos procesos generan agrietamientos indeseados en la superficie de rodadura y si no se controlan debidamente, pueden deteriorar gravemente el pavimento rígido.

Las grietas en el pavimento pueden dispersarse erráticamente si es que se tiene un solo paño continuo de concreto. Es por ello, que se realiza el diseño de juntas, con el fin de orientar y localizar el esparcimiento de fisuras. Existen 3 tipos de juntas según su función: de contracción, de expansión y de construcción. Por un lado, las juntas de contracción se diseñan para controlar los agrietamientos que se producen durante el endurecimiento y secado. Por otro lado, las juntas de construcción, las cuales suelen alternarse con las juntas de contracción, se utilizan cuando se desea interrumpir la obra durante el vaciado de la losa. Estos 2 tipos de juntas pueden ser colocados tanto longitudinalmente, como transversalmente. Finalmente, las juntas por expansión o de aislamiento, sirven para

otorgarle al paño de losa un movimiento libre con el fin de que no se generen esfuerzos de compresión por chocar con otros elementos adyacentes. Un mal diseño del espaciamiento de juntas puede conllevar a acortar de gran manera el tiempo de vida del pavimento, aún si este tiene un adecuado grosor (ACI Committee 325, 2019).

2.5.2 CBR

El CBR es un parámetro de resistencia del suelo determinado mediante ensayos in situ y bajo condiciones de humedad controlada (NTP 339.175, 2002). El CBR o “Ensayo de Soporte de California”, por su nombre traducido, se basa en las normas ASTM D1883 y AASHTO T193, el cual clasifica la capacidad de un suelo mediante un número asociado al mismo, al compactar muestras de suelo a una humedad óptima de Ensayo de Proctor Modificado.

2.5.3 IMD o ADT

Las siglas IMD corresponden a la “Intensidad Media Diaria” de una carretera, parámetro fundamental del tráfico para el estudio de las características del flujo del tráfico; así como la variación, distribución y composición de las vías. Este valor corresponde a un estudio correspondiente a un determinado número de años, superponiendo oscilaciones cíclicas. El IMD es un parámetro en constante cambio, ya que depende del propio contexto y/o situación de una población, puede aumentar en zonas con incremento poblacional o disminuir en zonas rurales o de crisis económica (Belda, 2011). También se le conoce como ADT por sus siglas en inglés.

2.5.4 ADTT

Cantidad de vehículos pesados que pasan en ambas direcciones, sin contar vehículos de 4 ruedas y dos ejes, debe ser obtenida de un conteo de clasificación de camiones.

2.5.5 Módulo de Rotura (M_r o $S'c$)

Mediante el criterio de fatiga, se utiliza, como parámetros de diseño de espesores, la resistencia y esfuerzos a flexión del concreto, puesto que controlan los agrietamientos debido a las cargas repetitivas de los vehículos. Según la PCA (2019), en sus cartas y tablas de diseño, se consideran los efectos de las variaciones de resistencia de un punto

del pavimento a otro, así como también, la ganancia de resistencia con la edad; sin embargo, el diseñador no aplica directamente estos efectos y solo debe elegir el valor de promedio de Mr a los 28 días.

En Perú no está muy difundido el ensayo para obtener el Mr, se puede usar la correlación con el California Bearing Ratio (CBR), tal que: $Mr = 10.35 * CBR$ (MPa). El Mr guarda gran relación con el $f'c$, por lo tanto, también con la relación agua cemento (a/c). En la Tabla 2.1 se ven los valores de $f'c$ y Mr ante determinados a/c. Si el Mr es muy bajo, es más permeable, menos resistente y más susceptible a la abrasión. Pero si el $Mr > 50$, la losa será demasiado rígida y más susceptible a la fisuración. Becerra (2012) recomienda que en general para autopistas se use un $Mr > 42 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 2.1 Valores de $f'c$ y Mr según el a/c (Becerra, 2012)

a/c	$f'c$	Mr (kg/cm ²)	Contenido de cemento (kg/m ³)
0.7	210	35	280
0.5	280	40	350
0.45	320	45	380
0.4	420	50	415

2.5.6 Módulo de reacción de la Subrasante (K)

El K es la presión sobre el suelo, tal que tenga una deformación de 0.05 pulg. En nuestro medio la obtención de K no está muy desarrollada (Becerra, 2012), por lo que para hallarla se usan correlaciones con el California Bearing Ratio (CBR) que es más fácil de calcular, las cuales se pueden apreciar en la Figura 2.4. Esta correlación es posible debido a que el valor de K no afecta perceptiblemente al espesor del pavimento.

El valor de K depende también de la estación climatológica, siendo que en los lugares donde se produce ciclo de hielo - deshielo, el suelo se congela en invierno, para un diseño conservador se emplean valores obtenidos en verano u otoño.

Incluso, para el cálculo del K de la subrasante (K_{sr}), se puede usar las siguientes expresiones:

$$\text{CBR} < 10\% \quad K_{sr} = 2.55 + 52.5 * \log \text{CBR} \quad (\text{K en MPa/m})$$

$$\text{CBR} > 10\% \quad K_{sr} = 46 + 9.08 * (\log \text{CBR})^{4.34} \quad (\text{K en MPa/m}), \quad 1 \text{pci} = 0.27397 \text{ MPa/m}$$

Si es que el diseño de pavimento rígido considera además de la subrasante y la carpeta de concreto, una sub base, este tiene que tener un K mínimo del 60% (Becerra, 2012). Por lo tanto, el K pasaría a ser un módulo de reacción de la combinación de la subrasante y la sub base (Menéndez, 2012).

En su traducción oficial, la PCA (2019) define los valores de K cuando hay tanto subrasante como sub base, se muestran en la Figura 2.4, se diferencia las bases granulares de las tratadas con cemento.



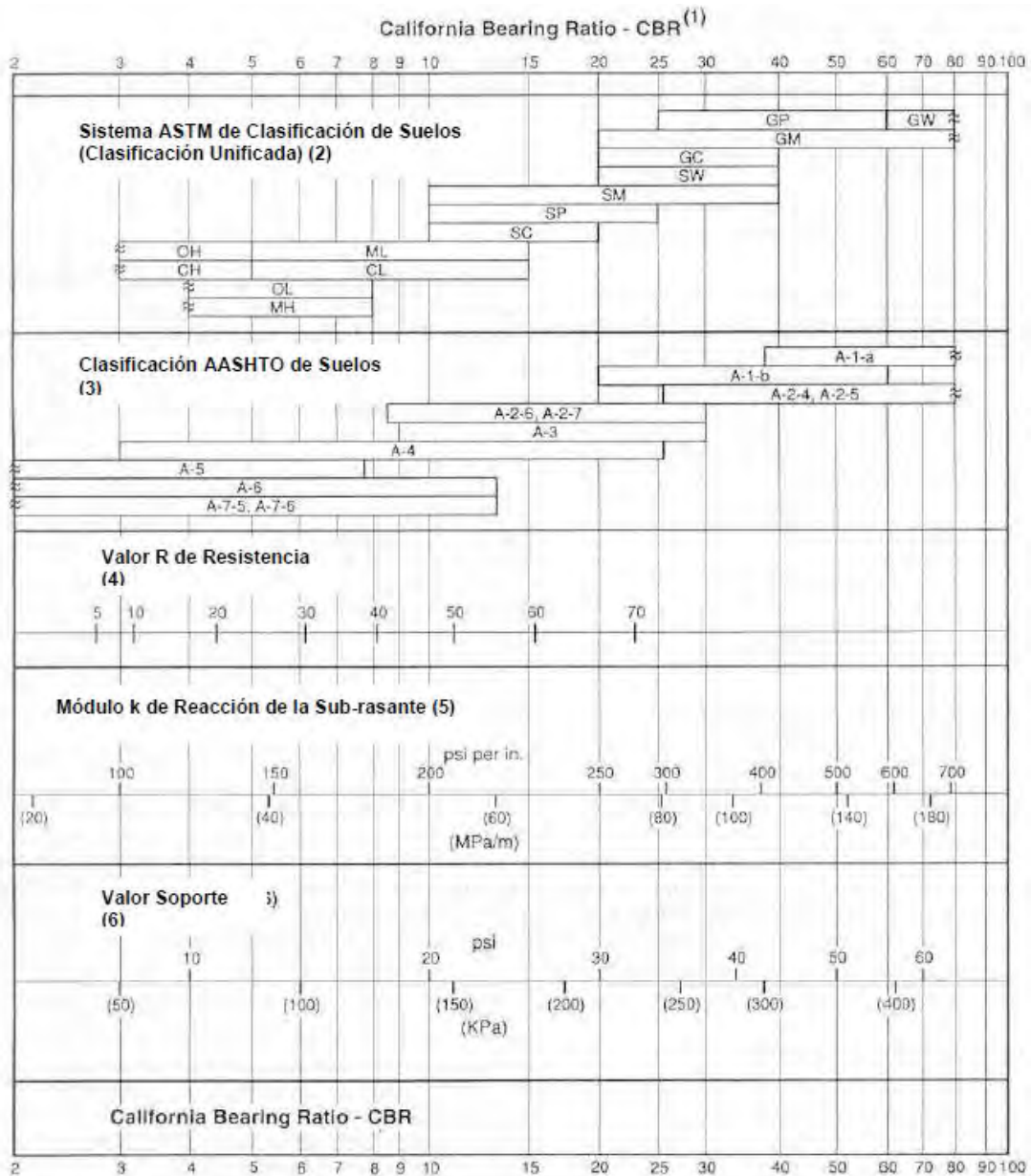


Figura 2.4 Interrelaciones aproximadas entre clasificaciones de suelos y valores soportes (CE.010, 2010)

Adicionalmente, en las Tablas 2.2 y 2.3, se presentan los efectos en el valor de K a usar de acuerdo al espesor de la subbase elegido y si se ha tratado este sueño o no.

