



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO RÍGIDO MEDIANTE MÉTODOS DE DISEÑO AASHTO Y PCA APLICADO EN UNA VÍA PÚBLICA, CAJAMARCA - 2019”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Autor:

Christian Kevin Minchán Lezcano

Asesor:

Ing. Gabriel Cachi Cerna

Cajamarca – Perú

2019

DEDICATORIA

A Dios por darnos el don de la vida, sabiduría y salud para poder culminar este nuevo reto de nuestro camino profesional.

A mis padres Juana Lezcano Morales y Jaime Minchán Pajares por su apoyo incondicional, no hubiese logrado nada sin su amor y confianza en mí.

A mi novia Fiorella Joshany Díaz Pretel por estar a mi lado durante la elaboración de mi tesis, incluso en los momentos más difíciles, siempre estuvo apoyándome. No fue sencillo terminar este proyecto, sin embargo, ella siempre fue motivadora y esperanzadora en esto.

A todos mis familiares y amigos, que de una y otra forma me dieron su apoyo y colaboración para que esta investigación concluya con éxito.

AGRADECIMIENTO

A Dios creador del universo y dueño de nuestras vidas, que nos permitió culminar con éxito la presente tesis.

A mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación profesional.

Al Ing. Gabriel Cachi Cerna, por haber dedicado parte de su valioso tiempo, resolver todas mis dudas, y haberme acompañado a lo largo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
RESUMEN	13
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Realidad problemática	14
Antecedentes	17
Métodos de diseño de Pavimento Rígido	19
<i>Método PCA para pavimentos sin refuerzo</i>	20
<i>Método AASHTO para pavimentos sin refuerzo</i>	26
<i>Las juntas en los pavimentos rígidos</i>	39
<i>Estudio de los suelos para diseño de pavimentos</i>	41
<i>Costos de Construcción</i>	46
1.2. Formulación del problema	48
1.3. Objetivos	48
1.3.1. <i>Objetivo General</i>	48
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	48
1.4. Hipótesis	48
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	49
2.1. Tipo de investigación	49

2.2.	Población y muestra	49
2.3.	Materiales, instrumentos y métodos	49
	<i>Equipos e instrumentos de laboratorio de mecánica de suelos.</i>	<i>50</i>
	Limite Líquido	50
	Límite Plástico	52
	Índice Plástico	52
	California Bearing Ratio “CBR” (NTP 339.145 – 1999).	54
	<i>Descripción de los pavimentos</i>	<i>55</i>
	<i>Etapas del diseño de Pavimentos</i>	<i>55</i>
	<i>Funciones de la estructura de Pavimentos.....</i>	<i>55</i>
	<i>Factores de diseño de pavimentos.....</i>	<i>56</i>
	<i>Clasificación de los pavimentos.....</i>	<i>58</i>
2.4.	Técnicas, instrumentos de recolección y análisis de datos	78
2.5.	Procedimiento	80
	2.5.1. <i>Estudio del Tránsito vehicular</i>	<i>80</i>
	2.5.2. <i>Diseño del Pavimento Rígido, Metodología AASHTO 93.</i>	<i>83</i>
	2.5.3. <i>Diseño del Pavimento Rígido, Metodología PCA.....</i>	<i>92</i>
	2.5.4. <i>Análisis de Costos de Construcción.....</i>	<i>103</i>
CAPÍTULO 3.	RESULTADOS	106
	Resultados de los Estudios de Mecánica de Suelos:	106
3.1.	Límites de Attenberg	106

3.2. Proctor Modificado	106
3.3. CBR (California Bearing Ratio).....	107
Estudios de Tránsito Vehicular:	108
3.4. Tránsito Vehicular del Estudio.....	108
Diseño del Pavimento – Método AASHTO:	109
Diseño del Pavimento – Método PCA:.....	109
Costos de construcción:	110
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN.....	111
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
5.1. CONCLUSIONES	113
5.2. RECOMENDACIONES.....	115
REFERENCIAS.....	116
ANEXOS	117
<i>ANEXO 1: ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS</i>	<i>117</i>
<i>ANEXO 2: ESTUDIO DE TRÁNSITO VEHICULAR.....</i>	<i>118</i>
<i>ANEXO 3: PANEL FOTOGRÁFICO</i>	<i>120</i>
<i>ANEXO 4: REGLAMENTO NACIONAL DE TRÁNSITO.....</i>	<i>122</i>
<i>ANEXO 5: PLANOS.....</i>	<i>128</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Módulo de reacción compuesto para subrasante con base granular y con base estabilizada con cemento (Packard 1984)	22
Tabla 2: Formato para la verificación del espesor de tanteo.....	25
Tabla 3: Número de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2t, en el carril de diseño (Ministerio de Transportes y comunicaciones del Perú 2012)	28
Tabla 4: Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad (R), Desviación estándar normal (ZR) y Error Estándar Combinado (So).	30
Tabla 5: Índice de Serviciabilidad inicial (p_0) Índice de Serviciabilidad Final o Terminal (p_t) Diferencial de Serviciabilidad.....	31
Tabla 6: Valores recomendados de resistencia del concreto según rango de tráfico (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú 2012)	32
Tabla 7: Factor de pérdida de apoyo LS.	34
Tabla 8: Coeficiente de transferencia de carga.	35
Tabla 9: Coeficiente de drenaje.....	36
Tabla 10: Parámetros de diseño que intervienen en la fórmula AASHTO de pavimentos rígidos.....	37
Tabla 11: Condiciones variables del Proctor Estándar.	44
Tabla 12: Condiciones variables del Proctor Modificado.....	44
Tabla 13: Factores de diseño de pavimentos.....	57
Tabla 14: Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño.....	76

Tabla 15: Aforo del día de máxima demanda Vehicular (IMDS). (22/07/2019 – 28/07/2019).	81
Tabla 16: Determinación del periodo de diseño, Metodología AASHTO 93, para Pavimentos Rígidos.	83
Tabla 17: Determinación de los Índices de Serviciabilidad.	84
Tabla 18: Determinación del Factor de Distribución por Dirección.	84
Tabla 19: Factor de Distribución por Carril.	84
Tabla 20: Cálculo del Código de eje cargado.	84
Tabla 21: Cálculo del Número de ejes equivalentes.	85
Tabla 22: Niveles de Confiabilidad.	86
Tabla 23: Desviación Estándar Normal (ZR) y Error Estándar Combinado (S0).	86
Tabla 24: Determinación del coeficiente de drenaje (Cd).	89
Tabla 25: Cálculo del Coeficiente de Transmisión de Cargas.	89
Tabla 26: Composición del Transito Proyectado.	92
Tabla 27: Determinación del Módulo de Reacción(K) en función al CBR(%)	93
Tabla 28: Determinación del Módulo de Reacción de la Subbase Granular, en función del Módulo de Reacción de la Subrasante.	94
Tabla 29: Cálculo del N° de ejes equivalentes de diferentes pesos.	94

Tabla 30: Parámetros de Diseño para calcular el espesor de la losa con la Metodología PCA.	95
Tabla 31: Cálculo del Espesor del Pavimento, e= 9 pulg. (22.8 cm).	96
Tabla 32: Esfuerzo Equivalente - sin Berma de Concreto (Eje Simple/Eje Tandem)	97
Tabla 33: Factor de Erosión - Juntas con Dowels, sin Berma de Concreto (Eje Simple/Eje Tandem)	97
Tabla 34: Cálculo del Espesor del Pavimento, e= 8.5 pulg. (21.5 cm).	100
Tabla 35: Metrados de la estructura del pavimento.	103
Tabla 36: Precios Unitarios para la Sub Base Granular.	104
Tabla 37: Precios Unitarios de Losa de Concreto.	105
Tabla 38: Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad del material del pasaje San Mateo.	106
Tabla 39: Proctor Modificado del Material del Pasaje San Mateo.	106
Tabla 40: Compactación de CBR del material del Pasaje San Mateo.	107
Tabla 41: Ensayo Carga – Penetración Suelo Natural.	107
Tabla 42: CBR Y DENSIDAD SECA.	107
Tabla 43: Resultados de Tránsito Promedio Diario Semanal.	108
Tabla 44: Análisis de Costos de Construcción del Pavimento Rígido.	110
Tabla 45: Aforo Vehicular de la semana (22/07/2019-28/07/2019).	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de pavimentos de concreto: a) losa simple con juntas (JPCP), b) losa reforzada con juntas (JRCP), c) pavimento de concreto armado continuo (CRCP) (delatte 2008)	20
Figura 2: Posición crítica de las cargas método de diseño PCA.....	24
Figura 3: Posición crítica de las cargas para el análisis de erosión.	24
Figura 4: Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto	33
Figura 5: Nomograma de diseño AASHTO 93 para pavimentos rígidos.	38
Figura 6: Relación entre los factores de diseño y la serviciabilidad o deterioro	58
Figura 7: Sección típica de un pavimento.....	59
Figura 8: Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores.	62
Figura 9: Vista de planta típica de una losa de pavimento rígido con junta con pasadores y barras de anclaje	63
Figura 10: Perfil típico de juntas:.....	64
Figura 11: Perfil típico de juntas:.....	64
Figura 12: Ejemplo de una vista en planta de juntas de expansión:	65
Figura 13: Automóvil o taxi, vehículo de la Categoría A.....	72
Figura 14: Ómnibus, minibús y microbús, vehículos de la categoría B.	72
Figura 15: Camión, Remolque, Vehículos de la categoría C.....	73

Figura 16: Cálculo del Módulo de Reacción Compuesto de la Subrasante, a través de Abaco.	88
Figura 17: Determinación del espesor del pavimento a través del Nomograma AASHTO. .	91
Figura 18: Estructura del Pavimento Rígido, Método AASHTO.	92
Figura 19: Análisis por fatiga número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de relación de esfuerzo (con y sin berma de hormigón)	98
Figura 20: Análisis por erosión - número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de erosión (sin berma de hormigón).	99
Figura 21: Análisis por fatiga número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de relación de esfuerzo (con y sin berma de hormigón), $e=8.5$ pulg.	101
Figura 22: Análisis por erosión - número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de erosión (sin berma de hormigón). $E= 8.5$ pulg.....	102
Figura 23: Estructura Pavimento Rígido PCA.....	103
Figura 24: Participación según tipo de vehículo.....	108
Figura 25: Costos del Pavimento Rígido, según metodología.	110
Figura 26: Realizando el ensayo de penetración en la prensa de CBR.....	120
Figura 27: Realizando el Ensayo Proctor Tipo A.	120
Figura 28: Secado en estufa de muestras para los ensayos.	121
Figura 29: Sumersión de moldes CBR para determinar hinchamiento.....	121

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Criterios de Falla, Análisis de Fatiga.	23
Ecuación 2: Numero de Ejes Equivalentes, para Pavimento Rígido AASHTO 93.	29
Ecuación 3: Cálculo del Módulo de Elasticidad y Resistencia a la Flexo Tracción del concreto:	32
Ecuación 4: Módulo de reacción compuesto o combinado de la subrasante.	35
Ecuación 5: Formula de diseño para el Método AASHTO.....	36
Ecuación 6: Determinación del Contenido de Humedad.	42
Ecuación 7: Cálculo del Período de Diseño.	70
Ecuación 8: Determinación del Tránsito futuro.	76
Ecuación 9: Factor de Equivalencia de Carga.....	77
Ecuación 10: Determinación del Factor Camión.	77
Ecuación 11: Determinación del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño y durante el periodo de diseño (N).....	78

RESUMEN

La presente investigación, tuvo como objetivo general hacer un análisis comparativo de las metodologías AASHTO y PCA de un pavimento rígido, aplicado al pasaje San Mateo, barrio Mollepampa de la ciudad de Cajamarca. Primero se realizó una calicata y se obtuvo muestras del suelo en campo, con la que se determinaron las propiedades físico - mecánicas, obteniendo un valor de CBR del 13%. Luego se hizo el levantamiento topográfico de la vía, donde se obtuvo una longitud de 249.55 m. En el estudio de tránsito vehicular, se contabilizó vehículos ligeros (A) y vehículos pesados (B2, C2, C3, T2S3), los vehículos ligeros representan el 93% de los vehículos totales y los pesados el 7%. Con todos estos datos procedemos a diseñar el pavimento rígido por las metodologías AASHTO y PCA, determinando un espesor de 19 cm y 23 cm respectivamente. Al analizar estos dos métodos se determinó que el espesor de pavimento por la metodología AASHTO es menor respecto al del diseño por la metodología PCA, por lo tanto; el costo de construcción de pavimento es menor. Sin embargo, se elegiría como mejor metodología al diseño por PCA, ya que el espesor de 23 cm cumple con los análisis de fatiga y erosión, en cambio el espesor de 19 cm que corresponde al método AASHTO, no cumpliría bajo estos análisis, a pesar de que la vía presenta bajo volumen de tránsito vehicular. PCA garantiza un análisis más específico y conveniente para el espesor de losa durante todo el periodo de vida útil del pavimento. A través del levantamiento topográfico, se realizó los planos en planta, perfil y de secciones típicas del pavimento, para luego determinar los costos de construcción para cada método de diseño, para PCA se encontró un costo de S/ 164,174.17 a nivel de estructura del pavimento, y en AASHTO un costo de S/ 137,680.90; encontrando una diferencia de S/ 26,493.27 de PCA frente a AASHTO, por lo que esta última genera menor costo de construcción; sin embargo, no adoptamos esta metodología por las razones antes descritas.

Palabras clave: AASHTO, PCA, pavimento, tránsito, costos de construcción, CBR.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Se sabe que los pavimentos son uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social de un país y del mundo entero; ya que constituyen la principal forma de comunicación. Por tales motivos es más que evidente la importancia de construirlos con la calidad debida a fin de prolongar su vida útil permitiendo una circulación segura, cómoda y fluida: reduciendo de esta forma los costos de mantenimiento y operación (Morella y Mich, 2007).

Según Montejo (2006), Los beneficios de los pavimentos de concreto no se contemplan sólo desde el punto de vista técnico, sino también del económico y del ecológico o sustentable. En los últimos 15 años, la tecnología de los pavimentos de concreto hidráulico han experimentado enormes avances, llegando así a desplazar a los pavimentos asfálticos en carreteras, caminos y calles de los países más desarrollados del mundo.

En el diseño de pavimentos se tienen en términos generales dos escuelas o tendencias, la primera aplicada en varios países en especial EE.UU. donde los procedimientos de diseño tienen a ser mecanísticos-empíricos y los métodos se orientan a un uso más intensivo de programas de cómputo que simulan la respuesta del pavimento a diferentes aplicaciones de carga y clima, por ende, se requiere una caracterización más avanzada de las propiedades de los materiales. La segunda tendencia aplicada en su mayoría en Europa donde las secciones de diseño están predeterminadas en catálogos y el diseñador debe obtener los datos de ingreso requeridos en el método, en este caso los catálogos suelen ser elaborados aplicando diferentes metodologías. (ICG, 2012)

Además, el autor Montejo (2010), indica que el propósito del Método PCA es el mismo del de otras estructuras de ingeniería, es decir, hallar los espesores mínimos de pavimento

que se traduzcan en los menores costos anuales. Si se toma un espesor mayor que el necesario, el pavimento presentará buen comportamiento con bajos costos de mantenimiento, pero el costo inicial será muy elevado. Ahora, si por el contrario, el espesor elegido es muy bajo, se requerirá un mantenimiento importante sin interrupciones de tránsito prematuras y costosas, que excederán la compensación por el menor costo inicial. Por tanto, un criterio sano de ingeniería, implica la elección de espesores de diseño que equilibren adecuadamente los costos iniciales y los de mantenimiento.

En nuestro país los pavimentos encargados por el MTC de la administración y gerenciamiento de la red vial nacional (RVN) miembro de la comisión técnica busca la promoción del uso diverso de materiales y tecnologías que constituyen al mejoramiento de las condiciones estructurales de los suelos de la red vial, principal factor para garantizar la transitabilidad. (MTC, 2013).

Además, en nuestro país y en la mayoría de países latinoamericanos, el diseño de las estructuras de pavimentos rígidos es realizado utilizando las recomendaciones establecidas en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento **AASHTO** (American Association of State Highway and Transportation Officials) edición 1993; sin embargo, existen otros métodos de diseño para estructuras de pavimento rígido que no han sido muy utilizados, tal como el desarrollado por la Asociación de Cemento Portland (**PCA**) edición 1984, así como también las recomendaciones de la American Concrete Pavement Association (**ACPA**) y de la **AASHTO** edición 2002. Por lo anterior, se considera importante realizar un análisis comparativo de las metodologías de mayor uso, propuestas por la **AASHTO** y por la **PCA**. Las metodologías de diseño tienen como fin simular analíticamente el comportamiento de una estructura de pavimento, ante diferentes esfuerzos y condiciones a la cual va a ser sometida, esto con el fin de determinar su periodo de vida útil. Para esto se establecen

metodologías de diseño, que tienen en cuenta diferentes variables que contemplan parámetros inherentes a la durabilidad de la estructura, estos parámetros son los que diferencian una metodología con otra.

Considerándose que en todas las metodologías de diseño para estructuras de pavimento rígido, se establece como criterio de diseño la fatiga y la erosión, reconociéndose a la fatiga como el daño de las losas por las repeticiones de carga, representándose en desgaste superficial y/o fisuras, y la erosión como la pérdida del material de apoyo de las losas, generando que estas queden en "Voladizo" permitiendo deflexiones en las losas, manifestándose en fisuras, dadas estas consideraciones se establecen las metodologías como medios para simular las posibles afectaciones de las estructuras ante las diferentes condiciones.

Dadas estas consideraciones se pretende establecer la diferencia en cuanto al dimensionamiento de la estructura de pavimento que establece cada metodología, reconociendo las variables que tiene en cuenta cada metodología y la influencia que tiene cada una en el dimensionamiento, reconociendo así la metodología más apta para las condiciones generales de la vía.

Los caminos pavimentados se ven sometidos desde su puesta en servicio y a lo largo de toda su vida útil, a diversos procesos de deterioro, fallas, grietas e incluso baches. Es por esto, y dada la necesidad de optimizar los recursos que se emplean en el diseño, ejecución y conservación de los mismos, por parte del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se pretende realizar un análisis comparativo entre las metodologías de pavimento rígido **AASHTO** y **PCA**, con el objetivo de definir criterios que permitan saber cuál de los dos tiene un mejor comportamiento estructural y económico, para las diferentes rutas

interurbanas de nuestra región, esperando incrementar su servicio y reduciendo los costes de rehabilitación en un futuro.

Antecedentes

Rengifo (2014) comparó los diseños de pavimentos rígidos y flexibles de la nueva carretera panamericana norte en el tramo de Huacho a Pativilca (km 188 a 189), en la ciudad de Lima – Perú. Para el diseño del pavimento flexible 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 utiliza también la de la AASHTO y la de la Portland Cement Association (PCA). En la investigación presente se obtuvo que el costo para la ejecución de un km de pavimento flexible es de 1'346,908.00 soles, mientras que para el pavimento rígido es de 1'603,623 soles. Por lo que el autor concluye que el pavimento flexible es el más económico por una diferencia de casi 260,000 soles, valor no despreciable; sobre todo si luego se extrapola a una carretera de varios kilómetros.

Torres (2007) realizó una comparación de los pavimentos flexibles y rígidos, así como detalló los procesos constructivos de estos, el cual comprende varias etapas, como lo son: diseño, ejecución y mantenimiento. En cuanto al análisis de costos de ejecución se refiere; se analizó mediante dos proyectos de carreteras, actualmente en ejecución tales como la Construcción de carretera ruta RN-13 tramo Génova - Caballo blanco y la Ampliación de la carretera ruta CA-9-Norte tramo Rodriguitos entrada a Palencia, ambos del país de Guatemala, para luego, en base a esto concluir con la mejor opción para la construcción de cada proyecto. Respecto a los resultados, se obtiene que los costos totales para el proyecto de la ruta RN-13 tramo Génova, son de 30'987,400.38 Q para pavimento flexible y 35'562,982.87 Q para pavimento rígido, mientras que para la

ruta CA-9-Norte tramo Rodriguitos, los costos son de 47'044.532.94 Q para pavimento flexible y 54'789,236.12 Q para pavimento rígido, los precios son considerados en Quetzales. Por lo tanto, el autor concluye que el costo del pavimento rígido es más alto que el del pavimento flexible; en cuanto a ejecución se refiere. Para ello debe de tomarse en cuenta que se realizó la comparación tomando en consideración los mismos parámetros de diseño, en cuanto a cargas, tipo de sub rasante, especificaciones de materiales y tiempo.

Burgos (2014) comparó la serviciabilidad teórica de un camino interurbano seleccionado, diseñando ambas alternativas para el mismo proyecto. Además, se entregará un lineamiento en cuanto al proceso constructivo para posteriormente, realizar un análisis de costos para determinar si el pavimento asfáltico o el pavimento rígido es más económico, y por ende más convenientes para su ejecución de nuestro proyecto de pavimentación. Según el estudio y análisis realizado en la investigación, el autor se basó en los resultados obtenidos para el tramo que une Santa Elvira y El Arenal ubicado en Valdivia en la Región de los Ríos, donde se determinó que un pavimento flexible, es económicamente más rentable en lo que se refiere a inversión inicial, y que cumple satisfactoriamente con las condiciones de diseño, en comparación con el pavimento rígido que presenta una conservación más económica pero de un costo de implementación muy por encima del pavimento flexible.

Párraga J., Sánchez A. (2002) analizó las características de una superficie sintética, de última generación, para la práctica del fútbol. Como consecuencia de los nuevos avances tecnológicos se ha conseguido un pavimento que reproduce el juego en condiciones muy similares a las de un campo de césped natural. El autor concluye que el mantenimiento

y la explotación de un campo de fútbol de césped artificial es significativamente inferior a la de un campo natural. Incluso respecto a otras superficies como el albero.

Cornejo & Velásquez (2009) compararon los métodos de diseño de estructuras de pavimento rígido”. La investigación realizada en el trabajo citado tuvo por objeto realizar un análisis comparativo entre los métodos de diseño generalmente utilizados para la determinación del espesor de losa de concreto de la estructura de un pavimento rígido con el análisis de sensibilidad de sus variables de diseño.

Métodos de diseño de Pavimento Rígido

Los pavimentos rígidos se utilizan principalmente en las principales autopistas y aeropuertos. La losa de concreto debe estar diseñada para soportar cargas de tráfico y evitar fallas por fatiga del pavimento debido a las cargas repetidas. Los pavimentos rígidos pueden ser diseñados para un período de vida útil de 15 a 20 años, sin embargo, es más probable que sus periodos de diseño sean de 30 a 40 años.

Además de las cargas de tráfico se debe considerar el efecto del gradiente térmico que genera esfuerzos de tracción que pueden ocasionar la falla del concreto por su baja resistencia a la tensión. Este problema suele ser controlado mediante la elección adecuada de las dimensiones en planta de las losas, en caso que se considere la colocación de refuerzos para controlar las fisuras y espaciamientos de las grietas, y mediante el diseño de los mecanismos de transferencia de carga en las juntas (ICG, 2012).

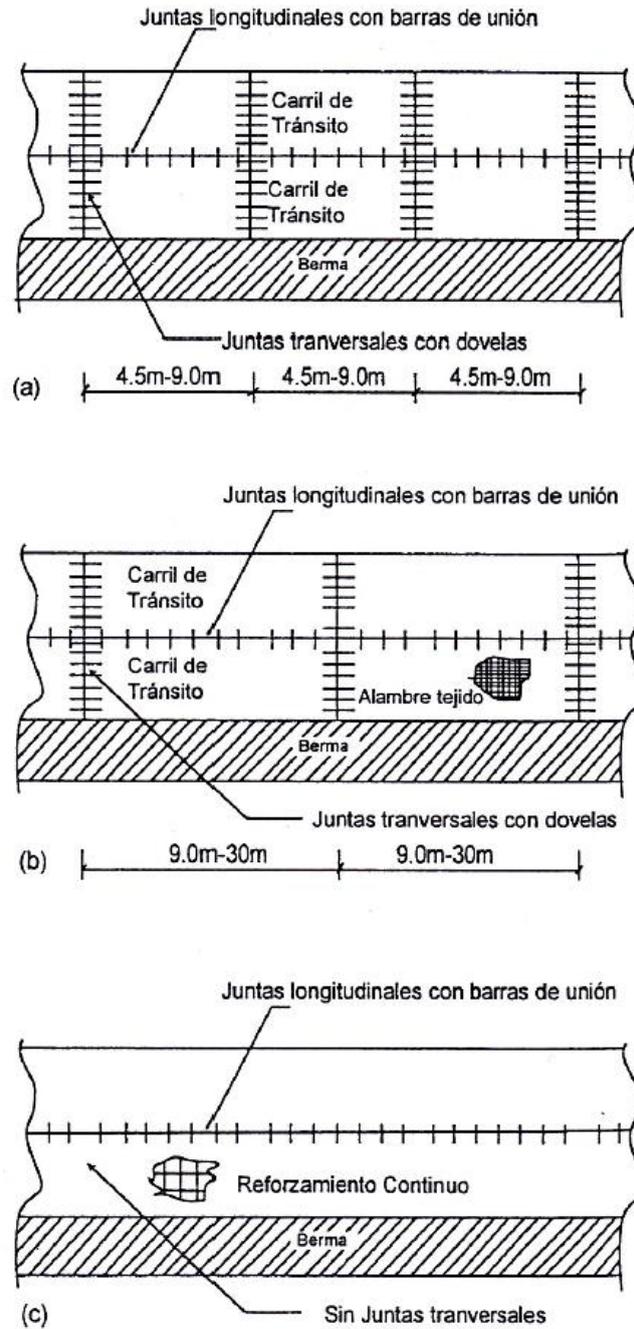


Figura 1: Tipos de pavimentos de concreto: a) losa simple con juntas (JPCP), b) losa reforzada con juntas (JRCP), c) pavimento de concreto armado continuo (CRCP) (delatte 2008)

Fuente: ICG, 2012.

Método PCA para pavimentos sin refuerzo

El procedimiento de diseño de espesor de la Asociación de Cemento Portland (PCA) para carreteras y calles de concreto fue publicado en 1984, superando a la publicada en 1966.

El procedimiento puede ser aplicado a Pavimentos de concreto simple con juntas (JPCP),

Pavimentos de concreto con juntas y con refuerzo (JRCP) y Pavimentos de concreto con refuerzo continuo (CRCP). El criterio de diseño está basado en el diseño general de pavimentos, comportamiento y experiencia en investigación, incluyendo relaciones al comportamiento de pavimentos en el ensayo de carretera la AASHO y a estudios de fallas de pavimentos. Los problemas de diseño pueden resolverse a mano con tablas y diagramas presentados o con algún programa de cómputo (ICG, 2012).

Procedimiento de diseño

El ICG (2012) indica que el procedimiento de diseño de un pavimento rígido utilizando el método PCA, es el siguiente:

- Determinar el módulo de rotura del concreto a 28 días.
- Determinar el módulo de reacción k (equivalente) de la subrasante.
- Establecer el factor de seguridad de carga (LSF).
- Determinar la distribución de ejes de carga.
- Calcular el número esperado de repeticiones de ejes de diseño.

a) Tipo de junta y berma

El paso inicial es la definición del tipo de junta que puede ser sin pasadores o con pasadores. Cuando se trata de losas mayores a 6 pulgadas se recomienda la colocación de pasadores en las juntas transversales. También se debe definir el tipo de berma que será colocado, pudiendo ser de concreto o asfalto. Las bermas de concreto dan una mejor continuidad al pavimento y permiten resistir mayor cantidad de cargas en el borde, sin embargo, su costo es mayor que las bermas de asfalto, por lo tanto, este aspecto debe ser definido al inicio del proceso de diseño.

b) Módulo de rotura del concreto

La resistencia a la flexión del concreto está determinada por el módulo de ruptura a una edad de 28 días con la prueba de viga cargada en el tercio central norma ASTM C78, las características del ensayo han sido detalladas en el capítulo de Concreto Hidráulico.

c) Módulo de reacción de la subrasante

El módulo de reacción de la subrasante será modificado de acuerdo al espesor de la subbase que será colocada en el pavimento de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 1: Módulo de reacción compuesto para subrasante con base granular y con base estabilizada con cemento (Packard 1984)

Efecto de una subbase granular en el valor de k				
Valor de k de la subrasante	valores de k de la subbase (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

Valores de diseño de k para bases tratados con cemento				
Valor de k de la subrasante	valores de k de la subbase (pci)			
	4 pulg	6 pulg	9 pulg	12 pulg
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
300	470	640	830	-

Fuente: ICG, 2012

d) Factor de seguridad de carga

Cada carga por eje debe ser multiplicada por un factor de seguridad de carga (LSF) de acuerdo con las siguientes recomendaciones:

- LSF = 1,2 para las carreteras interestatales y otros proyectos con varios carriles flujo de tráfico sin interrupciones y altos volúmenes de tráfico de camiones.
- LSF = 1,1 para carreteras y calles arteriales con volúmenes moderados de tráfico de camiones.
- LSF = 1,0 para las carreteras, calles residenciales y otras calles con pequeños volúmenes de tráfico de camiones.

e) Distribución de ejes de carga

Los ejes son divididos en simples, tándem y tridem, luego son agrupados cada 2 kip en el caso de los ejes simples y cada 4 kip los ejes tándem y tridem.

f) Repeticiones admisibles de ejes

- Para cada carga por eje i , se obtienen las repeticiones de carga permisible N_i tanto para fatiga como erosión.
- Calcule el daño acumulativo D . Si D es superior a uno, seleccione un espesor mayor, repetir los pasos anteriores.
- El espesor de prueba es adecuado D es menor o igual a uno.

Criterios de falla

a) Análisis de fatiga

El criterio de la falla por fatiga corresponde al esfuerzo de tracción por flexión producido por una carga de borde. Se utiliza la expresión desarrollada por Miner para la acumulación del daño por fatiga. El espesor de diseño es aquel en el cual la fatiga total consumida no debe exceder del 100%.

Se determina el factor de esfuerzo equivalentes, para lo cual se requiere ingresar a las tablas de diseño con el espesor de tanteo de la losa y el módulo de reacción compuesto.

La fatiga de diseño de espesor de la losa se realiza con el objetivo de controlar la fisuración por fatiga. El diseño se basa en los esfuerzos críticos de borde, con la carga aplicada situado en la mitad de la longitud del borde exterior. La presencia de bermas de hormigón debe ser considerada, ya que reduce significativamente la tensión crítica de borde. El análisis de diseño se basa en el concepto de daño acumulado dado por:

Ecuación 1: Criterios de Falla, Análisis de Fatiga.

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \dots\dots (6)$$

Donde:

- m número total de grupos de peso por eje.
- n_i número previsto de repeticiones para el grupo de carga i .
- N_i número permisible de repeticiones para el grupo de carga i .

El análisis por fatiga usualmente controla el diseño de los pavimentos de bajo tráfico sin importar si tiene juntas con pasadores o no. El análisis de erosión usualmente controla el diseño de pavimentos para tráfico medio y pesado con juntas sin pasadores y pavimentos para tráfico pesado con juntas con pasadores.

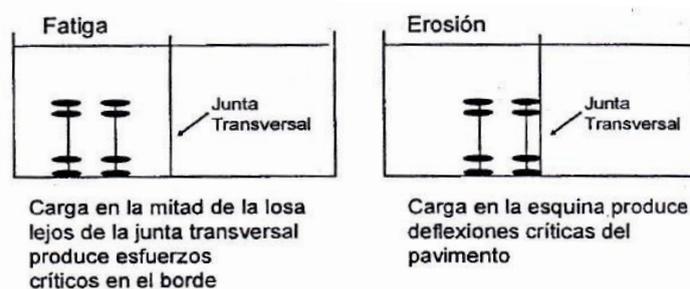


Figura 2: Posición crítica de las cargas método de diseño PCA.
Fuente: ICG, 2012.

b) Análisis de erosión

El diseño de la erosión del PCA para diseño de pavimentos de espesor es para proteger la fundación y la erosión de la berma, del bombeo y pérdida de finos. La deformación crítica que se consideran se encuentra en la esquina, como se muestra en la figura siguiente. La presencia de las bermas y pasadores en las juntas afectarán al diseño de espesor. Se aplica el mismo concepto de daño acumulado de similar manera que para el análisis de fatiga.

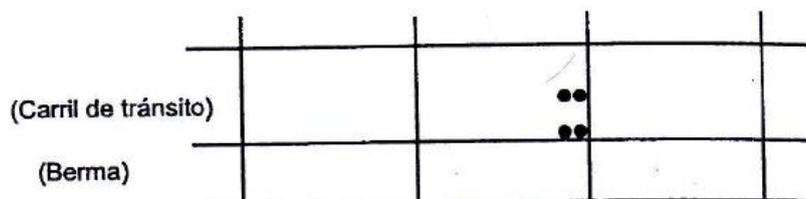


Figura 3: Posición crítica de las cargas para el análisis de erosión.
Fuente: ICG, 2012.

Tanteos de espesor

En la siguiente figura se muestra el formato para la verificación del espesor de tanteo considerando la acción de los ejes separados por tipo (simple, tándem y tridem).

Tabla 2: Formato para la verificación del espesor de tanteo

		ANÁLISIS DE FATIGA			ANÁLISIS DE EROSIÓN	
CARGA POR EJE (Kn)	CARGA POR EJE x Fsc	NÚMERO DE REPETICIONES ESPERADAS	NÚMERO DE REPETICIONES ADMISIBLES	CONSUMO DE FATIGA (%)	NÚMERO ADMISIBLE DE REPETICIONES	DAÑO POR EROSIÓN (%)
1	2	3	4	5	6	7
EJES SENCILLOS		Esf. Equivalente: Factor de relación de esfuerzos:			Factor de erosión	
EJES TÁNDEM		Esf. Equivalente: Factor de relación de esfuerzos:			Factor de erosión	
EJES TRIDEM		Esf. Equivalente: Factor de relación de esfuerzos:			Factor de erosión	
TOTAL				TOTAL		

Fuente: ICG, 2012.