Tabla 2.2 Efecto de la Subbase no Tratada sobre los valores de K. (PCA, 2019)

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

Tabla 2.3 Valores de k de diseño para Subbases tratadas con cemento. (PCA, 2019)

Valor de K de la Subrasante (pci)	Valor k de la Subabase (pci)			
	4 pulg	6 pulg	9 pulg	12 pulg
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	-

3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Métodos de diseño de pavimentos

3.1.1 AASHTO-93

La AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, se encarga de establecer normas y protocolos para el correcto diseño para vías de transporte en Estados Unidos. Sin embargo, los métodos de diseño y las guías que esta proporciona se suelen usar en diversos países.

La metodología AASHTO conlleva una serie de cambios desde su primera aplicación de prueba en el año 1956. En el año 1962 se publica la guía de diseño de pavimentos bajo el nombre de “Guide for Design of Pavement Structures”. Esta fue modificada hasta obtener la guía de diseño AASHTO 1993, la cual cumple con el objetivo de calcular el espesor mínimo de la capa de concreto requerida para una determinada carga de tránsito.

Según la metodología de diseño AASHTO 93, se contemplan 9 consideraciones:

- Comportamiento del pavimento
- Tráfico
- Suelo de fundación
- Materiales de construcción
- Medio ambiente
- Drenaje
- Confiabilidad
- Costos de ciclo de vida
- Diseño de bermas

3.1.1.1 Fórmula y parámetros

El método rige según la siguiente ecuación.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R * S_0 + 7.35 * \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} * \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.624 * 10^6}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 * p_t) * \log_{10} \left(\frac{S'c * C_d * (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 * J * \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{(Ec/K)^{0.25}} \right)} \right)$$

Dónde:

W18 = número previsto de ejes equivalentes a 18 kip durante el periodo de diseño

ZR = desviación normal estándar

So = error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento

D = espesor de pavimento de concreto, en pulgadas

ΔPSI=diferencia entre los índices de serviciabilidad: inicial y final

S'c= módulo de rotura para concreto de cemento Portland en psi.

J = coeficiente de transmisión de carga en las juntas

Cd = coeficiente de drenaje

Ec = módulo de elasticidad del concreto, en Mpa

K = módulo de reacción de la subrasante, dado en (pci)

3.1.1.2 Aplicación de parámetros de diseño

- El W18 se puede obtener del ADT de acuerdo a la siguiente ecuación

$$W_{18} = ESAL_{D,0} * G * D * L * 365 * Y$$

Donde:

$$ESAL_{D,0} = ADT_o * T * Tf$$

T : porcentaje de camiones en el ADT

Tf : factor camión o número de ESAL por camión

ADT_0 : Tráfico diario promedio al inicio del periodo de diseño

$ESAL_{D,0}$: Número promedio de ejes equivalentes por día al inicio del periodo de diseño

G : Tasa de crecimiento

L : factor de líneas de tráfico

D : factor de distribución direccional, en donde se considera el valor de 1 para un solo sentido y de 0.5 para 2.

Y : periodo de diseño en años

Para el cálculo de la tasa, o factor de crecimiento (G), se ha de asumir un valor de crecimiento anual (r) aplicado a la siguiente ecuación.

$$G = (1 + (1 + r)^Y) / 2$$

La Tabla 3.1 muestra los valores recomendados para L por AASHTO según el número de carriles en cada dirección de tránsito.

Tabla 3.1 Factor de líneas de tráfico. Fuente: AASHTO 1986

Nº de carriles por dirección	Porcentaje de ESAL recomendado (L)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 - 75

El valor de Tf se puede aproximar de acuerdo a la estratigrafía de la vía.

- $Tf = 2.33$ para vías de desarrollo de actividades mineras
- $Tf = 2.149$ para vías de uso general
- $Tf = 2.45$ para vías de uso industrial pesado

- $T_f = 2.3801$ para vías de uso agrícola
- La desviación normal estándar (Z_r) es un valor estadístico que depende de la confiabilidad (R) adoptada con la que se diseña el pavimento.
- La confiabilidad (R) es la probabilidad de que la serviciabilidad de la carretera sea mantenida en niveles adecuados durante toda su vida útil. Este depende del tipo de vía a diseñar y de la zona en la que se proyecta el pavimento (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Valor recomendado de confiabilidad (AASHTO, 1993)

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Carreteras de primer orden	80 – 99	75 – 95
Carreteras secundarias	80 – 95	75 – 95
Caminos vecinales	50 - 80	50 - 80

- El error estándar (S_o) es un coeficiente que contempla los errores en el diseño considerando variaciones en las propiedades de los materiales, propiedades de la subrasante, estimaciones de tráfico, condiciones climáticas y calidad de procesos constructivos. Para pavimentos rígidos, esta toma un valor de 0.34 cuando se mantiene un control constante de tráfico y de 0.39 cuando este se estima.
- El ΔPSI se calcula como la diferencia, inicial y final, de serviciabilidad de diseño.

Para efectos prácticos los valores recomendados por la Guía AASHTO son: un valor 4.2, como valor inicial y como valor final, la Norma CE:010 (2010) presenta los valores de acuerdo al tipo de vía mostrados en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Valor final de serviciabilidad recomendado (CE.010, 2010)

Tipo de vía	
Expresas	3.00
Arteriales	2.50
Colectoras	2.25
Locales y estacionamientos	2.00

- El módulo de rotura de concreto ($S'c$) se encuentra relacionado con la resistencia a compresión adoptada para el diseño del concreto mediante la siguiente fórmula:
 $S'c = 8a10\sqrt{f_c}$.

- El coeficiente de transferencia de carga (J) es la capacidad para transmitir los esfuerzos aplicados en una losa sobre sus adyacentes para minimizar los esfuerzos y deformaciones, mediante barras de transferencia de acero liso denominadas comúnmente “pasadores”. Este coeficiente adopta un valor de acuerdo al uso o no de pasadores:

$$J = 3.2 \text{ (con barras de transferencia)}$$

$$J = 4.2 \text{ (sin barras de transferencia)}$$

- El coeficiente de drenaje (C_d) con la precipitación de la zona en la cual se va a implementar el pavimento según la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores de C_d recomendados por la AASHTO para pavimentos rígidos (CE.010, 2010)

C_d	Tiempo transcurrido para que el suelo libere el 50% de su agua libre	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento estará expuesta a niveles de humedad cercanas a la saturación			
		Menos a 1%	1 - 5%	5 - 25%	Más de 25%
Excelente	2 horas	1,25 - 1,20	1,0 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10
Bueno	1 día	1,20 - 1,15	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00
Regular	1 semana	1,15 - 1,10	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90
Pobre	1 mes	1,10 - 1,00	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80
Muy pobre	Nunca	1,00 - 0,90	0,90 - 0,80	0,80 - 0,70	0,70

- El módulo de elasticidad (E_c) se encuentra relacionado con la resistencia a compresión adoptada para el diseño del concreto mediante la siguiente fórmula: $E_c=57000\sqrt{f_c}$

Previo al diseño de pavimento se debe realizar un estudio de suelos. De los resultados del mismo, de acuerdo a la clasificación del suelo según AASHTO, se puede determinar un valor de CBR.

- El módulo de reacción (K) de la capa inferior al concreto se determina mediante su relación con el CBR con la aplicación de la Figura 2.4.