Espesor final

El espesor del pavimento es correcto si el consumo de fatiga y el daño por erosión son menores o iguales al 100%. En caso que el espesor tanteado no cumpla con los requisitos indicados se debe repetir el procedimiento incrementando el valor del espesor de la losa en 0.5 pulgadas. (ICG, 2012).

Método AASHTO para pavimentos sin refuerzo

La guía de diseño para pavimentos rígidos fue desarrollada al mismo tiempo que para los pavimentos flexibles, y fue publicado en el mismo manual. El diseño está basado en ecuaciones empíricas obtenidas del ensayo de carretera de la AASHTO con algunas modificaciones posteriores basadas en teoría y experiencia.

El procedimiento de diseño descrito en la Guía AASHTO (AASHTO 1993) fue desarrollado en base a conclusiones de la AASHTO Road Test (Consejo de Investigación de carreteras, 1962). La idea central era proporcionar espesor de la losa suficiente para garantizar un nivel adecuado de desempeño del pavimento en todo el diseño de la vida del pavimento. AASHTO define el desempeño del pavimento en términos del índice de servicio actual (PSI), que varía de 0 a 5. El PSI de un pavimento nuevo es 4.5. Para los pavimentos de las carreteras principales, el final de su vida útil se considera alcanzado cuando $PSI = 2,5$. Un valor final de $PSI = 2,0$ puede ser usado para los caminos secundarios (ICG, 2012).

Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño de un pavimento rígido utilizando el método AASHTO, es el siguiente:

- Estimar el período de diseño.
- Estimar el tráfico para el Periodo de diseño (W_{18}).
- Determinar la confiabilidad R y la desviación estándar total S_o .
- Establecer el módulo de reacción efectivo de la subrasante k .
- Determinar la pérdida de serviciabilidad de diseño.
- Obtener el espesor de la losa D (ábaco o fórmula).

a) Periodo de diseño

El periodo de diseño se fija en función de las expectativas y requerimientos de la institución o agencia, sin embargo, en el caso de los pavimentos rígidos se debe tomar en cuenta que el periodo de diseño debe ser lo mayor posible a fin de que la alternativa sea viable económicamente. El manual de diseño del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú 2012) establece que este debe ser como mínimo 20 años.

b) Tránsito de diseño

El tránsito de diseño se expresa en repeticiones de ejes equivalentes para el periodo de diseño que son determinados de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo de tráfico. El manual de MTC define tres categorías de tráfico para el diseño que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3: Número de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2t, en el carril de diseño
(Ministerio de Transportes y comunicaciones del Perú 2012)

Tipo de tráfico	Tipos tráfico pesado expresado en EE	Rangos de tráfico pesado expresado en EE
Categoría 1: bajo volumen	T _{P1}	> 150,000 EE ≤ 300,000 EE
	T _{P2}	> 300,000 EE ≤ 500,000 EE
	T _{P3}	> 500,000 EE ≤ 750,000 EE
	T _{P4}	> 750,000 EE ≤ 1000,000 EE
Categoría 2: volumen medio	T _{P5}	> 1000,000 EE ≤ 1500,000 EE
	T _{P6}	> 1500,000 EE ≤ 3000,000 EE
	T _{P7}	> 3000,000 EE ≤ 5000,000 EE
	T _{P8}	> 5000,000 EE ≤ 7500,000 EE
	T _{P9}	> 7500,000 EE ≤ 10'000,000 EE
	T _{P10}	> 10'000,000 EE ≤ 12'500,000 EE
	T _{P11}	> 12'500,000 EE ≤ 15'000,000 EE
	T _{P12}	> 15'000,000 EE ≤ 20'000,000 EE
	T _{P13}	> 20'000,000 EE ≤ 25'000,000 EE
	T _{P14}	> 25'000,000 EE ≤ 30'000,000 EE
Categoría 3: volumen alto	T _{P15}	> 30'000,000 EE

Fuente: ICG, 2012.

La metodología AASHTO 93, nos presenta la siguiente ecuación para calcular el número de ejes equivalentes (ESALS) de 8.2 Tn (18 kips).

Ecuación 2: Numero de Ejes Equivalentes, para Pavimento Rígido AASHTO 93.

$$Fec = - \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

$$\text{Log} \frac{W_{t18}}{W_{tx}} = 4.62 \text{Log}(18 + 1) - 4.62 \text{Log}(Lx + L2) + 3.28 \text{Log}(L2) + \frac{G_t}{B_x} - \frac{G_t}{B_{18}}$$

$$G_t = \text{Log} \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5}$$

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

Donde:

Wtx: # Aplicaciones de carga definida al final del tiempo t.

Wt18: # Aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t.

Lx: Carga de los ejes de los vehículos en Kips.

L2: Tipo de eje en contacto con el pavimento.

Gt: Parámetro en función de la serviciabilidad final f(Pt).

Pt: Serviciabilidad final.

B₁₈: Valor de B_x cuando L_x= 18 y L₂= 1

c) Confiabilidad

La Guía AASHTO incorpora en el diseño de un factor de confiabilidad R% para tener en cuenta la incertidumbre en la predicción del tráfico y el desempeño del pavimento. R% indica la probabilidad de que el pavimento diseñado tendrá un nivel de desempeño más alto que el nivel de serviciabilidad final al concluir período de diseño. Los rangos de R% sugerido por la AASHTO son 85 a 99,9%, del 80 a 99%, 80 a 95% y de 50 a 80%,

respectivamente, por las carreteras interestatales urbanas, arterias principales, colectores y carreteras locales.

Los rangos correspondientes para los caminos rurales son de 80 a 99,9%, 75 a 95% y de 50 a 80%. La desviación estándar global, S_0 ; para un rendimiento pavimento rígido es de 0.35 a 0.40 y suele emplear el valor de 0.35.

Tabla 4: Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad (R), Desviación estándar normal (Z_R) y Error Estándar Combinado (S_0).

TIPO DE CARRETERA	NIVELES DE CONFIABILIDAD R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	85 - 99.9	80 - 99.9
Local	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	50 - 80
DESVIACIÓN ESTANDAR NORMAL, VALORES QUE CORRESPONDEN		
A LOS NIVELES SELECCIONADOS DE CONFIABILIDAD		
CONFIABILIDAD R (%)	(Z_R)	(S_0)
50	0.000	0.35
60	-0.253	0.35
70	-0.524	0.34
75	-0.647	0.34
80	-0.841	0.32
85	-1.037	0.32
90	-1.282	0.31
91	-1.340	0.31
92	-1.405	0.30
93	-1.476	0.30
94	-1.555	0.30
95	-1.645	0.30
96	-1.751	0.29
97	-1.881	0.29
98	-2.054	0.29
99	-2.327	0.29
99.9	-3.090	0.29
99.99	-3.750	0.29

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO 1993.

d) Serviciabilidad

Este parámetro presenta el grado de confort que la vía tiene y la escala varía de 0 a 5; el valor de 5 corresponde a la mejor condición posible. En la ecuación de diseño se presenta a través de dos valores: índice de servicio inicial (p_0) e índice de servicio final o terminal (p_t). En la ecuación se ingresa la diferencia entre los valores de serviciabilidad inicial y final, determinándose una variación o diferencial entre ambos índices (ΔPSI).

El valor ΔPSI depende de la calidad de la construcción. En el AASHTO Road Test se alcanzó el valor de $p_0 = 4.5$ para el caso de pavimentos de concreto.

Tabla 5: Índice de Serviciabilidad inicial (p_0) Índice de Serviciabilidad Final o Terminal (p_t)
Diferencial de Serviciabilidad.

INDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL
Po = 4.5 para pavimentos rígidos
Po = 4.2 para pavimentos flexibles
INDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL
Pt = 2.5 o más para caminos muy importantes
Pt = 2.0 para caminos de transito menor

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO 1993.

e) Propiedades del concreto

El módulo E_c elástico y el módulo de 28 días de rotura del hormigón S_c se requieren como parámetros de entrada.

De acuerdo al manual del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú 2012), el concreto a ser empleado en la construcción de pavimentos rígidos debe cumplir con los siguientes requisitos de módulo de rotura (resistencia a la flexo tracción) y resistencia a la compresión.

Tabla 6: Valores recomendados de resistencia del concreto según rango de tráfico (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú 2012)

Rangos de tráfico pesado expresado en EE	Resistencia a la Flexo tracción del concreto (Mr)	Resistencia equivalente a la compresión del concreto (f'c)
≤ 5'000,000 EE	40 kg/cm ²	280 kg/cm ²
> 5'000,000 EE	42 kg/cm ²	300 kg/cm ²
≤ 15'000,000 EE		
> 15'000,000 EE	45 kg/cm ²	350 kg/cm ²
≤ 30'000,000 EE		

Fuente: ICG, 2012

Pero las propiedades del módulo de elasticidad del concreto y resistencia a la flexo tracción, también las podemos calcular de la siguiente manera:

Ecuación 3: Cálculo del Módulo de Elasticidad y Resistencia a la Flexo Tracción del concreto:

Módulo de Elasticidad (Ec):

$$Ec = 57000 * \sqrt{f'c} \text{ (psi)}$$

$$Ec = 150000 * \sqrt{f'c} \text{ (Kpa)}$$

Resistencia a la flexo Tracción (Mr):

$$Mr = K * \sqrt{f'c}$$

$S'c$ (Mr) y $f'c$ están dados en (psi), K : Es una constante que varía entre 7 y 12.

Nota: Esta característica del hormigón (concreto) se determina mediante el ensayo de flexión con carga al tercio. $f'c$ = Resistencia a la compresión simple del Hormigón.

f) Módulo de reacción de la subrasante y la subbase

El dato de entrada para el suelo de fundación es el módulo resiliente (Mr), este valor luego es transformado en el módulo de reacción de la subrasante tomando en cuenta la variación a través del año, este valor luego es corregido por la presencia de la subbase y por la presencia de lecho rocoso en caso que este se encuentre a una profundidad menor a 3 metros. Estas correcciones se efectúan mediante los nomogramas siguientes:

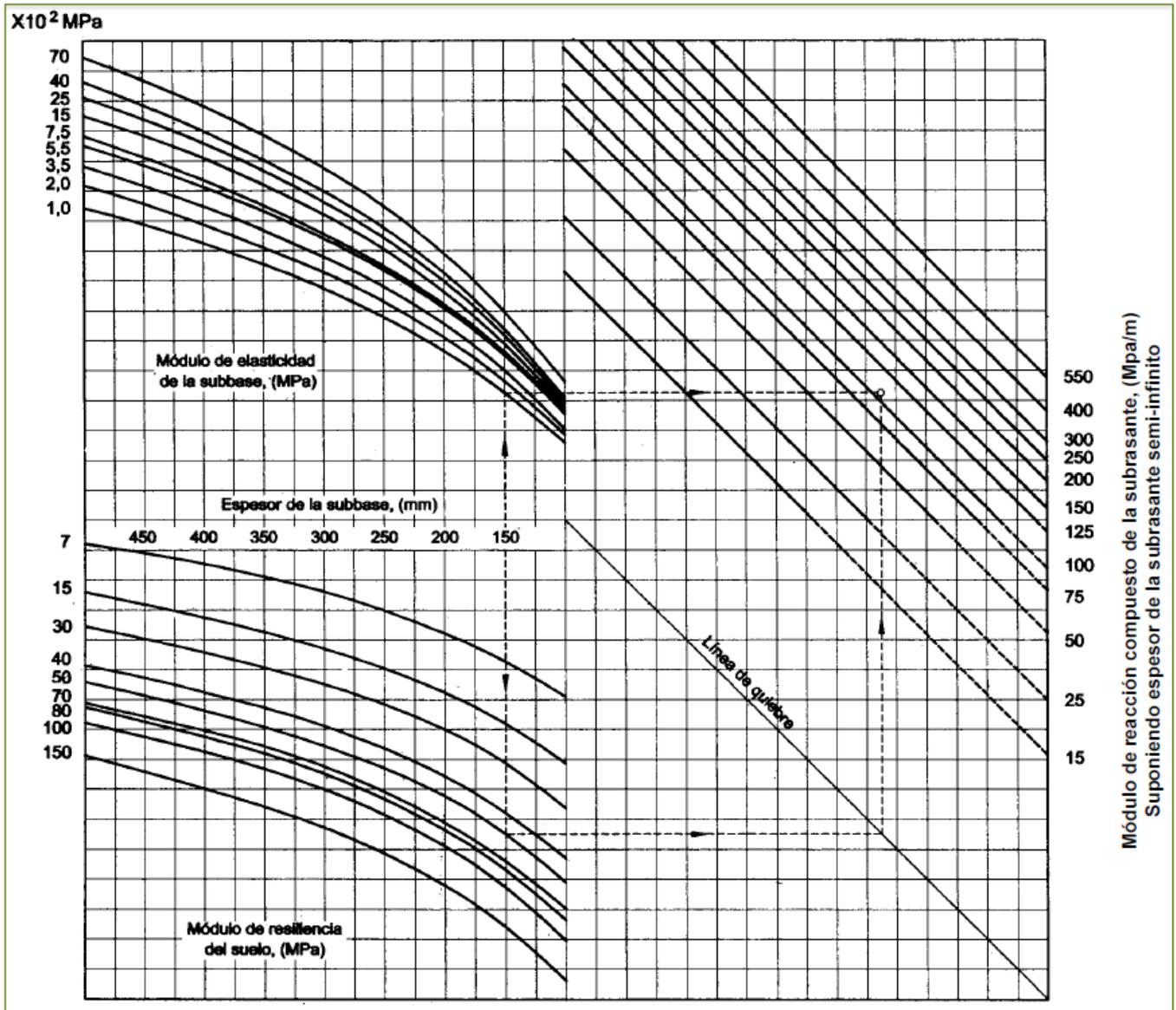


Figura 4: Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto
Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

Tabla 7: Factor de pérdida de apoyo LS.

Tipo de material	Pérdida de apoyo (LS)
Base de cemento tratamiento granular (E = 1'000,000 a 2'000,000 (lb/pulg ²)	0.0 a 1.0
Cemento mezclas de agregado (E = 500,000 a 1'000,000 (lb/pulg ²)	0.0 a 1.0
Asfalto tratado de base (E = 350,000 a 1'000,000 (lb/pulg ²)	0.0 a 1.0
Bituminosas estabilizado mezclas (E = 40,000 a 300,000 (lb/pulg ²)	0.0 a 1.0
Cal estabilizada (E = 20,000 a 70,000 (lb/pulg ²)	1.0 a 3.0
Sin consolidar los materiales granulares (E = 15,000 a 45,000 (lb/pulg ²)	1.0 a 3.0
Fine-grained or natural subgrade	2.0 a 3.0

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

De acuerdo al manual de MTC (Ministerio de Transportes y comunicaciones del Perú 2012) se considerarán como materiales aptos para las capas de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor (subrasante pobre o subrasante inadecuada), se procederá a la estabilización de suelos, para los cual se analizarán alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, estabilización con geo sintéticos u otros productos aprobados por el MTC, elevación de la rasante, cambiar el trazo vial, eligiéndose la más conveniente técnica y económica.

El procedimiento indicado por el MTC para tomar en consideración el aporte estructural de la sub base o base se obtienen a partir de aplicación de la siguiente ecuación:

Ecuación 4: Módulo de reacción compuesto o combinado de la subrasante.

$$K_c = \left[1 + \left(\frac{h}{38} \right)^2 \left(\frac{k_1}{k_0} \right)^{2/3} \right]^{-0.5} k_0 \dots (9)$$

Donde:

K_1 (kg/cm³) = Coeficiente de reacción de la sub base granular

K_c (kg/cm³) = Coeficiente de reacción combinado

K_0 (kg/cm³) = Coeficiente de reacción de la subrasante

h = Espesor de la sub base granular

g) Coeficiente de transferencia de carga

El coeficiente de transferencia de carga J es un índice numérico introducido para dar cuenta de la eficiencia de la transferencia de carga de diferentes diseños de conjunto. El cuadro siguiente presenta los valores de J para las condiciones de la pista de prueba. Los valores más bajos se asocian con dispositivos de transferencia de carga (tales como pasadores) y bermas.

Tabla 8: Coeficiente de transferencia de carga.

Berma	Asfalto		PCC	
	Si	No	Si	No
Dispositivo de transferencia de carga				
Tipo de pavimento con juntas y refuerzo CRCP	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
	2.9 – 3.2	NA	2.3 – 2.9	NA

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

h) Coeficiente de drenaje

Para tener en cuenta cambios en el requisito de espesor debido a las diferencias en las propiedades de drenaje de las capas de pavimento y el subsuelo, el coeficiente de drenaje C_d se incluyó en el diseño de espesor de AASHTO. Se considera un valor de $C_d = 1$ para las condiciones del AASHO Road Test.

Tabla 9: Coeficiente de drenaje.