3.1.2 PCA

El método PCA (Portland Cement Association) es el uso en conjunto de láminas, tablas y nomogramas para calcular el mínimo espesor de pavimento para unas solicitaciones de carga previstas en un tiempo de diseño determinado, con el menor costo total de construcción y mantenimiento (Becerra, 2012). Por un lado, la finalidad del análisis por fatiga es determinar el espesor mínimo del concreto necesario para controlar el agrietamiento por la fatiga. Por otro lado, la finalidad del análisis por erosión es calcular el espesor mínimo del pavimento necesario para controlar la erosión en las fallas.

Se puede aplicar en pavimentos de concreto simple con juntas (JPCP), pavimentos de concreto armado con barras transversales (JRCP) y pavimentos de concreto continuamente reforzado (CRCP). Previamente se debe realizar la selección del tipo de pavimento rígido, tipo de subbase y tipo de confinamiento lateral.

3.1.2.1 Parámetros de Diseño del espesor del Pavimento rígido

- i. Módulo de rotura (M_r)
- ii. Módulo de reacción de la subrasante (K)
- iii. Tipo de tránsito y su proyección futura

Se requiere conocer la frecuencia, tipo y peso de los vehículos pesados. Estos parámetros se hallan a partir del estudio de tránsito. El número de vehículos pesados que pasan por el carril más cargado en un día es el ADTT multiplicado por factores de dirección y de número de carriles por sentido.

Factor de distribución por dirección: 1 sentido= 1, 2 sentidos= 50%. Factor de distribución por carril: Se muestra la Figura 3.1.

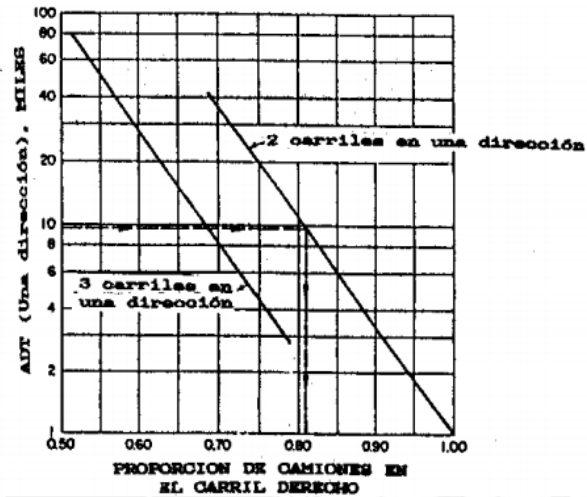


Figura 3.1 Factor de distribución de camiones en un carril cuando hay 2 o 3 en una misma dirección (PCA, 2019)

Asimismo, se debe tomar en cuenta las proyecciones de crecimiento del tráfico durante el tiempo de diseño. En la Tabla 3.5 se puede notar las tasas de crecimiento anual y la proyección de crecimiento para 20 y 40 años.

Tabla 3.5 Tasas anuales de crecimiento de Tráfico y factores de Proyecciones correspondientes. Tomado de PCA (2019)

Tasa anual de crecimiento de tráfico (%)	Factor de Proyección de 20 años	Factor de Proyección de 40 años
1	1.1	1.2
1.5	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2.5	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3.5	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4.5	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5.5	1.7	2.9
6	1.8	3.2

También se debe tomar en cuenta la distribución de ejes de carga. Dado que los ejes son clasificados en simples, tandem o tridem, la cantidad de ejes con determinada carga se agrupan para cada 2 kips en el caso de ejes simples y para cada 4 kips en el caso de los tandems o tridem (Menéndez, 2012).

iv. Periodo de diseño

Dado que la definición de tiempo de vida útil de un pavimento no es precisa, la PCA utiliza el término equivalente de Periodo de Diseño. Este valor puede variar dependiendo de si se realiza un adecuado diseño, proceso constructivo y elección de materiales. De esta forma, en condiciones óptimas, puede llegar a alcanzar los 40 años, y si las condiciones son inadecuadas, puede ser menos de 20. La importancia de este parámetro de diseño radica en que, según su valor, el pavimento se diseña para soportar la carga de más o de menos vehículos, por lo que varía directamente el espesor. Generalmente, se toma como valor promedio un periodo de diseño de 20 años.

3.1.2.2 Proceso de diseño

- Proceso de Diseño con Datos de Cargas por eje

En primer lugar, se debe proponer un paquete estructural del pavimento, es decir un espesor de pavimento y módulo de rotura, así como el mecanismo de transferencia de cargas entre los paños y el de confinamiento lateral, como solución primaria para las condiciones de vía en estudio. Luego, con el paquete propuesto, se inicia con el proceso de diseño, empezando por las verificaciones de los análisis por fatiga y erosión, los cuales se explicarán de la siguiente manera:

- Verificación por Fatiga

Esta verificación se basa en la determinación del esfuerzo de tensión equivalente, para esto se emplea las siguientes figuras que dependen de si el pavimento propuesto posee o no bermas de concreto como mecanismo de confinamiento lateral. Entonces, con el K combinado se ingresa con el espesor de concreto, además de si se trata de un eje simple o tándem.

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

Figura 3.2 Tabla de Tensión equivalente, sin berma de concreto (eje simple/ tándem). Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	640/534	559/468	517/439	489/422	452/403	409/388	383/384
4.5	547/461	479/400	444/372	421/356	390/338	355/322	333/316
5	475/404	417/349	387/323	367/308	341/290	311/274	294/267
5.5	418/360	368/309	342/285	324/271	302/254	276/238	261/231
6	372/325	327/277	304/255	289/241	270/225	247/210	234/203
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236/198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116
9.5	200/190	176/160	164/146	157/137	147/126	136/114	129/108
10	186/179	164/151	153/137	146/129	137/118	127/107	121/101
10.5	174/170	154/143	144/130	137/121	128/111	119/101	113/95
11	164/161	144/135	135/123	129/115	120/105	112/95	106/90
11.5	154/153	136/128	127/117	121/109	113/100	105/90	100/85
12	145/146	128/122	120/111	114/104	107/95	99/86	95/81
12.5	137/139	121/117	113/106	108/99	101/91	94/82	90/77
13	130/133	115/112	107/101	102/95	96/86	89/78	85/73
13.5	124/127	109/107	102/97	97/91	91/83	85/74	81/70
14	118/122	104/103	97/83	93/87	87/79	81/71	77/67

Figura 3.3 Tabla de Tensión equivalente, con bermas de concreto (eje simple/ tándem). Tomado de *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*.

Posteriormente, se determina el factor de tensión, mediante la división de la tensión equivalente obtenida y el módulo de rotura a flexión (M_r) del concreto a 28 días. En la Figura 3.4 se muestra el procedimiento para obtener el factor de tensión.

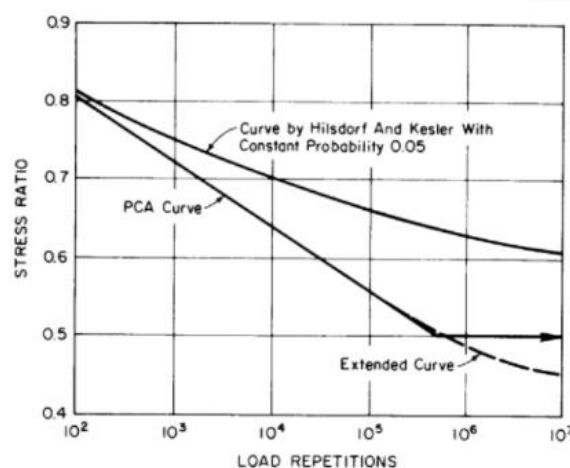


Figura 3.4 Factor de tensión. Tomado de *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*.

Luego, se procede con la determinación de las repeticiones de carga admisible para el análisis por fatiga. Para esto se necesita trabajar con el ábaco mostrado en la Figura 3.5, mediante el nivel de carga por eje, antes amplificado por el factor de seguridad (FSC), y

con el tipo de eje, simple o tándem, por último, se proyecta sobre la línea del ábaco con el factor de tensión obtenido, con esto se obtiene las repeticiones de carga admisible.

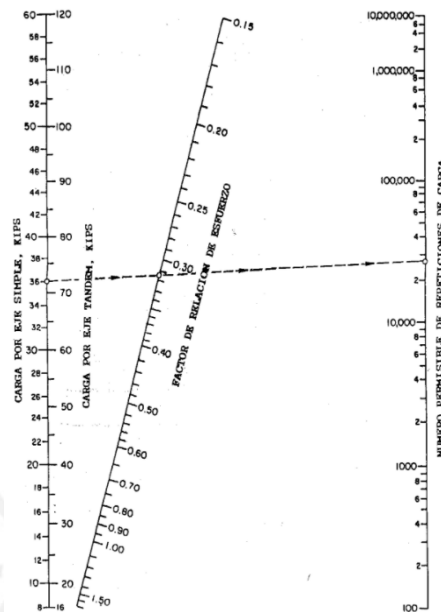


Figura 3.5 Ábaco para el análisis de fatiga para las repeticiones de carga admisible. Tomado de *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*.

Finalmente, se calcula el porcentaje de fatiga consumida, este se obtiene dividiendo el número de cargas previstas con el número de cargas admisibles, y estos para ejes simples y tandem se deben de sumar y verificar que el valor de fatiga consumida no supere el 100%. Entonces, si el valor de fatiga superase el 100%, se debe repetir el análisis cambiando las variables estructurales hasta que no supere el 100% y si no superase este porcentaje se podría ajustar el diseño en concordancia con el análisis por erosión.

- Verificación por Erosión

Esta verificación se basa en la determinación del factor de erosión. Para esto, previamente se debe escoger si el pavimento propuesto posee o no berma de concreto como mecanismo de confinamiento, y si presenta o no Dowels. Entonces, con esto, se ingresa con el espesor de concreto, con el K combinado, y si la carga es con eje simple o tándem. En las siguientes figuras, se muestran las tablas a utilizar en la verificación por erosión.

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

Figura 3.6 Tabla de factor de erosión con Dowels y sin bermas de concreto. Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.94/4.03	3.91/3.95	3.88/3.89	3.86/3.86	3.82/3.83	3.77/3.80
4.5	3.79/3.91	3.76/3.82	3.73/3.75	3.71/3.72	3.68/3.68	3.64/3.65
5	3.66/3.81	3.63/3.72	3.60/3.64	3.58/3.60	3.55/3.55	3.52/3.52
5.5	3.54/3.72	3.51/3.62	3.48/3.53	3.46/3.49	3.43/3.44	3.41/3.40
6	3.44/3.64	3.40/3.53	3.37/3.44	3.35/3.40	3.32/3.34	3.30/3.30
6.5	3.34/3.56	3.30/3.46	3.26/3.36	3.25/3.31	3.22/3.25	3.20/3.21
7	3.26/3.49	3.21/3.39	3.17/3.29	3.15/3.24	3.13/3.17	3.11/3.13
7.5	3.18/3.43	3.13/3.32	3.09/3.22	3.07/3.17	3.04/3.10	3.02/3.06
8	3.11/3.37	3.05/3.26	3.01/3.16	2.99/3.10	2.96/3.03	2.94/2.99
8.5	3.04/3.32	2.98/3.21	2.93/3.10	2.91/3.04	2.88/2.97	2.87/2.93
9	2.98/3.27	2.91/3.16	2.86/3.05	2.84/2.99	2.81/2.92	2.79/2.87
9.5	2.92/3.22	2.85/3.11	2.80/3.00	2.77/2.94	2.75/2.86	2.73/2.81
10	2.86/3.18	2.79/3.06	2.74/2.95	2.71/2.89	2.68/2.81	2.66/2.76
10.5	2.81/3.14	2.74/3.02	2.68/2.91	2.65/2.84	2.62/2.76	2.60/2.72
11	2.77/3.10	2.69/2.98	2.63/2.86	2.60/2.80	2.57/2.72	2.54/2.67
11.5	2.72/3.06	2.64/2.94	2.58/2.82	2.55/2.76	2.51/2.68	2.49/2.63
12	2.68/3.03	2.60/2.90	2.53/2.78	2.50/2.72	2.46/2.64	2.44/2.59
12.5	2.64/2.99	2.55/2.87	2.48/2.75	2.45/2.68	2.41/2.60	2.39/2.55
13	2.60/2.96	2.51/2.83	2.44/2.71	2.40/2.65	2.36/2.56	2.34/2.51
13.5	2.56/2.93	2.47/2.80	2.40/2.68	2.36/2.61	2.32/2.53	2.30/2.48
14	2.53/2.90	2.44/2.77	2.36/2.65	2.32/2.58	2.28/2.50	2.25/2.44

Figura 3.7 Tabla de factor de erosión sin Dowels y sin bermas de concreto. Tomado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.28/3.30	3.24/3.20	3.21/3.13	3.19/3.10	3.15/3.09	3.12/3.08
4.5	3.13/3.19	3.09/3.08	3.06/3.00	3.04/2.96	3.01/2.93	2.98/2.91
5	3.01/3.09	2.97/2.98	2.93/2.89	2.90/2.84	2.87/2.79	2.85/2.77
5.5	2.90/3.01	2.85/2.89	2.81/2.79	2.79/2.74	2.76/2.68	2.73/2.65
6	2.79/2.93	2.75/2.82	2.70/2.71	2.68/2.65	2.65/2.58	2.62/2.54
6.5	2.70/2.86	2.65/2.75	2.61/2.63	2.58/2.57	2.55/2.50	2.52/2.45
7	2.61/2.79	2.56/2.68	2.52/2.56	2.49/2.50	2.46/2.42	2.43/2.38
7.5	2.53/2.73	2.48/2.62	2.44/2.50	2.41/2.44	2.38/2.36	2.35/2.31
8	2.46/2.68	2.41/2.56	2.36/2.44	2.33/2.38	2.30/2.30	2.27/2.24
8.5	2.39/2.62	2.34/2.51	2.29/2.39	2.26/2.32	2.22/2.24	2.20/2.18
9	2.32/2.57	2.27/2.46	2.22/2.34	2.19/2.27	2.16/2.19	2.13/2.13
9.5	2.26/2.52	2.21/2.41	2.16/2.29	2.13/2.22	2.09/2.14	2.07/2.08
10	2.20/2.47	2.15/2.36	2.10/2.25	2.07/2.18	2.03/2.09	2.01/2.03
10.5	2.15/2.43	2.09/2.32	2.04/2.20	2.01/2.14	1.97/2.05	1.95/1.99
11	2.10/2.39	2.04/2.28	1.99/2.16	1.95/2.09	1.92/2.01	1.89/1.95
11.5	2.05/2.35	1.99/2.24	1.93/2.12	1.90/2.05	1.87/1.97	1.84/1.91
12	2.00/2.31	1.94/2.20	1.88/2.09	1.85/2.02	1.82/1.93	1.79/1.87
12.5	1.95/2.27	1.89/2.16	1.84/2.05	1.81/1.98	1.77/1.89	1.74/1.84
13	1.91/2.23	1.85/2.13	1.79/2.01	1.76/1.95	1.72/1.86	1.70/1.80
13.5	1.86/2.20	1.81/2.09	1.75/1.98	1.72/1.91	1.68/1.83	1.65/1.77
14	1.82/2.17	1.76/2.06	1.71/1.95	1.67/1.88	1.64/1.80	1.61/1.74

Figura 3.8 Tabla de factor de erosión con Dowels y con bermas de concreto. Tomado de *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*.

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.46/3.49	3.42/3.39	3.38/3.32	3.36/3.29	3.32/3.26	3.28/3.24
4.5	3.32/3.39	3.28/3.28	3.24/3.19	3.22/3.16	3.19/3.12	3.15/3.09
5	3.20/3.30	3.16/3.18	3.12/3.09	3.10/3.05	3.07/3.00	3.04/2.97
5.5	3.10/3.22	3.05/3.10	3.01/3.00	2.99/2.95	2.96/2.90	2.93/2.86
6	3.00/3.15	2.95/3.02	2.90/2.92	2.88/2.87	2.86/2.81	2.83/2.77
6.5	2.91/3.08	2.86/2.96	2.81/2.85	2.79/2.79	2.76/2.73	2.74/2.68
7	2.83/3.02	2.77/2.90	2.73/2.78	2.70/2.72	2.68/2.66	2.65/2.61
7.5	2.76/2.97	2.70/2.84	2.65/2.72	2.62/2.66	2.60/2.59	2.57/2.54
8	2.69/2.92	2.63/2.79	2.57/2.67	2.55/2.61	2.52/2.53	2.50/2.48
8.5	2.63/2.88	2.56/2.74	2.51/2.62	2.48/2.55	2.45/2.48	2.43/2.43
9	2.57/2.83	2.50/2.70	2.44/2.57	2.42/2.51	2.39/2.43	2.36/2.38
9.5	2.51/2.79	2.44/2.65	2.38/2.53	2.36/2.46	2.33/2.38	2.30/2.33
10	2.46/2.75	2.39/2.61	2.33/2.49	2.30/2.42	2.27/2.34	2.24/2.28
10.5	2.41/2.72	2.33/2.58	2.27/2.45	2.24/2.38	2.21/2.30	2.19/2.24
11	2.36/2.68	2.28/2.54	2.22/2.41	2.19/2.34	2.16/2.26	2.14/2.20
11.5	2.32/2.65	2.24/2.51	2.17/2.38	2.14/2.31	2.11/2.22	2.09/2.16
12	2.28/2.62	2.19/2.48	2.13/2.34	2.10/2.27	2.06/2.19	2.04/2.13
12.5	2.24/2.59	2.15/2.45	2.09/2.31	2.05/2.24	2.02/2.15	1.99/2.10
13	2.20/2.56	2.11/2.42	2.04/2.28	2.01/2.21	1.98/2.12	1.95/2.06
13.5	2.16/2.53	2.08/2.39	2.00/2.25	1.97/2.18	1.93/2.09	1.91/2.03
14	2.13/2.51	2.04/2.36	1.97/2.23	1.93/2.15	1.89/2.06	1.87/2.00

Figura 3.9 Tabla de factor de erosión sin Dowels y con bermas de concreto. Tomado de *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*.