CALIDAD DEL DRENAJE	TIEMPO QUE TARDA EL AGUA EN SER EVACUADA
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	el agua no evacua

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos de 1%	1 % - 5 %	5 % - 25 %	más del 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Mediano	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Malo	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy malo	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

i) Espesor de losa requerido

El espesor de la losa se requiere que se requiere se obtiene utilizando el nomograma siguiente o la ecuación correspondiente. El efecto de aspectos ambientales tales como la expansión de la capa soporte, el hinchamiento por congelamiento y el deterioro debido al desgaste podría resultar en una pérdida de servicio. Esta pérdida de capacidad de servicio se puede agregar a al causada por la carga de tráfico por motivos de diseño.

Ecuación 5: Formula de diseño para el Método AASHTO.

$$\log_{10} W_{82} = Z_r S_0 + 7.35 \log_{10} (D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \times \log_{10} \left(\frac{M_r C_{dx} (0.09 D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J (0.09 D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c / K)^{0.25}})} \right)$$

Donde:

Tabla 10: Parámetros de diseño que intervienen en la fórmula AASHTO de pavimentos rígidos.

W_{82} =	Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 Tn. métricas, a lo largo del período de diseño.
Z_R =	Factor de desviación Normal para el nivel de confiabilidad R
S_0 =	Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento.
D =	Espesor de la losa en milímetros.
ΔPSI =	Pérdida de Serviciabilidad prevista en el diseño.
P_t =	Índice de Serviciabilidad o Serviciabilidad final.
$S'C = Mr$	Resistencia media del concreto (en Mpa) a la flexotracción a los 28 días, método en los tercios de la luz.
J =	Coefficiente de transferencia de cargas en las juntas.
C_d =	Coefficiente de drenaje.
EC =	Módulo de elasticidad del hormigón, en Mpa.
K =	Módulo de reacción, dado en Mpa/m, de la superficie (base, subbase o subrasante), en la que se apoya el pavimento de concreto.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

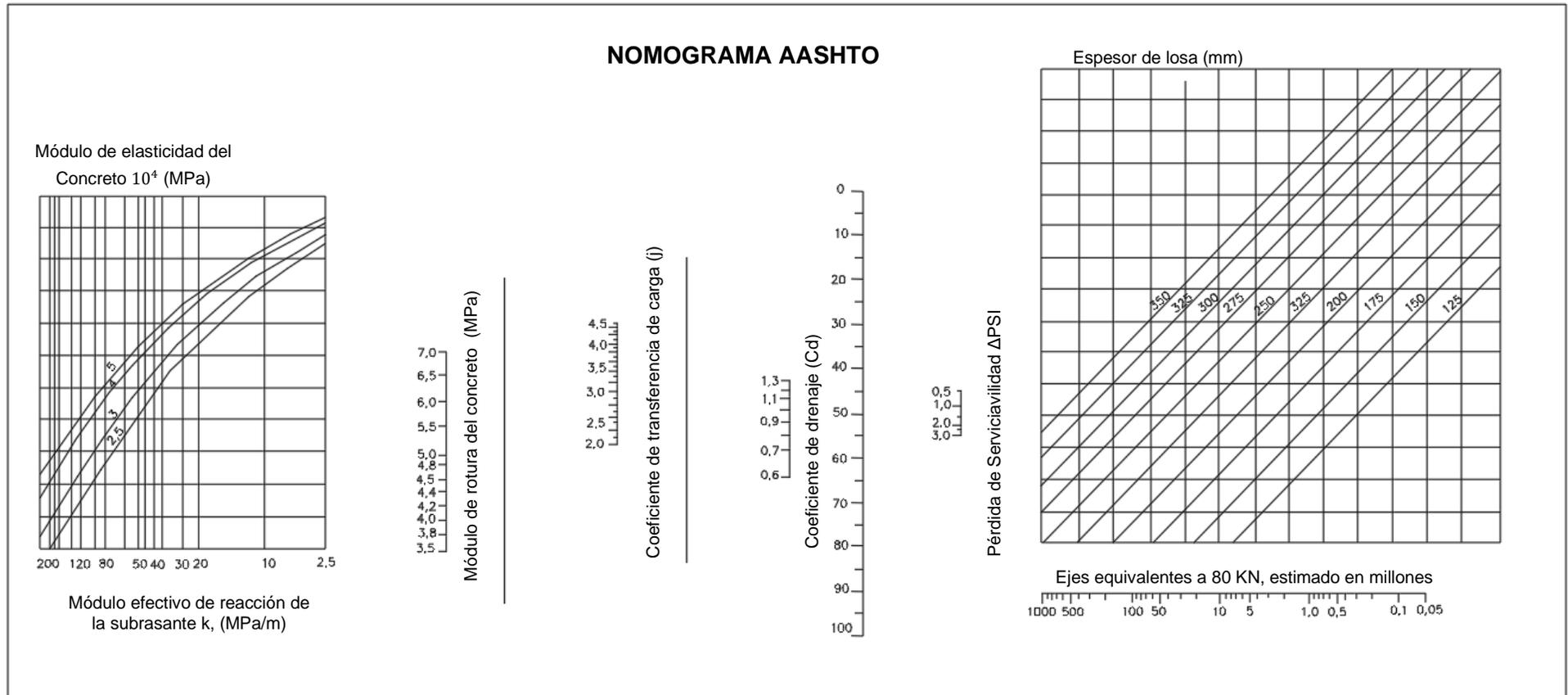


Figura 5: Nomograma de diseño AASHTO 93 para pavimentos rígidos.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993

Las juntas en los pavimentos rígidos.

Según Montejo (2010). En las losas de un pavimento rígido se presentan diversas clases de esfuerzos. Los más elevados son los generados por la circulación de los vehículos sobre ellas, los cuales se controlan con el correcto diseño del espesor de las losas, con la selección adecuada de la resistencia del concreto y con una calidad en la construcción tal que las propiedades determinadas durante el diseño se cumplan.

Otros esfuerzos generados en el pavimento se deben a los movimientos de contracción o expansión del concreto ya las diferencias en la temperatura, o en la humedad, entre la superficie y el apoyo de la losa. Estos esfuerzos se controlan con una adecuada selección de las dimensiones superficiales de las losas, en otras palabras, diseñando las juntas del pavimento.

Las juntas, transversales y longitudinales, se construyen para impedir que se presente fisuración del pavimento.

Además, los análisis de los esfuerzos generados en las losas, por cargas colocadas en diferentes posiciones, han demostrado que estos son mayores en las cercanías de los bordes de las losas y, aún más en sus esquinas, de lo cual se concluye que las juntas inducen en el pavimento rígido unas zonas de debilidad relativa, por lo que en su concepción se deben diseñar los mecanismos o tomar las precauciones necesarias para mantener su integridad estructural (Montejo, 2010)

Finalidad de las juntas

- a) **Por requisitos de construcción.** Lo más frecuente es construir los pavimentos rígidos por carriles, generándose juntas longitudinales, con una separación determinada mediante un diseño realizado con criterios técnicos.

Además de la junta longitudinal descrita, se presentan juntas de construcción transversales, cuando se suspenden las labores de colocación del concreto, bien sea por la finalización de la jornada laboral, por alguna interrupción en el suministro del material o por averías en alguno de los equipos empleados para su producción, transporte o colocación.

Pero esta interrupción debe ser tan larga como para que el concreto ya colocado haya alcanzado su fraguado final. El tiempo en que esto sucede depende de las propiedades del concreto, del empleo o no de aditivos retardantes y de las condiciones climáticas (Montejo, 2010).

b) Retracción del concreto. El concreto al endurecer ocupa menos volumen que cuando está fresco, debido fundamentalmente a las reacciones de hidratación que ocurren durante el fraguado y, en forma secundaria, al enfriamiento producido por el desprendimiento de calor originado en dicha reacción.

La retracción lineal de un elemento de concreto es tanto mayor cuanto menor sea la relación entre su volumen y su área superficial; en el caso de las losas de un pavimento esta relación es muy pequeña, debido al bajo espesor de ellas comparado con su superficie y, por lo tanto, se presenta una retracción longitudinal considerable (Montejo, 2010).

c) Dilatación térmica. El aumento de temperatura en el concreto ocasiona, en ausencia de restricciones, un incremento en su volumen; y por ser las losas del pavimento elementos de poco espesor en relación con su área superficial, este aumento de volumen es más notorio en su dimensión longitudinal. Si existe confinamiento (es decir, si se impide el aumento de longitud), se introducen

necesariamente esfuerzos de compresión, los cuales, aunque son bien resistidos por el concreto, tienen efectos secundarios perjudiciales, como producir alabeo en las placas e introducir esfuerzos en las estructuras colocadas dentro del pavimento (tapas de alcantarillas, por ejemplo) o colindantes con él (puente, intersecciones con otras vías, etc.) (Montejo, 2010).

d) La aparición de fisuras. Por alabeo tienen su origen cuando el concreto ha endurecido, y se somete a los cambios diarios de las condiciones climáticas, entonces se inducen esfuerzos debido a los gradientes de humedad y temperatura. En su día caluroso, la superficie del pavimento tiene mayor temperatura que su apoyo, obligando a las losas a levantarse en el centro y apoyarse en los extremos, lo que produce esfuerzos que pueden generar nuevas fisuras; en la noche, el fenómeno se invierte y los esfuerzos de tracción se desarrollan en la cara inferior del pavimento.

Para minimizar el efecto de la dilatación térmica de las losas de concreto se han desarrollado las “juntas de Expansión”, que son discontinuidades transversales en las losas, con una separación suficiente como para permitir el movimiento longitudinal de éstas (Montejo, 2010).

Estudio de los suelos para diseño de pavimentos

Montejo (2010), define que en la ingeniería de pavimentos se considera como roca a un agregado natural de granos minerales, unidos por grandes y permanentes fuerzas de cohesión, Por otra parte, se considera que el suelo es un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios

mecánicos comunes, tales como la agitación en agua. En la práctica no existe una diferencia tan simple entre roca y suelo, pues, las rocas más rígidas y fuertes pueden debilitarse al sufrir el proceso de meteorización, y algunos suelos endurecidos pueden presentar resistencias comparables a las de la roca meteorizada.

Ensayos que determinan las propiedades

Ensayo contenido de humedad (Norma NTP 339.160 - 2001)

El contenido de humedad de una masa de suelo es la cantidad de agua presente en dicha masa en términos de su peso en seco (Llique, 2011).

Siguiendo con la información que nos brinda Llique: Este modo operativo está basado en la Norma NTP 339.160. Se determina secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas solidadas. La pérdida de peso debido al secado en horno es considerada como el peso del agua. Se calcula con la siguiente fórmula:

Ecuación 6: Determinación del Contenido de Humedad.

$$W\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100 \dots \dots \dots (EC. - 01)$$

$$W\% = \frac{P_w}{P_s} * 100 \dots \dots \dots (EC. - 02)$$

Donde:

W%: Contenido de humedad.

Ph: Peso del suelo húmedo. (Gr.)

Ps: Peso del suelo seco. (Gr.)

Pw: Peso del agua contenida en la muestra de suelo (Gr.)

Proctor Modificado (NTP 339.141 – 1999)

El ensayo de Proctor es un ensayo de compactación de suelo que tiene como finalidad obtener la humedad óptima de compactación de un suelo para una determinada energía de compactación (Durán, 2002).

El proceso de compactación genera una disminución en el porcentaje de vacíos o índice de poros y un incremento del peso específico seco del suelo, el que puede deberse a distintos factores tales como la reorientación de las partículas, en el proceso de compactación puede generarse la fracturación de las partículas y de sus uniones (Murillo, 2010).

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en laboratorio las condiciones dadas de compactación en terreno. Históricamente, el primer método, respecto a la técnica que se utiliza actualmente, es el proctor estándar. El más empleado, actualmente, es el denominado proctor modificado en el que se aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que está más de acuerdo con las solicitaciones que las modernas estructuras imponen al suelo (Llique, 2011).

Todos ellos consisten en compactar el suelo, con condiciones variables que se especifican a continuación:

Tabla 11: Condiciones variables del Proctor Estándar.

Tipo de ensayo	PROCTOR ESTANDAR ASTM D698.91 (98)							
	Método		A		B		C	
Condiciones para la elección del método	% Ret. Acum. N°4 =<20%		% Ret. Acum. 3/8” =<20% y % Ret. Acum. N°4 >20%		% Ret. Acum. 3/4” =<30% y % Ret. Acum. 3/8” >20%			
Tipo de material utilizado	Pasante la malla N°4		Pasante la malla 3/8”		Pasante la malla 3/4”			
N° de capas (n)	3		3		3			
N° de golpes (N)	25		25		56			
Diámetro del molde (cm)	10.16 ± 0.04		10.16 ± 0.04		15.24 ± 0.04			
Altura del molde (cm)	11.64 ± 0.05		11.64 ± 0.05		11.64 ± 0.05			
Volumen del molde V (cm ³)	944 ± 0.14		944 ± 0.14		2124 ± 0.14			
Peso del martillo W (kg)	2.5 ± 0.01		2.5 ± 0.01		2.5 ± 0.01			
Altura de caída del martillo h (cm)	30.48 ± 0.13		30.48 ± 0.13		30.48 ± 0.13			
Diámetro del martillo (cm)	5.08 ± 0.025		5.08 ± 0.025		5.08 ± 0.025			
Energía de compactación (kg/cm) cm ³	6.054		6.054		6.027			

Fuente: Llique, 2011

Tabla 12: Condiciones variables del Proctor Modificado

Tipo de ensayo	PROCTOR MODIFICADO ASTM D1557.91 (98)							
	Método		A		B		C	
Condiciones para la elección del método	% Ret. Acum. N°4 =<20%		% Ret. Acum. 3/8” =<20% y % Ret. Acum. N°4 >20%		% Ret. Acum. 3/4” =<30% y % Ret. Acum. 3/8” >20%			
Tipo de material utilizado	Pasante la malla N°4		Pasante la malla 3/8”		Pasante la malla 3/4”			
N° de capas (n)	5		5		5			
N° de golpes (N)	25		25		56			
Diámetro del molde (cm)	10.16 ± 0.04		10.16 ± 0.04		15.24 ± 0.04			
Altura del molde (cm)	11.64 ± 0.05		11.64 ± 0.05		11.64 ± 0.05			
Volumen del molde V (cm ³)	944 ± 0.14		944 ± 0.14		2124 ± 0.14			
Peso del martillo W (kg)	4.54 ± 0.01		4.54 ± 0.01		4.54 ± 0.01			
Altura de caída del martillo h (cm)	45.72 ± 0.16		45.72 ± 0.16		45.72 ± 0.16			
Diámetro del martillo (cm)	5.08 ± 0.025		5.08 ± 0.025		5.08 ± 0.025			
Energía de compactación (kg/cm)cm ³	27.485		27.485		27.363			

Fuente: Llique, 2011.

C.B.R. (NTP 339.145 – 1999)

El ensayo CBR mide la carga necesaria para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra de suelo, compactada según su proctor, formada por tres probetas (generalmente compactada a 15, 30 y 60 golpes/capa), después de haberla sumergido en agua durante cuatro días y de haber medido su hinchamiento. El hecho de sumergir la muestra se debe a que así podemos prever la hipotética situación de acumulación de humedad en el suelo después de la construcción.

Plasticidad y límites de consistencia o de Atterberg (NTP 339.129 - 1999):

Límite Líquido:

El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando este se halla en límite entre el estado plástico y estado líquido (MTC E 110 – 2000).

Límite Plástico

Se determina mediante la elaboración de cilindros de 3 mm. de diámetro, y está definido por la humedad a la cual estos rollos se agrietan. El límite plástico se encuentra relacionado con el agua absorbida y la humedad más profunda (Warketin, 1966).

Índice de Plasticidad

Es la variación de humedad dentro de la cual el suelo se mantiene en estado plástico. (Murillo, 2010).

Costos de Construcción.

La elaboración de los costos es uno de los factores más importantes que se debe tener en cuenta en la construcción de obras, con la finalidad de saber el precio total de una obra, el cual es producto de la sumatoria de distintos ítems componentes del presupuesto total de obra. Es indispensables realizar el análisis de precios unitarios de cada una de las actividades con sus incidencias directas e indirectas. Costos y Presupuestos de Edificación (CAPECO).

➤ Costos directos.

- Costo de materiales.
- Costo de mano de obra.
- Herramienta y equipo.
- Beneficios sociales.

➤ Costos indirectos.

- Gastos generales e imprevistos.
- Utilidad.
- Impuestos.

Costos Directos.

El costo directo se conforma de tres componentes que dependen del tipo de actividad que se está realizando el costo. La estructura que tienen los Costos Unitarios en cada Ítem de construcción, está conformada por:

- Materiales e Insumos
- Mano de Obra.
- Maquinaria y Equipo

Costos Indirectos.

Los costos indirectos son los gastos que por su naturaleza son de aplicación a las obras ejecutadas en un tiempo determinado, comprendiéndose dentro de los siguientes aspectos:

- Beneficios Sociales y de Trabajo.
- Amortización o alquiler de maquinaria, equipo y herramientas.
- Gastos generales en los que están comprendidos los siguientes rubros:
 - a. Alquiler de oficinas, alumbrado, teléfono, limpieza y otros.
 - b. Sueldos incluyendo cargas sociales del personal administrativo.
 - c. Material de escritorio.
 - d. Gastos de movilidad, representación y viáticos del personal superior y Administrativo.
 - e. Gastos de inscripción y permanencia en diferentes instituciones.
 - f. Gastos en la compra de documentos de Licitación y otros.
 - g. Gastos notariales.
 - h. Gastos de garantía: (Buena ejecución, cumplimiento de contrato, seriedad de propuesta, correcta inversión de anticipo, etc.)
 - i. Utilidad que es un porcentaje del costo, determinado por la Empresa.
 - j. Pago de impuestos de financiamiento a diferentes instituciones.
 - k. Pago de impuestos de valor agregado y a las transacciones.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál de los métodos de diseño de pavimento rígido AASHTO Y PCA, genera menor espesor de pavimento y, por ende, menor costo de construcción en la evaluación de una vía pública de Cajamarca?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

“Hacer un análisis comparativo de estructuras de pavimento rígido mediante las metodologías AASHTO Y PCA en una vía pública de Cajamarca”

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físico-mecánicas del material proveniente de la subrasante de la vía pública Pasaje San Mateo, Barrio Mollepampa.
- Realizar el estudio de tráfico de la vía pública seleccionada.
- Determinar los espesores que conforman el pavimento rígido por las metodologías AASHTO y PCA.
- Determinar el análisis de costos de pavimento para las metodologías AASHTO y PCA

1.4. Hipótesis

El método de diseño de pavimentos rígido AASHTO genera menor espesor de pavimento y costo, respecto al método de diseño PCA en una vía pública de la ciudad de Cajamarca.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La presente investigación es descriptiva, ya que se partirá en el estudio con criterios teóricos, los cuales serán sistematizados de tal forma que permitan poner en manifiesto las características de ambas metodologías para obtener el mejor resultado.

2.2. Población y muestra

- **Población:** Pertenece al conjunto de vías de Pavimento Rígido en el entorno del distrito de Cajamarca.
- **Muestra:** La muestra escogida para el estudio de la presente tesis es el Pasaje “San Mateo” ubicada entre la Av. Nuevo Cajamarca y La AV. La Paz, Barrio Mollepampa, Ciudad de Cajamarca.

2.3. Materiales, instrumentos y métodos

La investigación se realizará con base en lo siguiente:

- Método de diseño para pavimentos rígidos según PCA edición 1984.
- Método de diseño para pavimentos rígidos según AASHTO 1993.
- Investigaciones previas acerca de los métodos de diseño AASHTO y PCA para pavimentos rígidos.
- Hojas de cálculos para los diseños de pavimentos rígidos.

En este capítulo se realizará la comparación de los métodos de diseño para pavimentos rígidos según AASHTO edición 1993 y PCA edición 1984.

Luego de obtener la información requerida, evaluaremos la estructura del pavimento por cada método (AASHTO Y PCA), según los parámetros que intervienen en cada metodología y se elaborará una tabla de resumen de los parámetros de diseño y su influencia en el espesor del pavimento.

De esta manera será factible determinar cuál método presenta un mejor diseño de pavimentos por los parámetros que intervienen en el diseño. Seguidamente determinaremos los costos de construcción que presenta cada metodología, para saber con certeza cual diseño conviene realizar a través de un criterio técnico económico.

Equipos e instrumentos de laboratorio de mecánica de suelos.

Contenido de Humedad (NTP 339.160 - 2001).

A. Materiales y equipos.

- **Material granular.**

Se utilizó el agregado con la humedad natural de la cantera.

- **Balanzas**

Se necesita una balanza con sensibilidad 0.01 gr. Para pesar el material.

- **Horno (estufa).**

Para secar el material que mantiene una temperatura 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).

- **Taras.**

Las adecuadas para el manejo y para secar el material de las muestras.

B. Procedimiento del contenido de humedad

- Pesamos las taras donde vamos poner a secar el material en el horno.
- Agregamos la muestra humedad a la tara.
- Pesamos la muestra humedad en la tara pesada anteriormente.
- Colocamos en el horno las muestras por un tiempo promedio de 24 horas.
- Luego trascurrido las 24 horas se pesó el material para obtener el peso seco y calcular el contenido de humedad.

Límites de Attenberg (NTP 339.129 – 1999)

Limite Líquido.

A. Materiales y equipos.

- **Recipiente para almacenaje.** Una vasija de porcelana de 115 mm (4 ½") de diámetro aproximadamente.
- **Espátula.** De hoja flexible de unos 75 mm (3") de longitud y 20 mm (¾") de ancho aproximadamente.
- **Aparato del límite líquido (o de Casagrande).**
- **De operación manual.** Es un aparato consistente en una taza de bronce con sus aditamentos, construido de acuerdo con las dimensiones señaladas.
- **De operación mecánica.** Es un aparato equipado con motor para producir la altura y el número de golpes.
- **Acanalador.** Conforme con las dimensiones críticas indicadas.
- **Calibrador.** Ya sea incorporado al ranurador o separado, de acuerdo con la dimensión crítica "d", y puede ser, si fuere separada, una barra de metal de 10.00 ± 0.2 mm ($0.394" \pm 0.008"$) de espesor y de 50 mm (2") de largo, aproximadamente.
- **Recipientes o Pesa Filtros.** De material resistente a la corrosión, y cuya masa no cambie con repetidos calentamientos y enfriamientos. Deben tener tapas que cierren bien, sin costuras, para evitar las pérdidas de humedad de las muestras antes de la pesada inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera tras el secado y antes de la pesada final.
- **Balanza.** Una balanza con sensibilidad de 0.01 gr.
- **Estufa.** Termostáticamente controlado y que pueda conservar temperaturas de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) para secar la muestra.

B. Procedimiento del Limite Líquido.

- Tómese una muestra que pese 150 - 200 g de una porción de material completamente mezclado que pase el tamiz de 0.425 mm (N° 40).
- Colóquese la muestra de suelo en la vasija de porcelana y mézclese completamente con 15 a 20 ml de agua, agitándola, amasándola y

tajándola con una espátula en forma alternada y repetida. Realizar más adiciones de agua en incrementos de 1 a 3 ml.

- Cuando haya sido mezclada suficiente agua completamente con el suelo y la consistencia producida requiera de 30 a 35 golpes de la cazuela de bronce para que se ocasione el cierre.

Límite Plástico

A. Materiales y equipos

- Una porción de la mezcla preparada para el límite líquido.
- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Estufa de control de temperatura.
- Espátula
- Capsula de porcelana.
- Placa de vidrio
- Taras

C. Procedimiento del límite Plástico

- A la porción de mezcla preparada para el límite líquido agregar suelo seco de tal manera que la pasta baje su contenido de humedad.
- Enrollar la muestra con la mano sobre la placa de vidrio hasta obtener cilindros de 3mm de diámetro y que presenten agrietamientos, determinar su contenido de humedad.
- Repetir el ensayo una vez más.
- El límite plástico es el promedio de los 2 valores de contenidos de humedad, si la diferencia entre estos 2 valores es mayor que dos puntos de porcentaje, repetir el ensayo.

Índice Plástico

Se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico para un suelo dado.

Proctor Modificado (NTP 339.141 – 1991).

A. Materiales y equipos

- **Molde.** Los moldes deben ser cilíndricos hechos de materiales rígidos y las paredes sólidas, cada molde tiene un plato de base y un collar de extensión ensamblado, ambos de metal rígido y contruidos de modo que pueda adherir de forma segura y fácil de desmoldar. (MTC E 115 -2000).
- **Pisón o Martillo.** La cara del pisón debe ser plana y circular de 50.8 +/- 0.127 mm de diámetro, una tolerancia de 0.13 mm (0.005”) que pese 2.495 +/- 0.009 kg. El pisón deberá estar equipado con una guía que tenga suficiente espacio libre para la caída (MTC E 115 -2000).
- **Extractor de muestras.** Puede ser una gata, estructura u otro mecanismo adaptado con el propósito de extraer los especímenes compactados del molde (MTC E 115 -2000).
- **Balanza.** Se utilizará una balanza para pesar los moldes de 6” con los suelos húmedos compactados y una balanza para pesar las taras con sensibilidad de 0.1 gr.
- **Horno.** Para secar las muestras entradas que han sido compactadas.
- **Regla.** Para enrazar el molde con la muestra compactada.
- **Tamices.** Se utilizó el tamiz de la malla ¾”
- **Herramientas de mezcla.** Se utilizó cucharones para mezclar el material
- **Fiola.** Para medir el agua para compactar el material.

B. Procedimiento.

- La muestra seca requerida para el método “C” es aproximadamente de 30 kg para la realización de compactación.
- Se tamizo por el tamiz N° 3/4” para la realización de la comptación por el método “C”.
- Se selección el molde para la realización del ensayo.
- Luego se compacto una muestra de 6 kg por punto en cual se hizo cinco puntos para formar la curva.
- Se sacó la muestra representativa compactada de cada molde para luego ponerlo al horno y sacar el contenido de humedad y la máxima densidad seca.
- Luego se realizó los cálculos en tablas del programa Excel para obtener la curva y encontrar el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca.

California Bearing Ratio “CBR” (NTP 339.145 – 1999).

A. Materiales y equipos

- Muestra alterada seca
- Papel filtro
- Equipo CBR (3 moldes cilíndricos con placa de base y collar de extensión, 3 discos espaciadores, 3 placas de expansión, 3 sobrecargas cada una de 4.5 kg. de peso y 3 trípodes).
- Pisón proctor modificado.
- Balanza con precisión de 1 gr.
- 3 diales de expansión
- Estufa con control de temperatura.
- Probeta de 1000 ml.
- Recipiente de 6kg. de capacidad.
- Espátula
- Taras identificadas.

Descripción de los pavimentos

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (Montejo, 2010).

Etapas del diseño de Pavimentos

Las etapas del diseño del pavimento dependen en gran medida si se trata de una estructura nueva o si es más bien un mejoramiento o rehabilitación de una vía existente, a continuación, se presenta la secuencia de diseño de pavimento de una vía nueva:

- Estudio de la subrasante.
- Definición del tipo de superficie de rodadura y los componentes estructurales.
- Selección de los materiales.
- Estudio del tráfico.
- Estudio de las condiciones ambientales y de drenaje
- Sectorización del tramo.
- Diseño de los espesores de cada capa.
- Análisis del ciclo de vida (incluido mantenimiento y construcción).
- Determinación del tipo de pavimento y de los espesores finales.

(ICG, 2012).

Funciones de la estructura de Pavimentos

De acuerdo al ICG (2012), las principales funciones que cumple una estructura de pavimento son las siguientes:

- Proporcionar a los usuarios circulación segura, cómoda y confortable, con adecuada regularidad (rugosidad), y suficiente resistencia a la fricción.
- Proporcionar a los vehículos acceso bajo cualquier condición de clima.
- Capacidad de carga suficiente de los materiales que componen la estructura.
- Reducir y distribuir la carga de tráfico para que esta no dañe la subrasante y/o el suelo de fundación.
- Proteger la subrasante y el suelo de fundación del clima (agua y congelamiento).
- Cumplir requerimientos medioambientales y estéticos.
- Limitar el ruido y la contaminación del aire.
- Reducir los costos de operación vehicular, reducir el tiempo de viaje y reducir los accidentes.
- Tener suficiente durabilidad para no deteriorarse antes de tiempo debido a las variables ambientales (agua, oxidación, efectos de la temperatura).

Factores de diseño de pavimentos

El ICG (2012) indica que los factores de diseño son mostrados en el siguiente cuadro. Sin embargo, se debe indicar que los métodos de diseño se consideran solamente parte de ellos en el proceso de diseño debido a las simplificaciones introducidas en la metodología o en otros casos por la complejidad del análisis si se tuviese que considerar todas las variables o factores que afecten el diseño del pavimento.

Tabla 13: Factores de diseño de pavimentos.

Tipo	Factor
Tráfico y Carga	Carga por eje: ejes simples, eje simple dual, eje tandem y eje tridem.
	Numero de repeticiones: por cada tipo de eje (espectro de cargas) o en ejes equivalentes
	Área de contacto del neumático
	Presión de contacto del neumático.
	Velocidad del vehículo.
Medio ambiente	Temperatura del medio ambiente y en cada capa
	Gradiente térmico: variación horaria de la temperatura
	Precipitación pluvial
	Nivel freático
	Radiación solar
Materiales	Capacidad de soporte de la subrasante: módulo resiliente, CBR, módulo de reacción.
	Características de los mejoramientos
	Bases y subbases granulares: CBR, Módulo resiliente y módulo de poisson
	Materiales estabilizados: Resistencia a la compresión, módulo resiliente
	Mezcla asfáltica en caliente: módulo dinámico, propiedades de fatiga y parámetros de deformación permanente.
	Concreto hidráulico: coeficiente de expansión, módulo de rotura, propiedades de fatiga y módulo de elasticidad
	Acero de refuerzo: esfuerzo de fluencia
	Mezclas asfálticas en frio
Criterios de falla y condiciones de servicio	Fisuras por fatiga
	Ahuellamiento
	Fisuras
	Erosión o bombeo
	Rugosidad
	Deslizamiento
	Fallas en juntas

Fuente: ICG, 2012

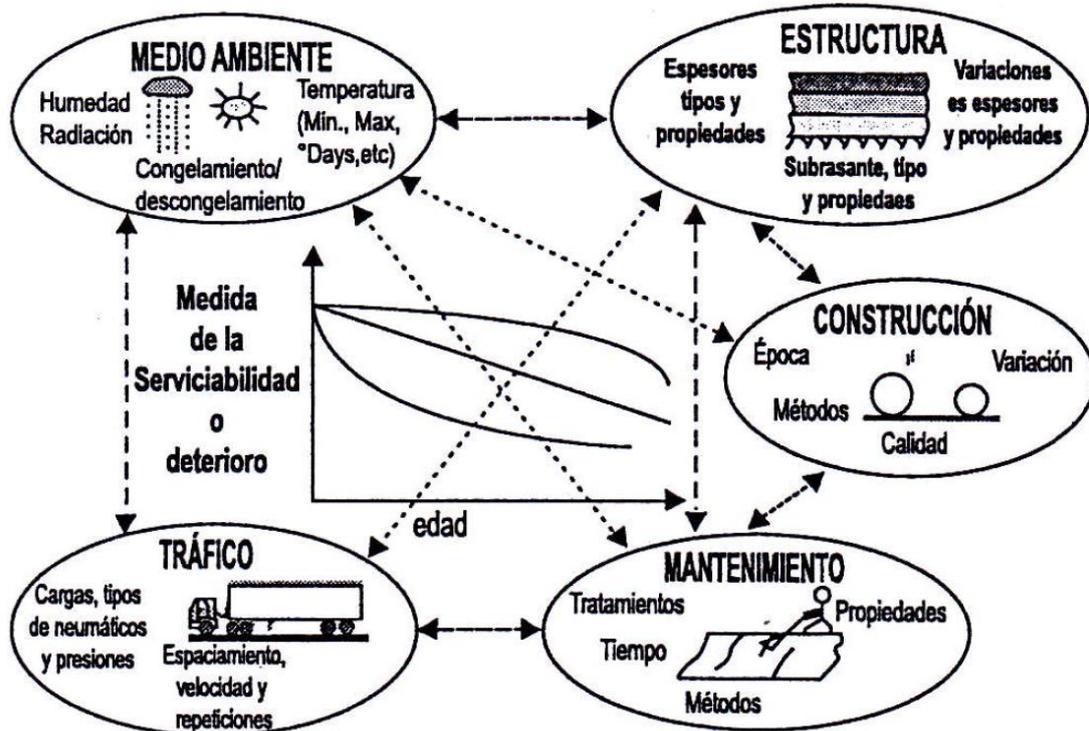


Figura 6: Relación entre los factores de diseño y la serviciabilidad o deterioro
Fuente: ICG, 2012

Clasificación de los pavimentos

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

Pavimento Rígido.

Un pavimento rígido tiene como elemento estructural fundamental una losa de concreto, esta se apoya sobre una capa de material seleccionado, a la que se da el nombre de sub base; cuando la subrasante del pavimento tenga una calidad suficiente buena, la losa de concreto puede colocarse directamente sobre ella, prescindiéndose así de una sub base especial.