Luego, se procede con la determinación de las repeticiones de carga admisible para el análisis de erosión. Por lo que, se procede a trabajar con el ábaco que se muestra en la Figura 3.10, mediante el nivel de carga de eje, el tipo de eje y proyectando sobre la línea del ábaco con el valor del factor erosión obtenido, entonces se obtiene las repeticiones de carga admisibles.

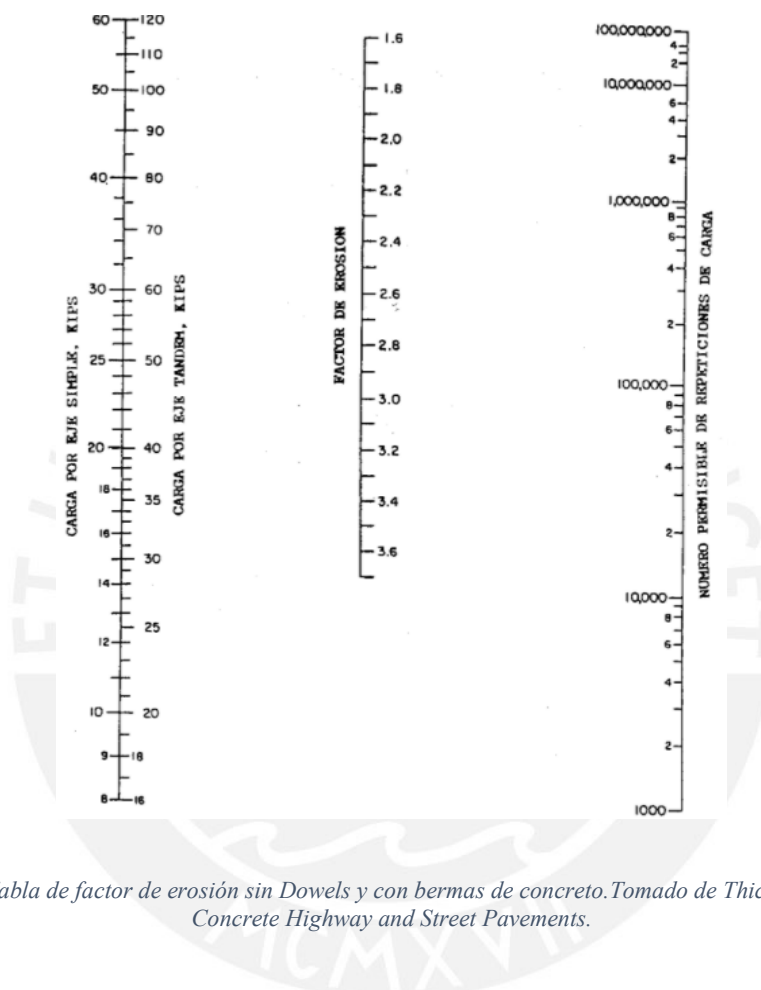


Figura 3.10 Tabla de factor de erosión sin Dowels y con bermas de concreto. Tomado de *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*.

Finalmente, se calcula el porcentaje de erosión consumido, que se obtiene al dividir el número de cargas previstas con el número de cargas admisibles. Entonces, una vez calculado los porcentajes de erosión consumidos, se deben de sumar y verificar que ese valor no supere el 100%. Al igual que la verificación por el análisis de fatiga, se debe de evaluar ambos criterios antes de confirmar la estructura del pavimento propuesto.

3.1.2.3 Proceso de Diseño sin Datos de carga por eje (Diseño Simplificado)

El diseño simplificado que presenta la PCA se utiliza cuando no se tienen los datos de carga por eje disponibles, es decir, cuando no se ha realizado un estudio para

determinarlas o no se disponen de otras fuentes para obtenerlas. En este se contempla, de forma indirecta, la secuencia de pasos para hallar el espesor de la capa de concreto según los criterios de fatiga y erosión, por lo que, no es necesaria una verificación independiente de ellos.

La secuencia del procedimiento, según PCA (2019), es tal como se describe a continuación:

1. Se estima el ADTT con base en el ADT y el porcentaje de camiones (excluyendo camiones de ejes dobles y de 4 ruedas) asociado.
2. Se selecciona la Categoría de carga por eje del pavimento a diseñar
3. Se halla el valor de $K_{\text{subrasante}}$ asociado al CBR del pavimento.
4. Se halla el K_{subbase} , corrigiendo el $K_{\text{subrasante}}$, de acuerdo al espesor de la subbase.
5. Con K_{subbase} y el valor de ADTT, se utilizan las Tablas de Diseño Simplificado para hallar el espesor de la losa. Se elige la tabla con la que se diseña dependiendo de la Categoría de carga por eje, presencia o no presencia de bermas de concreto y dowels en las juntas.

Las Tablas para el Diseño Simplificado se muestran a continuación.

	Sin Berna de Concreto o Sardinel				Con Berna de Concreto o Sardinel			
	Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase			Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase		
		Bajo	Mediano	Alto		Bajo	Mediano	Alto
MR = 650 PSI	4.5			0.1	4		0.2	0.9
	5			3	4.5	2	8	25
	5.5	0.1	0.8	3	5	30	130	330
	6	3	15	45	5.5	320		
	6.5	40	160	430				
MR = 600 PSI	5		0.1	0.4	4			0.1
	5.5	0.5	3	9	4.5	0.2	1	5
	6	8	36	98	5	6	27	75
	6.5	76	300	760	5.5	73	290	730
	7	520			6	610		
MR = 550 PSI	5.5	0.1	0.3	1	4.5		0.2	0.6
	6	1	6	18	5	0.8	4	13
	6.5	13	60	160	5.5	13	57	150
	7	110	400		6	130	480	
	7.5	620						

Figura 3.11 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 1, pavimento con trabazón de agregados en las juntas. (PCA, 2019).

Sin Berna de Concreto o Sardinel					Con Berna de Concreto o Sardinel					
Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto		Bajo	Medio	Alto	Ma	
MR = 650 PSI	5.5				5		3	9	42	
	6		4	12	59	5.5	9	42	120	450
	6.5	9	43	120	490	6	96	380	970	3400
	7	80	320	840	3100	6.5	710	2600		
	7.5	490	1900			7	4200			
8	2500									
MR = 600 PSI	6				11	5		1	8	
	6.5		8	24	110	5.5	1	8	23	98
	7	15	70	190	750	6	19	84	220	810
	7.5	110	440	1100		6.5	160	620	1500	5200
	8	590	2300			7	1000	3600		
8.5	2700									
MR = 550 PSI	6.5		4	19		5.5		3	17	
	7		11	34	150	6	3	14	41	160
	7.5	19	84	230	890	6.5	29	120	320	1100
	8	120	470	1200		7	210	770	1900	
	8.5	560	2200			7.5	1100	4000		
9	2400									

Figura 3.12 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 2, pavimento con dowels en las juntas. (PCA, 2019).

Sin Berna de Concreto o Sardinel					Con Berna de Concreto o Sardinel					
Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto		Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
MR = 650 PSI	7.5				250	6.5		83	320	
	8		130	350	1,300	7	52	220	550	1,900
	8.5	160	640	1,600	6,200	7.5	320	1,200	2,900	9,800
	9	700	2,700	7,000	11,500**	8	1,600	5,700	13,800	
	9.5	2,700	10,800			8.5	6,900	23,700**		
10	9,900									
MR = 600 PSI	8			73	310	6.5			67	
	8.5		140	380	1,500	7		120	440	
	9	160	640	1,700	6,200	7.5		270	680	2,300
	9.5	630	2,500	6,500		8	370	1,300	3,200	10,800
	10	2,300	9,300			8.5	1,600	5,800	14,100	
10.5	7,700				9	6,600				
MR = 550 PSI	8.5		70	300		7			82	
	9		120	340	1,300	7.5		130	480	
	9.5	120	520	1,300	5,100	8	67	270	670	2,300
	10	460	1,900	4,900	19,100	8.5	330	1,200	2,900	9,700
	10.5	1,600	6,500	17,400		9	1,400	4,900	11,700	
11	4,900				9.5	5,100	18,600			

Figura 3.13 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 3, pavimento con dowels en las juntas (PCA, 2019).