De lo que se trata es de que la losa de concreto tenga un apoyo suficientemente uniforme y estable, como para garantizar que no quede localmente falta de soporte; como se logre esto y qué capas de suelo hay que proporcionar para ello depende de la calidad de los materiales que se estén utilizando, de los niveles de compactación que se empleen y de condiciones locales de clima y drenaje. (Rico y Del Castillo, 1999)

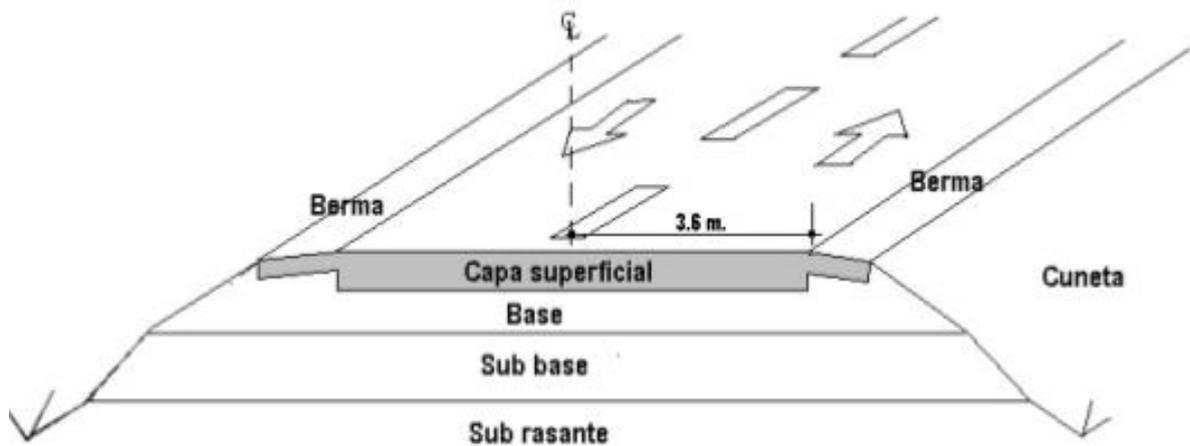


Figura 7: Sección típica de un pavimento.

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO 1993.

Tipos de Pavimento Rígidos

Según el IGC (2012), los pavimentos rígidos están compuestos por una o varias capas de concreto hidráulico apoyado en capas granulares, pudiendo ser:

- Simple o monolítico.
- Simple con pasadores o barras de transferencia (dowels) JPCP.
- Con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural JRCP.
- Con refuerzo continuo sin función estructural CRCP.
- Con refuerzo estructural.
- Preesforzado.

Estructura de un Pavimento Rígido

a) La Subbase:

Tiene como funciones principales controlar los cambios volumétricos de la subrasante e incrementar su módulo de reacción. Constituye una plataforma estable de trabajo durante la construcción del pavimento y en ocasiones puede constituir una capa drenante. Se trata de un elemento importante para garantizar la uniformidad del soporte de las losas, y se construye por lo general con materiales granulares no cementados, los cuales, cuando el tránsito llega a ser muy pesado e intenso, se hace necesario estabilizar, generalmente con cemento portland, para evitar que bajo su acción sufran erosiones indeseables, recurriéndose a subbases de grava-cemento y aun de concreto pobre. Por otra parte, cuando el tránsito es ligero y el material de la capa subrasante es de buena calidad, se puede suprimir la subbase, apoyando las losas directamente sobre la subrasante. Debe mencionarse que eventualmente a esta capa se le denomina base, por su posición inmediatamente bajo la losa. Sin embargo, se le designa como subbase debido a que en general los requerimientos de calidad de los materiales no son tan estrictos como los de una base en un pavimento flexible, teniendo en cuenta que la losa de concreto reduce los esfuerzos impuestos a esta capa por las cargas aplicadas por los vehículos (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2002).

Funciones de la subbase:

Según Montejo (2010), señala que las funciones de la subbase son las siguientes:

- La función más importante es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremo del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licua el suelo fino

de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulares a través de las losas.

- Servir como capa de transición y suministrar un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento.
- Facilitar los trabajos de pavimentación.
- Mejorar el drenaje y reducir por tanto al mínimo la acumulación de agua bajo el pavimento.
- Ayudar a controlar los cambios volumétricos de la subrasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento.
- Mejorar en parte la capacidad de soporte del suelo de la subrasante.

b) Losas de concreto hidráulico:

Constituye la parte fundamental del pavimento rígido, debiendo estar capacitadas para resistir los esfuerzos producidos por el tránsito y los efectos de la intemperie, y proporcionar además una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo el efecto combinado del tránsito y de los factores ambientales durante su vida útil, de esta manera que solo deban ser necesarias algunas actuaciones locales y esporádicas de conservación, de poca importancia y costo (IMCYC, 2002).

Elementos que conforman la losa

De acuerdo a Rondón y Reyes (2015), manifiestan que los elementos que conforman la losa son las siguientes:

- i) Perfil y planta: Un perfil típico de una estructura de pavimento rígido cuya losa de concreto presenta junta con pasadores se muestra en la figura (8). h es el espesor de la losa, el cual oscila entre 18 y 30 cm; p es la profundidad del sello ($h/6 < p < h/4$); h_p y h_{mc} son el espesor de la plataforma y el material de conformación respectivamente.

Para el caso de bases o subbases granulares el espesor h_p oscila entre 12 y 30 cm (por lo general se recomienda 15 cm) y para el caso de bases estabilizadas con cementante hidráulico h_p oscila entre 10 y 25 cm. h_{cm} se obtiene con base en el tipo de suelo de subrasante por sustituir.

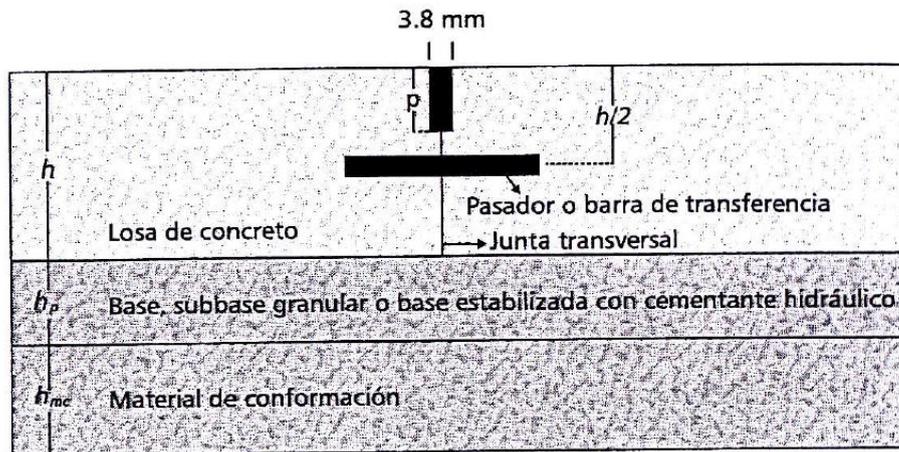


Figura 8: Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con junta con pasadores.
Fuente: Rondón y Reyes, 2015

En la figura 9, se presenta una vista típica en planta de un pavimento rígido de dos carriles (uno en cada dirección). L es la longitud de cada losa individual, b es el ancho del carril y s es la separación entre barras de acero. La forma ideal de una losa en un pavimento rígido es la cuadrada (ancho y largo igual); sin embargo, en la práctica es difícil dimensionarlas así, ya que por lo general se quiere evitar la ejecución de cortes en la losa. Longitud máxima L en metros de la losa (L_{max}) se puede establecer empleando las ecuaciones 1 y 2, donde b es el ancho del carril en metros y h es el espesor de la losa en metros. Se recomienda que la losa no exceda de 6 m en su longitud (Rondón y Reyes, 2015).

$$L_{max} = 1.25 b \quad (1)$$

$$L_{max} = 25 h \quad (2)$$

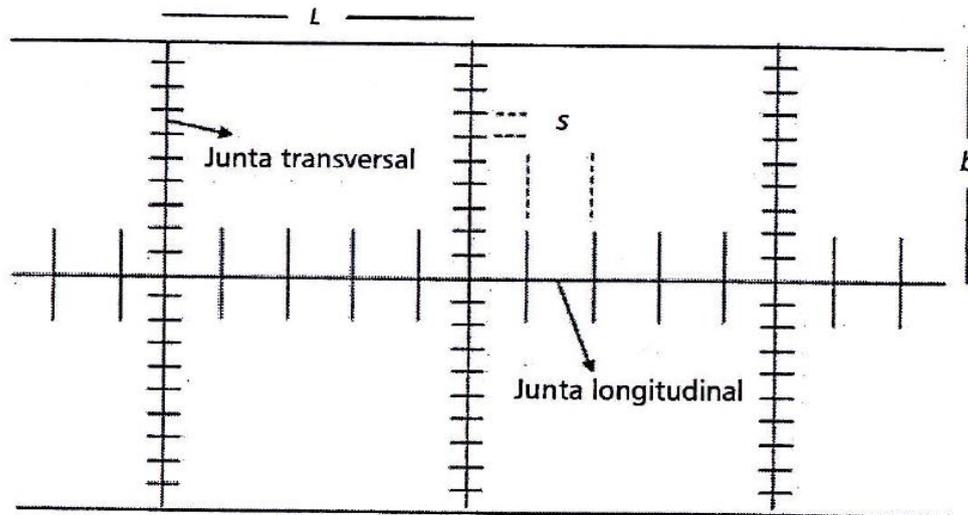


Figura 9: Vista de planta típica de una losa de pavimento rígido con junta con pasadores y barras de anclaje

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

ii) Juntas y barras de acero: Las juntas en una losa de concreto de pavimento rígido son discontinuidades dispuestas la mayoría de las veces en sentido longitudinal y transversal (figura 12). Existen tres tipos de juntas: 1) Las de construcción; 2) Aquellas que ayudan a controlar agrietamientos por fenómenos térmicos, denominadas de contracción o retracción y alabeo; 3) Las de expansión o aislamiento. Un perfil típico de estas juntas se representa en la figura 12 y dos ejemplos de vistas en planta de juntas de expansión en la figura 6 (Rondón y Reyes (2015)).

a) Cuando el concreto se ha construido a ambos lados de la junta.

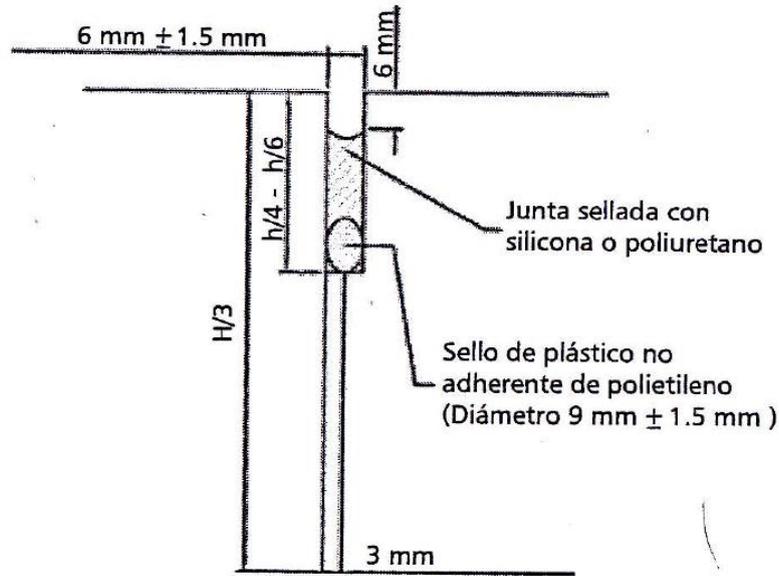


Figura 10: Perfil típico de juntas:
Fuente: Rondón y Reyes, 2015

b) Junta de expansión o aislamiento.

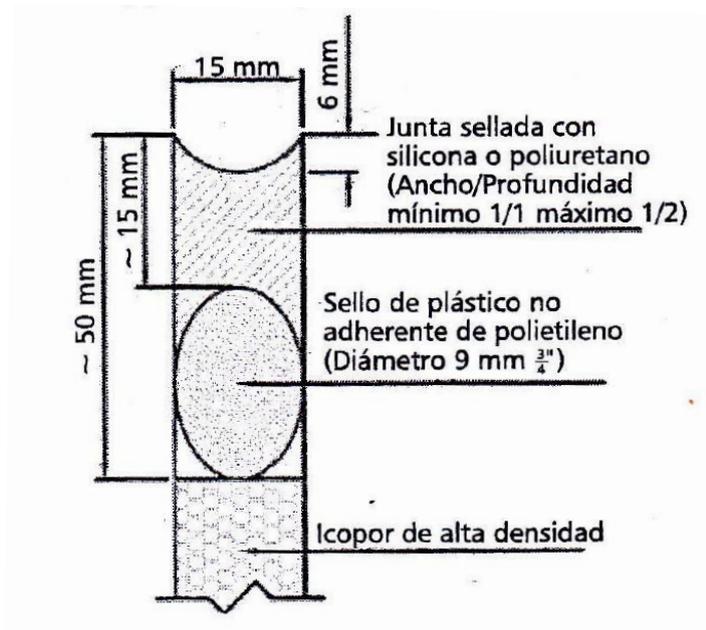


Figura 11: Perfil típico de juntas:
Fuente: Rondón y Reyes, 2015

c) triangular rodeando un sumidero; b) circular rodeando un pozo de inspección

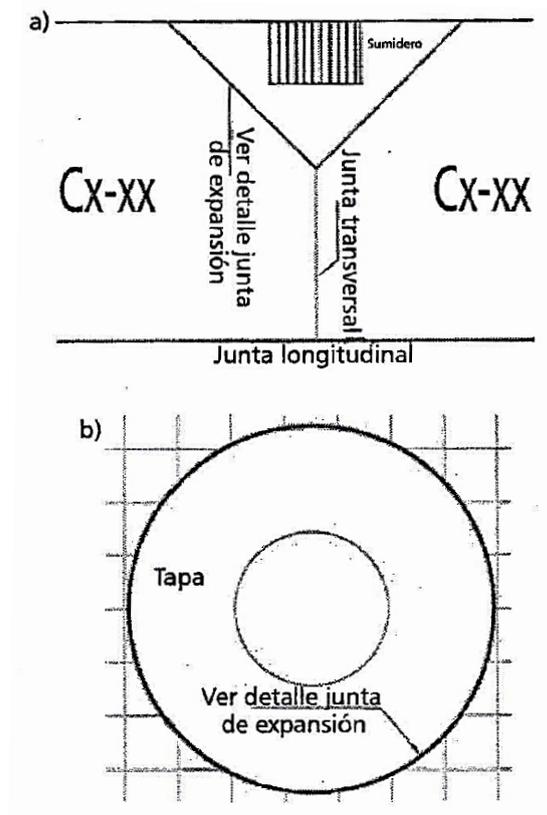


Figura 12: Ejemplo de una vista en planta de juntas de expansión:

Fuente: Rondón y Reyes, 2015

Funciones de las losas de concreto hidráulico:

Según Montejo (2010), indica lo siguiente sobre las funciones de la losa de concreto hidráulico:

- Superficie de rodamiento: La losa debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
- Impermeabilidad: Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- Resistencia: Su resistencia a la tensión completa la capacidad estructural del pavimento.
- Soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen.

Variables de diseño de Pavimento Rígido

Según el IMCYC (2002), existen diversos factores que deben ser tomados en cuenta para el diseño de los pavimentos rígidos; a continuación, se indican los que se consideran más importantes.

a) Capa subrasante

Constituye la capa de apoyo de los pavimentos, la cual puede estar formada por el propio terreno natural, perfilado y compactado adecuadamente. Sin embargo, cuando el material local no tiene las características para cumplir tal función, por presentar problemas de expansión, bajo valor relativo de soporte, etc., se recurre a la utilización de materiales seleccionados de mejor calidad, o bien a su tratamiento con productos tales como el cemento portland, sal, asfaltos, etc., dependiendo de su selección de aspectos prácticos y económicos.

La capacidad de respuesta estructural de la subrasante se determina mediante el módulo de reacción, k , que constituye uno de los principales parámetros de diseño de los pavimentos rígidos. Teniendo en cuenta la elevada rigidez del concreto y el efecto de viga desarrollado por las losas del pavimento, los niveles de esfuerzos y deformaciones producidos en la subrasante son muy bajos, de manera que no se requiere un elevado valor de soporte en dicha capa, siendo más importante que dicho efecto de soporte sea uniforme, condición que además debe mantenerse a través del tiempo.

Rondón y Reyes (2015), indican que algunas cualidades deseables en una subrasante son:

- Poseer alta resistencia mecánica.
- Permanencia de la resistencia durante la vida útil del pavimento.
- Alta densidad o grado de compacidad.
- Baja susceptibilidad a cambios volumétricos y al agua.
- Buena trabajabilidad durante la compactación.

Para un diseñador geométrico de vías la subrasante es una línea imaginaria, mientras que para un ingeniero de pavimentos es un material (suelo natural generalmente) que constituye tal vez la principal variable de diseño de pavimentos.

En un diseño de pavimento es importante considerar su potencial expansivo y su capacidad portante (expresada a través de su resistencia al corte y/o rigidez bajo carga cíclica). Para dimensionar el pavimento, los diseñadores caracterizan la subrasante ya sea a través de la relación de soporte de California (CBR por sus siglas en inglés), del módulo de reacción de la subrasante (K) o del módulo resiliente (M_r). Dependiendo del tipo de estructura que se diseñe y/o del método empleado, el diseñador deberá utilizar alguno de los parámetros mecánicos mencionados.

b) Fenómeno de Bombeo

El fenómeno de bombeo en pavimentos consiste en la expulsión de una mezcla de suelos y agua con el paso de los vehículos, que tiene lugar por las juntas de losas, grietas y bordes del pavimento. El efecto de bombeo puede ocurrir cuando los pavimentos de concreto se desplantan directamente sobre suelos plásticos de gramo fino o sobre subbases propensas a la erosión. El bombeo continuo de los finos da lugar al desplazamiento de un volumen significativo de suelo que origina un vacío, la disminución de la uniformidad del apoyo y, por consiguiente, que los bordes de las losas queden sin soporte, provocando fracturas en las losas o escalonamientos en las juntas. Se necesitan tres factores para que tenga lugar el fenómeno de bombeo, a saber:

- Una subrasante que pueda adquirir un estado de suspensión.
- Agua libre entre el pavimento y la subrasante o subbase.
- Paso frecuente de grandes cargas por eje.

(IMCYC, 2002)

c) Clima

Las variaciones de temperatura y humedad que ocurren estacionalmente e inclusive en lapsos tan cortos como un día, producen gradientes que generan esfuerzos y deformaciones en las losas que contribuyen a su agrietamiento. Bajo tales efectos, las losas se expanden y se contraen, produciéndose además alabeos que adoptan curvaturas cóncavas durante la noche y convexas durante el día, pudiendo adicionalmente el suelo de cimentación experimentar cambios volumétricos. La infiltración de agua de lluvia por juntas, grietas o acotamientos, en combinación con suelos finos y tránsito pesado, puede provocar el bombeo o erosión de los materiales de apoyo de las losas con la consiguiente pérdida de su capacidad portante (IMCYC, 2002).

d) Resistencia del concreto

Constituye uno de los factores más importantes que debe considerarse en el diseño de los pavimentos rígidos. Debido a que las losas de concreto se flexionan bajo el efecto de las cargas impuestas por el tránsito, se producen en ellas esfuerzos de tensión y compresión, siendo los primeros obviamente más importantes debido a que la resistencia del concreto a la flexión es apenas del orden de 10 por ciento de su resistencia a la compresión. Por esta razón es que, para efectos de diseño, se deben considerar los esfuerzos y resistencia del concreto a la tensión, determinándose esta última por medio del módulo de ruptura a la tensión por flexión, MR, obtenido al ensayar vigas en la prueba de carga en los tercios del claro. Estas pruebas se realizan en especímenes cuyas edades corresponden a 7, 14, 28 y 90 días, utilizándose las dos primeras para control de obra y definir la apertura al tránsito.

Las resistencias a 28 días se utilizan para el diseño de pavimentos para carreteras, y las correspondientes a 90 días, generalmente para el diseño de pavimentos de aeropuertos. Con relación a los valores de los módulos comúnmente especificados para el diseño de

pavimentos, éstos varían por lo común de 3.5 a 5.0 MPa (35 a 50 kg/cm²). En general, se recomienda utilizar los módulos superiores a 4.0 MPa (40 kg/cm²) para pavimentos de autopistas y carreteras para tránsito pesado (IMCYC, 2002)

e) Juntas y dispositivos de transferencia de carga

La construcción de los sistemas de juntas es necesaria para el control de agrietamientos por contracción, cambios de temperatura y humedad. Es necesaria además para modular el pavimento con dimensiones prácticas para su construcción. Por otra parte, la presencia de cada junta constituye una interrupción estructural en la losa de concreto, que puede afectar severamente su comportamiento, incrementando la magnitud de los esfuerzos de la losa al provocarse aplicaciones de carga en posiciones desfavorables, como son cerca de sus esquinas y bordes (IMCYC, 2002).

f) Tránsito

Por lo regular, el tránsito es el factor más importante del diseño de los pavimentos. Su importancia aumenta con el número de vehículos pesados que circulen generando un número importante de repeticiones de carga, cuyo efecto se manifiesta en mayores esfuerzos y deformaciones, fatiga del concreto y erosión de la subbase. (IMCYC, 2002).

Según Rondón y Reyes (2015), esta variable es difícil de establecer y caracterizar, ya que los vehículos que circulan por una vía presentan diferentes magnitudes, configuraciones de ejes, presiones de inflado, velocidad de circulación y número de llantas. Por lo general se caracteriza a través del número de ejes equivalentes de 8.2 o 13 toneladas que circulan en el carril y el período de diseño (N). Para el cálculo de esta variable se puede utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 7: Cálculo del Período de Diseño.

$$N = TPD \times \frac{K_1}{100} \times \frac{K_2}{100} \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} \times FC \dots\dots (1)$$

- TPD o tránsito promedio diario es el número de vehículos (Automóviles – A, Buses – B y Camiones – C) que circulan por una vía en un día. Se calcula dividiendo el número de vehículos (A+B+C) que pasan por una vía entre el número de días de conteo. Si el conteo se realiza en un día, una semana, un mes o un año.
- k_1 es el porcentaje de vehículos pesados (buses y camiones) o vehículos comerciales (B+C). Se entiende por vehículos comerciales y livianos aquellos cuya capacidad mínima y máxima respectivamente es de 5 toneladas.
- k_2 es el factor carril y tiene en cuenta el porcentaje de vehículos que circularán por el carril de diseño de la vía. Cuando el conteo de tráfico para el cálculo del TPD se realiza sobre vías de un carril, dos carriles (uno en cada dirección), cuatro carriles (dos en cada dirección), seis carriles (tres en cada dirección) y ocho carriles (cuatro en cada dirección) el k_2 se puede suponer igual a 100%, 50%, entre 40% y 50%, entre 30% y 40% y entre 25% y 37.5% respectivamente.
- r es la tasa de crecimiento anual del tránsito. Para el cálculo de este parámetro se hace necesario tener en cuenta que al tránsito existente (aquel que presenta la vía antes de ser pavimentada) se debe adicionar el tránsito atraído (volumen de tránsito que puede ocupar la futura vía pavimentada como ruta alterna) y el generado (volumen de tránsito que resulta como consecuencia del desarrollo económico y social de la zona aledaña a la nueva vía pavimentada).
- n es el período de diseño en años y es el lapso que transcurre desde que un pavimento entra en servicio hasta que alcanza su índice de servicio terminal o final. Este último

índice de servicio es el que experimenta el pavimento cuando ya debe ser rehabilitado.

- En la ecuación (1) hasta antes del factor camión (FC) se reporta el número de vehículos que circulan en el carril y el período de diseño. El FC es un parámetro que tiene como función inicialmente pasar el número de vehículos a número de ejes con su respectiva masa para luego convertir el daño que genera cada eje en comparación con el de referencia (8.2 toneladas)

(Rondón y Reyes, 2015).

Estudio del tránsito para diseño de pavimentos

Montejo (2010) indica que, probablemente, la variable más importante en el diseño de una vía es el tránsito, pues, si bien el volumen y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de éstos son factores determinantes en el diseño de la estructura del pavimento.

a) Clasificación de los vehículos

El INVIAS (Instituto Nacional de Vías) ha designado la siguiente terminología para los vehículos que circulan en el país.

A = Vehículos livianos.

B = Buses.

C = Camiones.

Además, ha clasificado el tipo de vehículos de acuerdo con el número y disposición de sus ejes de la forma que se muestra:

Categoría A: Vehículos automotores de cuatro ruedas o más diseñados y construidos para el transporte de pasajeros.

A1: Vehículos de 8 asientos o menos, sin contar el asiento del conductor.

A2: Vehículos de más de 8 asientos, sin contar el asiento del conductor y peso bruto vehicular de 5 toneladas o menos.

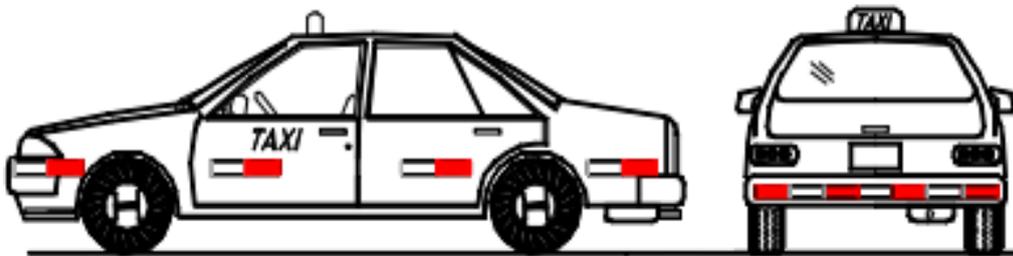


Figura 13: Automóvil o taxi, vehículo de la Categoría A.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Clasificación Vehicular y Estandarización de Características Registrales Vehiculares.

Categoría B: Vehículos de más de 8 asientos, sin contar el asiento del conductor y peso bruto vehicular de más de 5 toneladas, sirven para el transporte de pasajeros.

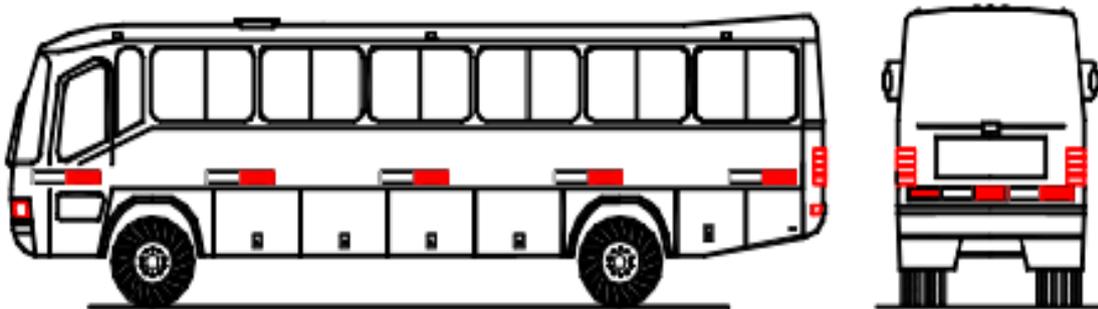


Figura 14: Ómnibus, minibús y microbús, vehículos de la categoría B.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Clasificación Vehicular y Estandarización de Características Registrales Vehiculares.

Categoría C: Vehículos automotores de cuatro ruedas o más diseñados y construidos para el transporte de mercancía.

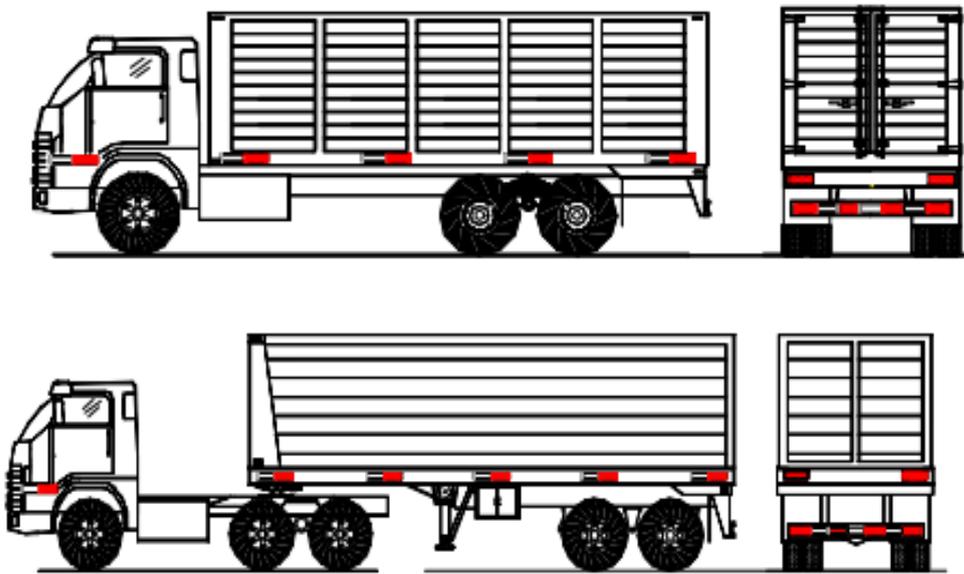


Figura 15: Camión, Remolque, Vehículos de la categoría C.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Clasificación Vehicular y Estandarización de Características Registrales Vehiculares.

b) Clasificación del tipo de vehículos de acuerdo con la disposición de sus ejes.

Carga máxima legal

La diversidad en las características de los vehículos que circulan sobre un pavimento durante su vida de diseño, trae como consecuencia un amplio espectro de ejes de carga, con diferentes espacios entre llantas y distintas presiones de inflado, lo que origina una amplia gama de esfuerzos y deformaciones aplicados a un determinado punto de la estructura. La anterior consideración, plantea un problema muy complejo que hace necesario recurrir a simplificaciones prácticas (Montejo, 2010).

c) Determinación del tránsito existente

La información necesaria para cuantificar el tránsito existente de una vía se debe recolectar con base en los procedimientos de la Ingeniería de Tránsito.

La información que se requiere es la siguiente:

- a) El tránsito promedio diario semanal (TPDS)
- b) Número, tipo y peso de los ejes de los vehículos pesados.

El TPD se halla efectuando un conteo, durante una semana, de todos los vehículos que pasan por la carretera objeto del estudio. Teniendo en cuenta que el tránsito en general presenta variaciones mensuales y estacionales, es necesario hacer una cuidadosa elección de la semana de aforo. El INVIAS efectúa los conteos de tránsito preferencialmente en época de verano.

El tránsito total registrado se divide por los siete días del conteo obteniéndose el TPDS, el cual debe discriminarse en vehículos livianos y comerciales. Estos últimos son los que realmente se tienen en cuenta para el diseño de un pavimento.

La determinación del número, tipo y peso de los vehículos comerciales e hace en nuestro medio por medida directa, utilizando básculas para el pesaje de los ejes de todos los vehículos clasificados como comerciales, registrando en cada caso la clase de vehículo y el tipo de eje pesado, ya sea simple, tándem o tridem.

En la determinación del tránsito existente probable de una vía nueva, es evidente que no puede cuantificarse por medio de conteos directos, razón por la que es necesario recurrir a alguno de los siguientes procedimientos:

- Realizar un estudio de origen y destino entre los dos sitios que serán unidos por la nueva vía.
- Adoptar los datos de tránsito de otra vía situada en una zona de características similares.
- Utilizar los datos de tránsito de otra vía alterna a la que se desea construir.

(Montejo, 2010).

d) Cálculo del tránsito durante el período de diseño

Según Montejo (2010), un pavimento debe ser diseñado para soportar el tránsito inicial y aquel que pase durante su vida de servicio. Sin embargo, es necesario reconocer que no es fácil calcular tales cargas, por cuanto en el tránsito futuro intervienen factores muy complejos, dado que es muy difícil predecir los cambios en la economía regional general, en la población y en el uso de la tierra a lo largo de la vía durante el período de diseño. Pero, el volumen de tránsito futuro de una vía nacional en servicio, que se encuentre en afirmado, puede ser estimado con razonable exactitud a partir de datos sobre el tránsito existente y mediante un análisis estadístico de su evolución histórica. El estimativo en mención requiere del conocimiento del valor de la tasa anual de crecimiento del tránsito, el cual es indispensable para efectuar proyecciones a mediano y largo plazo, necesarias para los estudios de pavimento, tanto en la etapa de diseño como de funcionamiento. Para el cálculo de dicho parámetro es necesario contar con una serie cronológica de datos como la que presenta anualmente la Subdirección de Apoyo Técnico del INVIAS en su publicación denominada *Volúmenes de tránsito*.

El tránsito inicial de vehículos comerciales utilizado para el diseño de un pavimento será la suma de: el normalmente existente, el atraído y el generado. Además, es conveniente tener en cuenta que para efectos del dimensionamiento de un pavimento interesa solamente el tránsito que pasa por un carril, al que se denomina carril de diseño, que es aquel por el cual se espera que circulen el mayor volumen de vehículos pesados, y para su determinación deben utilizarse los siguientes valores:

Tabla 14: Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño.

Número de carriles	Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño
2	50
4	45
6+	40

Fuente: Montejo, 2010

El tránsito así obtenido habrá de proyectarse hacia el futuro una vez establecido el período de diseño y determinada la tasa anual de crecimiento del tránsito.

Tradicionalmente, las proyecciones del tránsito se han efectuado utilizando el modelo exponencial expresado mediante la siguiente fórmula de interés.

Ecuación 8: Determinación del Tránsito futuro.

$$T_n = T_i \times (1 + r)^n \quad \dots (4)$$

Donde:

T_n = Tránsito en cualquier año n.

T_i = Tránsito en el año cero (inicial).

R = Tasa de crecimiento anual del tránsito.

(Montejo, 2010).

e) Cargas equivalentes para el diseño de pavimentos

Con el objeto de evaluar el efecto, en un pavimento flexible, de las cargas diferentes a la estándar de 8.2 toneladas, equivalente a un tándem de 14.5 toneladas, se han determinado factores de equivalencia de carga por eje, que se han obtenido a partir de los resultados del AASHTO ROAD TEST.

Los resultados obtenidos en el camino de prueba de la AASHTO, han permitido por el mismo sistema de ruedas y ejes, se expresa como:

Ecuación 9: Factor de Equivalencia de Carga.

$$\text{Factor de equivalencia de carga} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^4 \dots\dots (3)$$

Donde:

P_1 = carga estándar.

P_0 = carga cuya equivalencia con la estándar se desea calcular.