Sin Berna de Concreto o Sardinel					Con Berna de Concreto o Sardinel						
Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase					
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto		Bajo	Medio	Alto	Muy Alto		
MR = 650 PSI	7.5	60**			250**	7	220**	510	750		
	8	130**	350**	830	7.5	320**	640	890	1.400		
	8.5	160**	640**	900	1.300	8	610	1.100	1.500	2.500	
	9	680	1.000	1.300	2.000	8.5	950	1.800	2.700	4.700	
	9.5	960	1.500	2.000	2.900	9	1.500	2.900	4.600	8.700	
	10	1.300	2.100	2.800	4.300	9.5	2.300	4.700	8.000		
	10.5	1.800	2.900	4.000	6.300	10	3.500	7.700			
	11	2.500	4.000	5.700	9.200	10.5	5.300				
	11.5	3.300	5.500	7.900							
12	4.400	7.500									
MR = 600 PSI	8	73**			310**	7	120**			440**	
	8.5	140**			380**	1.300	7.5	67**	270**	680**	1.400
	9	160**	640**	1.300	2.000	8	370**	1.100	1.500	2.500	
	9.5	630**	1.500	2.000	2.900	8.5	950	1.800	2.700	4.700	
	10	1.300	2.100	2.800	4.300	9	1.500	2.900	4.600	8.700	
	10.5	1.800	2.900	4.000	6.300	9.5	2.300	4.700	8.000		
	11	2.500	4.000	5.700	9.200	10	3.500	7.700			
	11.5	3.300	5.500	7.900							
	12	4.400	7.500								
MR = 550 PSI	8	56**				7	82**				
	8.5	70**			300**	7.5	130**			480**	
	9	120**	340**	1.300**		8	67**	270**	670**	2.300**	
	9.5	120**	520**	1.300**	2.900	8.5	330**	1.200**	2.700	4.700	
	10	460**	1.900**	2.800	4.300	9	1.400**	2.900	4.600	8.700	
	10.5	1.600**	2.900	4.000	6.300	9.5	2.300	4.700	8.000		
	11	2.500	4.000	5.700	9.200	10	3.500	7.700			
	11.5	3.300	5.500	7.900							
	12	4.400	7.500								

Figura 3.14 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 3, pavimento con trabazón de agregados en las juntas. (PCA, 2019).

Sin Berna de Concreto o Sardinel					Con Berna de Concreto o Sardinel							
Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase						
	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto		Bajo	Medio	Alto	Muy Alto			
MR = 650 PSI	8				270	7				400		
	8.5	120			340	1.300	7.5	240			620	2.100
	9	140	580	1.500	5.600	8	330	1.200	3.000	9.800		
	9.5	570	2.300	5.900	14.700**	8.5	1.500	5.300	12.700	41.100**		
	10	2.000	8.200	18.700**	25.900**	9	5.900	21.400	44.900**			
	10.5	6.700	24.100**	31.800**	45.800**	9.5	22.500	52.000**				
	11	21.600	39.600**			10	45.200**					
11.5	39.700**											
MR = 600 PSI	8.5				300	7.5	130			490		
	9	120			340	1.300	8	270			690	2.300
	9.5	120	530	1.400	5.200	8.5	340	1.300	3.000	9.900		
	10	480	1.900	5.100	19.300	9	1.400	5.000	12.000	40.200		
	10.5	1.600	6.500	17.500	45.900**	9.5	5.200	18.800	45.900			
	11	4.900	21.400	53.800**		10	18.400					
	11.5	14.500	65.000**									
12	44.000											
MR = 550 PSI	9				260	8	130			480		
	9.5	280			1.100	8.5	250			620	2.100	
	10	390			1.100	4.000	9	280	1.000	2.500	8.200	
	10.5	320	1.400	3.600	13.800	9.5	1.100	3.900	9.300	30.700		
	11	1.000	4.300	11.600	46.600	10	3.800	13.600	32.900			
	11.5	3.000	13.100	37.200		10.5	12.400	46.200				
	12	8.200	40.000			11	40.400					

Figura 3.15 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 4, pavimento con dowels en las juntas (PCA, 2019).

Sin Berna de Concreto o Sardinel					Con Berna de Concreto o Sardinel					
Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				Espesor de losa (pulg.)	Soporte de Subrasante - subbase				
	Bajo	Medio	Alto	May Alto		Bajo	Medio	Alto	May Alto	
MR = 650 PSI	8			270**	7		100**	400**		
	8.5		120**	340**	990	7.5		240**	910	
	9	140**	580**	1.100	1.500	8	330**	770	1.100	1.700
	9.5	570**	1.200	1.600	2.300	8.5	720	1.300	1.900	3.100
	10	1.100	1.700	2.200	3.400	9	1.100	2.100	3.200	5.700
	10.5	1.500	2.300	3.200	4.900	9.5	1.700	3.400	5.500	10.200
	11	2.000	3.300	4.500	7.200	10	2.600	5.500	9.200	17.900
	11.5	2.700	4.500	6.300	10.400					
	12	3.600	6.100	8.800	14.900	11	5.900	13.600	24.200	
	13	6.300	11.100	16.800		12	12.800			
14	10.800									
MR = 600 PSI	8.5			300**	7.5		130**	490**		
	9		120**	340**	1.300**	8		270**	690**	1.700
	9.5	120**	530**	1.400**	2.300	8.5	340**	1.300**	1.900	3.100
	10	480**	1.700	2.200	3.400	9	1.100	2.100	3.200	5.700
	10.5	1.500	2.300	3.200	4.900	9.5	1.700	3.400	5.500	10.200
	11	2.000	3.300	4.500	7.200	10	2.600	5.500	9.200	17.900
	11.5	2.700	4.500	6.300	10.400					
	12	3.600	6.100	8.800	14.900	11	5.900	13.600	24.200	
	13	6.300	11.100	16.800		12	12.800			
	14	10.800								
MR = 500 PSI	9			260**	8		130**	480**		
	9.5		280**	1.100**		8.5	250**	620**	2.100**	
	10		390**	1.100**	3.400	9	280**	1.000**	2.500**	5.700
	10.5	320**	1.400**	3.200	4.900	9.5	1.100**	3.400	5.500	10.200
	11	1.000**	3.300	4.500	7.200	10	2.600	5.500	9.200	17.900
	11.5	2.700	4.500	6.300	10.400					
	12	3.600	6.100	8.800	14.900	11	5.900	13.600	24.200	
	13	6.300	11.100	16.800		12	12.800			
	14	10.800								

Figura 3.16 Tabla de Diseño Simplificado para Categoría 4, pavimento con trabazón de agregados en las juntas. (PCA, 2019).

3.2 Comparación

3.2.1 Resultados de diseño de Pavimentos rígidos

Con la finalidad de poder comparar los diseños de espesores según los métodos descritos, se considerarán como valores constantes los siguientes parámetros. Cabe resaltar que se tendrán en cuenta 3 porcentajes diferentes de CBR para los cálculos. En la Tabla 3.6 se presentan estos datos. Los cálculos realizados para determinar estos valores se presentan en los Anexos 1 y 2 para el diseño según el método AASHTO y PCA, respectivamente.

Tabla 3.6 Parámetros establecidos de entrada

CBR (subrasante)	4%
	8%
	15%
Espesor de subbase	6 pulg
Carriles	4 (2 ida y 2 vuelta)
ADT=IMDA	15000
ADTT (%)	15
Periodo diseño	20 años
Tasa crec. anual (r)	4%
f'c (kg/cm ²)	280
Mr	600 PSI

3.2.1.1 AASHTO

Se presenta la siguiente tabla resumen de los resultados obtenidos de espesor de losa mediante el método de AASHTO para distintos CBR escogidos, considerando un valor de $W18 = 25343574,9$; cuyos cálculos pueden revisarse al final del presente informe (ver anexo 1).

Tabla 3.7 Resultados de diseño AASHTO

CBR	K (pci)	Kdiseño (pci)	Espesor calculado (in)	Espesor calculado (cm)
4%	120	160	13.22	34
8%	180	210	13.09	33
15%	225	255	13.01	33

3.2.1.2 PCA

Se presenta la siguiente tabla resumen de los resultados obtenidos de espesor de losa mediante el método de PCA para distintos CBR escogidos.

Tabla 3.8 Resultados de diseño PCA

CBR	ADTT permisible	K (pci)	Kdiseño (pci)	Espesor de losa (in)	Espesor de losa (cm)
4%	5800	120	160	8.5	22
8%	14100	180	210	8.5	22
15%	10800	225	255	8	20

3.2.2 Discusión crítica

3.2.2.1 Comparación de metodologías

- AASHTO 93 implica indirectamente el confort para el usuario mediante servicialidad en la variable (delta PSI).
- En el método PCA 84 utiliza el número de repeticiones que causa agrietamientos, que depende del módulo de rotura (M_r).
- Tanto PCA 84 como AASHTO 93 consideran el módulo de reacción de la subrasante (K) y se puede calcular de acuerdo al CBR o el tipo de suelo y su clasificación.
- PCA 84 diseña para un periodo de diseño y AASHTO 93 considera un valor de $ESAL=W18$ que depende también de dicho parámetro. Ambos métodos consideran una tasa de crecimiento anual por lo que se contempla el incremento de tráfico durante el periodo de diseño.
- PCA 84 considera los ejes tridem, mientras que el AASHTO 93 determina un valor de W18 equivalente a 18 kip durante el periodo de diseño.
- Si no se dispone de estudios de tráfico precisos, el PCA 84 propone un método simplificado equivalente, mientras que AASHTO 93 presenta un valor alterno de S_o .
- PCA 84 usa dos criterios de verificación: fatiga y erosión; AASHTO 93 tiene un único diseño de acuerdo a sus parámetros propuestos.
- Ambos diseños tienen consideraciones de acuerdo a si se usan pasadores en las juntas transversales o no.
- Solo el método PCA 84 considera la presencia de bermas de concreto o sardineles en sus tablas de diseño.

- Ambos son aplicables para los siguientes tipos de pavimento rígido: JPCP, JRCP y CRCP.

3.2.2.2 Comparación de resultados

De acuerdo a los valores calculados en 3.2.1 Resultado de diseño de Pavimentos Rígidos para cada una de las metodologías considerando 3 valores diferentes de CBR, se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Resultado de diseño de Pavimentos Rígidos para cada una de las metodologías de acuerdo al valor de CBR.

CBR	Espesor (pulg)		Variación (%)
	AASHTO	PCA	
4%	34	22	-35,70
8%	33	22	-35,06
15%	33	20	-38,51

La variación presentada en la Tabla 3.9, toma en cuenta el valor más conservador que fue obtenido por AASHTO. No obstante, para dicha comparación se tomó en consideración el espesor calculado de AASHTO 93 que genera el equilibrio. El espesor de diseño para los 3 casos propuestos corresponde a un valor de 33 cm.

- Los espesores obtenidos con el método AASHTO 93 son mayores que los obtenidos con el PCA, la variación entre los espesores es mayor al 35% respecto al AASHTO.
- Para los 3 valores de CBR, el espesor hallado con PCA 84 varía en 2 cm, mientras que con AASHTO 93 varía 1 cm a pesar de la amplia diferencia en los valores considerados de CBR.
- El espesor de 22 cm cumple tanto para un CBR de 4%, como de 8%.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Los espesores obtenidos según la metodología PCA 84 son menores que los obtenidos con el método AASHTO 93. Con ello, se concluye que el método AASHTO 93 es mucho más conservador que PCA 84.
- Debido a que con el uso del método PCA 84 se obtienen espesores de carpeta de rodadura, se puede considerar que este método es más económico en la práctica que el AASHTO 93 debido a la reducción en el material a usar en la construcción.
- Como no se cuenta con estudios de tráfico, se usa el método PCA 84 simplificado y el AASHTO 93 con $S_o=0.35$.
- Ambos métodos de diseño cumplen con el espesor de la capa de rodadura para pavimento rígido requerido de más de 150 mm de acuerdo a la Norma E.050 de Suelos y cimentaciones.
- Según los resultados obtenidos mediante el diseño de AASHTO 93, se puede observar que los espesores calculados no varían en exceso al considerar diferentes CBR y, en consecuencia, diferentes módulos K de reacción de subrasante. A continuación, se muestran los resultados obtenidos modificando uno solo de los parámetros de entrada, considerando un valor estándar de CBR de 8%.

Tabla 4.1 Resultados de AASHTO 93 modificando parámetros de entrada.

AASHTO 93				D (in)
Parámetros iniciales iguales, considerando CBR = 8%, modificando los siguientes parámetros.				13.09
Fc =	300 kg/cm ²	S'c=	620 psi	12.89
Fc =	350 kg/cm ²	S'c=	670 psi	12.39
Δ PSI=			2	12.79
Cd excelente =			1.1	12.39
Cd pobre =			0.8	14.69

Como se observa en la tabla anterior, el espesor obtenido varía en mayor cantidad al modificar la resistencia del concreto de diseño, la variación de serviciabilidad y el coeficiente de drenaje (en contraste con las variaciones iniciales de CBR), modificando el espesor de diseño hasta en una 1.5 pulgadas. Esto implica que, para el diseño de un pavimento por el método de AASHTO 93, se debe tener un especial control y consideración del concreto a emplearse para el pavimento, así como las condiciones de drenaje.

- El módulo de rotura (M_r) depende directamente de la resistencia de concreto (f'_c). Lo que provoca que el pavimento de concreto sea más permeable y más susceptible a la abrasión cuando su resistencia menor.
- El ADTT considerado para el diseño en PCA 84 es menor que el permisible obtenido para los espesores hallados, por lo tanto, hay un margen que permite aumentar la frecuencia del flujo de vehículos pesados.
- Para los valores de CBR considerados (4%, 8% y 15%), la variación de los espesores de concreto hallados con el método PCA 84, 2 cm, varían más que los calculados mediante AASHTO 93, 1 cm.
- Ambos son aplicables para los siguientes tipos de pavimento rígido: JPCP, JRCP y CRCP.
- El espesor se calcula únicamente teniendo en cuenta los vehículos pesados.

- La colocación de la sub base se hace con el propósito de proteger la subrasante de la erosión, así como para homogeneizar la superficie donde se coloca la carpeta de concreto.
- El método PCA 84 considera el efecto de tránsito mediante el peso por tipo de eje, mientras que el método AASHTO 93 utiliza un eje equivalente (ESAL).

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda que se realicen más investigaciones para determinar cuál es el efecto en el espesor resultante cuando se usa el método de diseño AASHTO 93 al considerar el valor de 0.35 o 0.39 para S_o , dependiendo de si se realiza estudio de tráfico o no.
- Se recomienda realizar un diseño comparativo entre el método PCA 84 y su opción simplificada para determinar cuán similares son.
- Se puede tomar como variable independiente el espesor de la sub base, pues al igual que el CBR, conducen a una variación en la corrección de K.
- La norma peruana CE.010 debería detallar los métodos específicos de diseño para pavimentos aceptables en el país. Esto se debe realizar teniendo en cuenta las características específicas de nuestro país, ya que actualmente solo se mencionan las metodologías recomendadas y, además, se sugiere el uso de cualquier otro método de diseño propuesto.
- Se recomienda la difusión de estudios y aplicación de diseños de pavimento rígido porque a pesar de sus ventajas en comparación con los pavimentos flexibles, son menos comunes en las vías nacionales en comparación con las urbanas. Cabe resaltar que, en el país, actualmente, solo se tiene un 17% del total de la infraestructura vial pavimentada y el déficit restante tiene un incremento anual muy pequeño.

REFERENCIAS

ACI Commitee 325 (2019). *Guide for Design of Jointed Concrete Pavements for Streets and Local Roads (Reapproved 2019)*. Estados Unidos de América.

Azevedo, J. (2011). *CONCEÇÃO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS*. (Tesis de Maestría). Universidad de Porto, Portugal.

Becerra, M. (2012). *Tópicos de Pavimentos de Concreto*. Lima, Perú: Flujo Libre.

Becker, E. (2019, Febrero). ¿Usar o no usar pasadores en pavimentos urbanos de hormigón?. Vial, Edición N°29.

Belda, E. (2011). *Parámetros fundamentales del tráfico: densidad, intensidad y velocidad*. Temario General de la ESTT , OEP: Grupo de Materias Generales.

Calo, D. (2012). *Diseño de Pavimentos Rígidos*. San Salvador de Jujuy, Argentina: Instituto del Cemento Portland Argentino.

Guell, D. (1985). *Comparison of two rigid pavement design methods*. Journal of Transportation Engineering. Vol.111, Issue 6.

[https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1985\)111:6\(607\)](https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1061/(ASCE)0733-947X(1985)111:6(607))

Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. (2da. edición). New Jersey. Estados Unidos: Pearson Education, Inc.

Manjriker, N. (2018). *Geotechnical Aspects of Pavement Engineering*. New York, Estados Unidos: Momentum Press, Llc.

Menéndez, J. (2009). *Ingeniería de Pavimentos: Materiales, diseño y conservación*. Lima, Perú: Fondo editorial ICG.

Menéndez, J. (2012). *Ingeniería de Pavimentos*. (3ra edición). Lima, Perú: Fondo editorial ICG.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2010). *Norma técnica de edificación CE.010 Pavimentos Urbanos*. Lima: El Peruano.

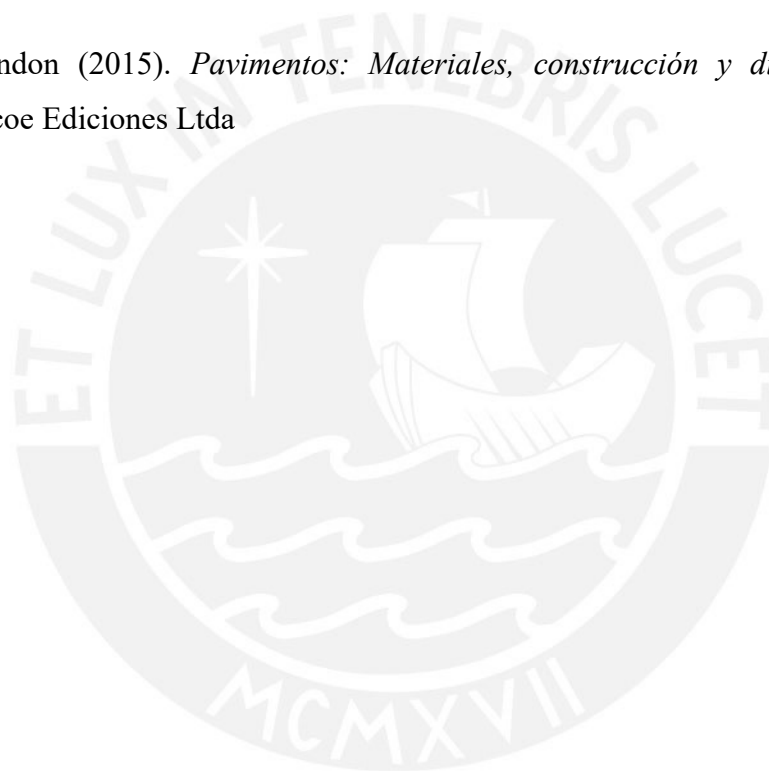
Nikolaides, A. (2015). *Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality*. Boca Raton, Estados Unidos: CR Press.

Pacasmayo (2020). *Introducción a los pavimentos rígidos*. Lima, Perú.

Portland Cement Association (1984). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Estados Unidos de América.

Plataforma digital única del Estado Peruano. (2021). Disponible 28 de mayo de 2021, de <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344790-estadistica-infraestructura-de-transportes-infraestructura-vial>

Reyes y Rondon (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones Ltda





ANEXO 1

CÁLCULOS SEGÚN MÉTODO AASHTO 93

Inicialmente, de acuerdo a los datos proporcionados, se debe calcular el valor de W_{18} como:

$$ESAL_{D,0} = ADT_0 * T * Tf$$

- Para la vía diseñada, se contempla una carretera de uso general, por lo que le corresponde un valor de $Tf = 2.149$.

$$ESAL_{D,0} = 15000 * 0.15 * 2.149 = 4835.25$$

$$W_{18} = ESAL_{D,0} * G * D * L * 365 * Y$$

- Ya que se contempla una carretera de dos sentidos, corresponde un valor de factor de distribución direccional $D = 0.5$.
- Al contar con dos carriles por sentido de vía, se considera un valor de factor de línea de tráfico $L = 90\%$.

$$W_{18} = 4835.25 * 1.596 * 0.5 * 0.9 * 365 * 20 = 25.344 * 10^6$$

Donde:

$$G = (1 + (1 + r)^Y) / 2 = (1 + (1 + 0.04)^{20}) / 2 = 1.5956$$

PARÁMETROS DE DISEÑO

- Dado que la vía a diseñar se considerará como “Vías Arteriales”, subgrupo de carreteras secundarias, se puede asumir un valor de confiabilidad R entre 80 y 95%. Para el presente diseño se considerará un valor de 95%, por lo que se obtiene un valor de desviación normal estándar $Z_r = -1.645$.
- Ya que la estimación del tráfico se realizó mediante la aplicación de fórmulas y no mediante un cálculo detallado de análisis de tráfico por control del mismo, se considera un valor $S_o = 0.34$.

- Para el cálculo de ΔPSI , se utilizará la recomendación de la AASHTO de $p_i = 4.2$. Además, al tratarse de un tipo de vía arterial, se utiliza $p_f = 2.5$. Finalmente se obtiene $\Delta PSI = 1.7$.
- El módulo de rotura depende de la resistencia a compresión considerada para el diseño. Mediante la expresión " S^c (psi) = $8a10\sqrt{f_c}$ ", y con $f_c = 280$ kg/cm² = 3982,54 psi, se obtiene un módulo de rotura = [504.85; 631.07] psi. Para efectos prácticos, se considerará un valor de 600psi.
- Ya que se contempla el uso de pasadores de transferencia de cargas. Se considera un valor de $J = 3.2$.

Con los parámetros definidos, se aplica la fórmula general de AASHTO para determinar el espesor de la capa de concreto de un pavimento rígido. Al tratarse de un proceso iterativo, se utilizó un software programado por el ingeniero Luis R. Vasquez, el cual permite ingresar los parámetros mencionados para determinar el espesor que equilibra la fórmula general.

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993) por Luis R. Vasquez

Método AASHTO para el diseño de pavimentos (1993)
Desarrollado por: Luis Ricardo Vásquez Varela. Ingeniero Civil. Manizales, 2006.

Tipo de pavimento	Confianza (R) y desviación estándar (So)	Serviciabilidades inicial y final	Tránsito de diseño
<input type="radio"/> Flexible	95% Zi = -1.645	PSI inicial 4.2	W18 74.9063012
<input checked="" type="radio"/> Rígido	So 0.39	PSI final 2.5	

Pavimento rígido

Módulo de reacción de la subrasante - k (psi/in)	210	Ver Guía AASHTO para su obtención	Diseñar
Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)	0.2301841	¿Ec/So?	Ver informe
Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)	600		Espesor de losa D (plg) 13.09
Coefficiente de transmisión de carga - J	3.2	J	D redondeado (plg) 13.50
Coefficiente de drenaje - Cd	1	Cd	W18 real 3.21E+007

Cálculo de W18 para un D (plg)

D: W18

Quitar el control de variables

Salir

ANEXO 2

CÁLCULOS SEGÚN MÉTODO PCA SIMPLIFICADO

Para el desarrollo del caso se utilizarán la Figura 3.13. Asimismo, se considerarán los datos proporcionados en la Tabla 3.6 para los parámetros de entrada.

Considerando la Categoría de carga por Eje igual a 3, se realiza el desarrollo mostrado a continuación.

i) Cálculos para tráfico

$$ADT \text{ de diseño} = \text{Factor de proyección} * ADT$$

$$ADT \text{ de diseño} = 15000 * 1.5 = 22500$$

$$ADTT = ADT \text{ de diseño} * \% \text{ de camiones} = 22500 * 0.15 = 3375$$

No se considera el factor de distribución por carril, dado que, para el método simplificado, se realiza un análisis para los 2 sentidos.

ii) Cálculos para k según CBR

Utilizando la Figura 2.4 para CBR=4%, el valor de K de la subrasante es de 120 pci. Utilizando la Tabla 2.2 se tiene que para una subbase no tratada de 6 pulg, el valor de K 160 pci. Según la clasificación de suelos es un suelo de **soporte mediano**.

iii) Diseño de espesor

Utilizando la Figura 3.13 para Mr=600 psi, soporte medio con berma y dowels en las juntas y ADTT permisible de 3375, se elige el espesor de 8.5 pulgadas=22cm. En la Figura mencionada se puede observar que el ADTT permisible asociado a este espesor es de 5800, el cual es mayor al ADTT del pavimento diseñado.

iv) Diseño para CBR = 8% y CBR=15%

Se repite el proceso variando los valores del CBR.

- CBR=8%, Ksr=180 pci, como tiene subbase no tratada de 6 pulg, Kdiseño pasaría a ser= 210 pci. Según la clasificación de suelos es un suelo de **soporte alto** (Figura 3.13). Para 8.5 pulgadas el ADTT permisible es 14100, que es mayor a los 3375 permisibles, por lo que se elige este espesor.
- CBR=15% Ksr=225 pci, como tiene subbase no tratada de 6 pulg, Kdiseño pasaría a ser=255 pci. Según la clasificación de suelos es un suelo de **soporte muy alto**. Para este valor de 600 PSI, con berma y dowell, soporte muy alto (Figura 3.13). Con 8 pulgadas el ADTT permisible es 10800, que es mayor a los 3375 permisibles, por lo que se elige este espesor.