(Montejo, 2010).

f) Determinación del factor camión

Se entiende por factor camión al número de aplicaciones de ejes sencillos con carga equivalente de 8.2 toneladas, correspondientes al paso de un vehículo comercial (bus o camión).

Si bien el pesaje constituye el medio más preciso para determinar las características de equivalencia del tránsito real con respecto a ejes sencillos de 8.2 toneladas, lo costoso que resultan estos estudios impide efectuarlos para todos los diseños de pavimento que se deban acometer (Montejo, 2010).

Ecuación 10: Determinación del Factor Camión.

$$F_{\text{camión}} = \frac{\sum \# \text{Ejes} \neq \text{peso} * Fe}{N^\circ \text{Vehículos}} \dots\dots (4)$$

Donde:

Fe : Factor equivalente. (El Factor Equivalente se puede determinar también con la tabla que nos proporciona la Norma AASHTO)

g) Determinación del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño y durante el periodo de diseño (N)

Una vez determinado el número acumulado de vehículos que transitarán en el carril de diseño y durante el período de diseño, es posible convertir esta cantidad de

vehículos comerciales a ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas mediante el factor camión:

Ecuación 11: Determinación del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño y durante el periodo de diseño (N).

$$N = TPD \times \frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times 365 \times \frac{(1+r)^n - 1}{Ln(1+r)} \times F.C. \dots\dots (5)$$

TPD = Tránsito promedio diario inicial.

A = Porcentaje estimado de vehículos pesados (buses y camiones).

B = Porcentaje de vehículos pesados que emplean el carril de diseño.

C = Tasa anual de crecimiento del tránsito.

n = Período de diseño.

F.C = Factor camión.

(Montejo, 2010).

2.4. Técnicas, instrumentos de recolección y análisis de datos

- Las técnicas para la recolección de datos que nos permitirá realizar el diseño de las metodologías de pavimentación rígidos PCA y AASHTO, se determinaron mediante los ensayos de contenido de humedad, proctor modificado, plasticidad y límites de consistencia de Attenberg, CBR que incluye los ensayos de hinchamiento de patrón y el de carga penetración en suelo natural, todos estos realizados en el laboratorio del campus de la UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE – CAJAMARCA.

Luego de haber obtenido datos necesarios para procesar y obtener los resultados buscados en la presente investigación se llenaron los formatos. Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio se analizaron teniendo en cuenta los parámetros establecidos según las normas NTP.

- Los procedimientos para para realizar la comparación de las metodologías de pavimento rígido se basó en:

Primero:

Se recolectó muestras de la calle del pasaje San Mateo, barrio Mollepampa, para determinar sus propiedades físico-mecánicas en el laboratorio de suelos de la Universidad Privada del Norte.

- Se determinó el contenido de humedad de cada cantera según la norma NTP 339.160 – 2001.
- Se determinó los límites de Attenberg (Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad) según la norma NTP 339.129 – 1999.
- Se determinó la compactación máxima con el contenido de humedad optimo mediante el Ensayo de Proctor Modificado Método A según la norma MTC E 115-2000.
- Se determinó el Índice CBR mediante los ensayos de hinchamiento de patrón y carga-penetración en suelo natural, según la norma MTC E 132-2000.

Segundo:

Se realizó trabajo de campo para recoger información del estudio de tráfico del pasaje San Mateo entre la avenida Nuevo Cajamarca y la avenida La Paz por un tiempo de una semana, contabilizando todos los vehículos que pasan por ella.

B. Procedimiento

Consta de 3 fases:

- Ensayo de compactación CBR (determinación de la densidad y humedad del suelo).
 - ✓ Preparar la muestra con el contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo de compactación proctor modificado.

- ✓ Compactar la muestra en 5 capas en cada uno de los 3 moldes CBR, el primero con 13 golpes, el segundo con 27 golpes y el tercero con 56 golpes por capa.
- ✓ Determinar la densidad húmeda y el contenido de humedad de las muestras de cada molde.
- Ensayo de hinchamiento (Determinación de las propiedades expansivas del material).
 - ✓ Invertir las muestras de tal manera que la superficie libre quede en la parte superior cuando se ensambla nuevamente los moldes en sus placas de base.
 - ✓ Colocar sobre cada muestra el papel filtro, la placa de expansión, la sobrecarga, el trípode y el dial de expansión.
 - ✓ Colocar los tres moldes debidamente equipados en un tanque de agua durante 4 días (96 horas), registrar las lecturas de expansión cada 24 horas.
- Ensayo carga – penetración (determinación de la resistencia a la penetración).
 - ✓ Después de los 4 días sacar los moldes del tanque de agua y de cada uno de ellos retirar el dial, el trípode, la sobrecarga y la placa de expansión, dejarlos drenar durante 15 minutos.
 - ✓ Colocar la sobrecarga en cada molde, llevar a la prensa hidráulica, proceder al ensayo de penetración aplicando un pisón a una velocidad de 0.05 pulg/min., registrar las lecturas de carga de cada muestra.

2.5. Procedimiento

2.5.1. Estudio del Tránsito vehicular

El estudio de tránsito vehicular de nuestra vía en estudio se realizó en una vía aledaña (Av. Nuevo Cajamarca), ya que para vías a construirse se recomienda tener un registro de tránsito vehicular de las vías cercanas. A continuación, mostramos el volumen máximo diario registrado en un día durante la semana de aforo vehicular:

Tabla 15: Aforo del día de máxima demanda Vehicular (IMDS). (22/07/2019 – 28/07/2019).

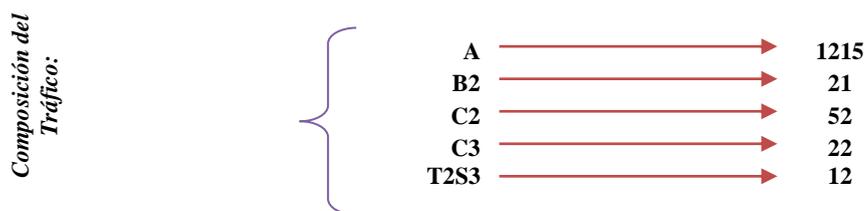
 UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE	ESTUDIO DE TRÁNSITO - UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE CAJAMARCA	
	ESTUDIO:	TRÁNSITO VEHICULAR
	NORMA:	Reglamento Nacional de Tránsito - Código de Tránsito. DECRETO SUPREMO No 016-2009-MTC

IMD SEMANAL

HORA		VEH. LIVIANOS	VEHICULOS PESADOS			
			AUTO	B2	C2	C3
06:30	06:45	21	0	1	0	0
06:45	07:00	25	0	0	0	0
07:00	07:15	24	1	1	0	0
07:15	07:30	21	0	0	0	0
07:30	07:45	18	1	1	0	0
07:45	08:00	17	0	1	1	1
08:00	08:15	20	0	1	2	0
08:15	08:30	20	1	1	0	1
08:30	08:45	24	0	0	0	0
08:45	09:00	20	1	1	0	0
09:00	09:15	22	0	0	0	0
09:15	09:30	27	0	0	2	0
09:30	09:45	17	0	0	0	0
09:45	10:00	17	0	2	0	0
10:00	10:15	27	1	1	0	0
10:15	10:30	25	0	0	0	1
10:30	10:45	23	1	1	0	0
10:45	11:00	17	1	2	0	1
11:00	11:15	13	0	0	0	0
11:15	11:30	12	1	1	0	0
11:30	11:45	22	0	2	0	1
11:45	12:00	27	0	0	0	0
12:00	12:15	21	1	1	0	0
12:15	12:30	27	0	2	2	0
12:30	12:45	16	1	0	0	0
12:45	13:00	21	1	1	0	0
13:00	13:15	22	0	1	1	0
13:15	13:30	26	0	1	0	1
13:30	13:45	22	0	1	0	0
13:45	14:00	17	1	0	0	0
14:00	14:15	19	0	1	0	1
14:15	14:30	21	1	0	0	0

14:30	14:45	23	0	2	2	0
14:45	15:00	23	0	1	0	0
15:00	15:15	23	0	0	0	0
15:15	15:30	27	1	1	0	0
15:30	15:45	26	0	2	1	0
15:45	16:00	24	1	1	0	0
16:00	16:15	19	1	1	0	0
16:15	16:30	18	0	0	0	0
16:30	16:45	26	0	1	0	0
16:45	17:00	15	0	1	2	1
17:00	17:15	23	0	2	0	0
17:15	17:30	24	1	2	1	0
17:30	17:45	12	0	3	2	0
17:45	18:00	25	0	0	0	0
18:00	18:15	21	1	1	0	0
18:15	18:30	17	0	1	1	1
18:30	18:45	19	0	2	1	0
18:45	19:00	27	0	1	0	0
19:00	19:15	20	0	0	1	0
19:15	19:30	35	1	1	0	1
19:30	19:45	23	0	2	0	0
19:45	20:00	22	1	1	0	1
20:00	20:15	13	0	1	1	0
20:15	20:30	13	1	0	2	0
20:30	20:45	14	0	1	0	1
20:45	21:00	12	0	0	0	0
TOTAL		1215	21	52	22	12

Por lo tanto, la composición del tránsito vehicular de nuestro estudio está determinado por:



Donde:

- A : Composición de vehículos ligeros.
- B2 : Composición de vehículos de transporte de pasajeros de 2 ejes.
- C2 : Composición de vehículos de carga de 2 ejes (Camiones).
- C3 : Composición de vehículos de carga de 3 ejes (Camiones).
- T2S3 : Composición de vehículos de carga de con remolque.

2.5.2. Diseño del Pavimento Rígido, Metodología AASHTO 93.

En este apartado mostramos paso a paso, el procedimiento seguido para diseñar un pavimento rígido con la metodología AASHTO 93. El Pavimento rígido a diseñar es el del Pasaje San Mateo, Barrio Mollepampa, entre la Av. Nuevo Cajamarca y Av. La Paz, de la Ciudad de Cajamarca.

A) Periodo de Diseño.

Tabla 16: Determinación del periodo de diseño, Metodología AASHTO 93, para Pavimentos Rígidos.

T = 20 años

TIPO DE CARRETERA O VIA	PERIODO DE DISEÑO
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30 - 50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20 - 50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15 - 25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10 - 20 años

Escogemos un periodo de diseño de 20 años.

B) Espesor del Pavimento.

Para poder determinar el número de ejes equivalentes del vehículo de diseño de 8.2 Tn (18 Kips) propuesto por AASHTO 93, debemos asumir un espesor de losa, ya que este parámetro interviene en la ecuación para determinar el número de ejes equivalentes.

$$\text{Espesor} = 200 \text{ mm (Asumimos)}$$

C) Índices de Serviciabilidad.

Tabla 17: Determinación de los Índices de Serviciabilidad.

$$P_t = 2$$

**INDICE DE SERVICIABILIDAD
INICIAL**

Po = 4.5 para pavimentos rígidos
Po = 4.2 para pavimentos flexibles

$$\Delta PSI = P_o - P_t = 2.5$$

INDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL

Pt = 2.5 o más para caminos muy importantes
Pt = 2.0 para caminos de tránsito menor

D) Factor de Distribución por Dirección.

Tabla 18: Determinación del Factor de Distribución por Dirección.

$$D = 0.5$$

Número de carriles en ambas direcciones	Valor
2	0.50
4	0.45
6 o más	0.40

E) Factor de Distribución por Carril.

Tabla 19: Factor de Distribución por Carril.

$$L = 1 \quad \text{un carril en cada sentido}$$

Nº DE CARRIL EN CADA SENTIDO	PORCENTAJE DE W18 EN EL CARRIL DE DISEÑO
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4 o más	50 - 75

F) Código de eje Cargado.

Tabla 20: Cálculo del Código de eje cargado.

L2 = 1	eje simple
L2 = 2	eje tandem
L2 = 3	eje tridem

L2: Este valor depende del tipo de eje en contacto con el pavimento.

En este paso determinamos los parámetros necesarios para encontrar el número de ejes equivalentes:

T=	20	años
esp =	200	mm
Pt =	2	serviciabilidad final
D =	0.5	factor de dirección ida y vuelta
L =	1	un carril en cada sentido
=>	W18 =	100%

Nota: W18 es el porcentaje de vehículos equivalentes de 8.2 Tn (18Kips), que pasan por el carril de diseño y representa el 100 %.

G) Cálculo del Número de ejes equivalentes.

Tabla 21: Cálculo del Número de ejes equivalentes.

DISEÑO PAVIMENTO RIGIDO METODO AASHTO 93 - UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE CAJAMARCA											
		ESTUDIO: DETERMINACIÓN DE EJES EQUIVALENTES									
		NORMA: METODOLOGIA DE AASHTO 93 - PAVIMENTO RÍGIDO									
TIPOS DE VEHICULOS											
PARAME TROS	VEHICULOS LIGEROS		BUS		CAMIONES				SEMITRAILER		
	Autos		2E		C2		C3		T2S3		
	Delantero	Posterior	Delantero	Posterior	Delantero	Posterior	Delantero	Posterior	Delantero	Central	Posterior
CARGA (Tn)	1.00	0.80	7.00	11.00	7.00	11.00	7.00	18.00	7.00	11.00	25.00
Lx (kips)	2.21	1.76	15.44	24.26	15.44	24.26	15.44	39.71	15.44	24.26	55.15
no	1215.00	1215.00	21.00	21.00	52.00	52.00	22.00	22.00	12.00	12.00	12.00
r%	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Gt	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08
L2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	3.00
B18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Bx	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
log(Wtx/Wt)	3.57	3.87	0.29	-0.57	0.29	-0.57	0.29	-0.59	0.29	-0.57	-0.68
G = Wt/Wtx	0.00	0.00	0.51	3.73	0.51	3.73	0.51	3.89	0.51	3.73	4.78
G Y	26.87	26.87	26.87	26.87	26.87	26.87	26.87	26.87	26.87	26.87	26.87
ESAL	1602.36	808.54	52788.49	384189.49	130714.37	951326.36	55302.23	419822.89	30164.85	219536.85	281223.70
PARCIAL	2410.90		436977.99		1557165.86				530925.41		
TOTAL	2527480.15										

H) Niveles de Confiabilidad.

Tabla 22: Niveles de Confiabilidad.

TIPO DE CARRETERA	NIVELES DE CONFIABILIDAD R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	85 - 99.9	80 - 99.9
Local	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	50 - 80

R = 80 %

I) Desviación Estándar Normal (ZR) y Error Estándar Combinado (S0).

Tabla 23: Desviación Estándar Normal (ZR) y Error Estándar Combinado (S0).

DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL, VALORES QUE CORRESPONDEN A LOS NIVELES SELECCIONADOS DE CONFIABILIDAD		
CONFIABILIDAD R (%)	(ZR)	(So)
50	0.000	0.35
60	-0.253	0.35
70	-0.524	0.34
75	-0.647	0.34
80	-0.841	0.32
85	-1.037	0.32
90	-1.282	0.31
91	-1.340	0.31
92	-1.405	0.30
93	-1.476	0.30
94	-1.555	0.30
95	-1.645	0.30
96	-1.751	0.29
97	-1.881	0.29
98	-2.054	0.29
99	-2.327	0.29
99.9	-3.090	0.29
99.99	-3.750	0.29

J) Determinación del Módulo de Reacción Efectivo de la Subrasante.

✓ **Método Empírico o Mecanístico a través de Ábacos.**

Datos de la sub base: CBR = **20.00** %
Ecuación Guía Mecánica Empírica NCHRP (2002)
 $MR = 2555 (CBR)^{0.64}$
 MR = 17380.013 psi = 119.92 Mpa

Ecuación de Kentucky

(regresión exponencial)

$$MR = 1910 (CBR)^{0.68}$$

$$MR = 14646.497 \quad \text{psi} = 101.06 \quad \text{Mpa}$$

(regresión polinómica 2°)

$$MR = -7.5 CBR^2 + 800 CBR + 1820$$

$$MR = 15220 \quad \text{psi} = 105.02 \quad \text{Mpa}$$

Solo para CBR < 55 %

Mínimo: **ME = 101.06 Mpa**

ME: Módulo de Elasticidad de la Sub Base.

Datos de la subrasante:

$$CBR = 13.00 \quad \%$$

Ecuación Guía Mecánica Empírica NCHRP (2002)

$$MR = 2555 (CBR)^{0.64}$$

$$MR = 13192.122 \quad \text{psi} = 91.03 \quad \text{Mpa}$$

Ecuación de After Van Til et al

(regresión exponencial)

$$MR = 5490 (CBR)^{0.30}$$

$$MR = 11851.01 \quad \text{psi} = 81.77 \quad \text{Mpa}$$

Mínimo: **MR = 81.77 Mpa**

MR: Módulo de Resiliencia del suelo.

Con estos datos podemos entrar al nomograma para encontrar el módulo de reacción compuesto.

En el Nomograma:

- i. Estimamos el espesor de la Sub Base como dato preliminar: 150 mm
- ii. Obtenemos el Módulo Resiliente del Suelo y el Módulo de Elasticidad de la Sub Base.
- iii. Proyectamos con las flechas y obtenemos el módulo de reacción compuesto.

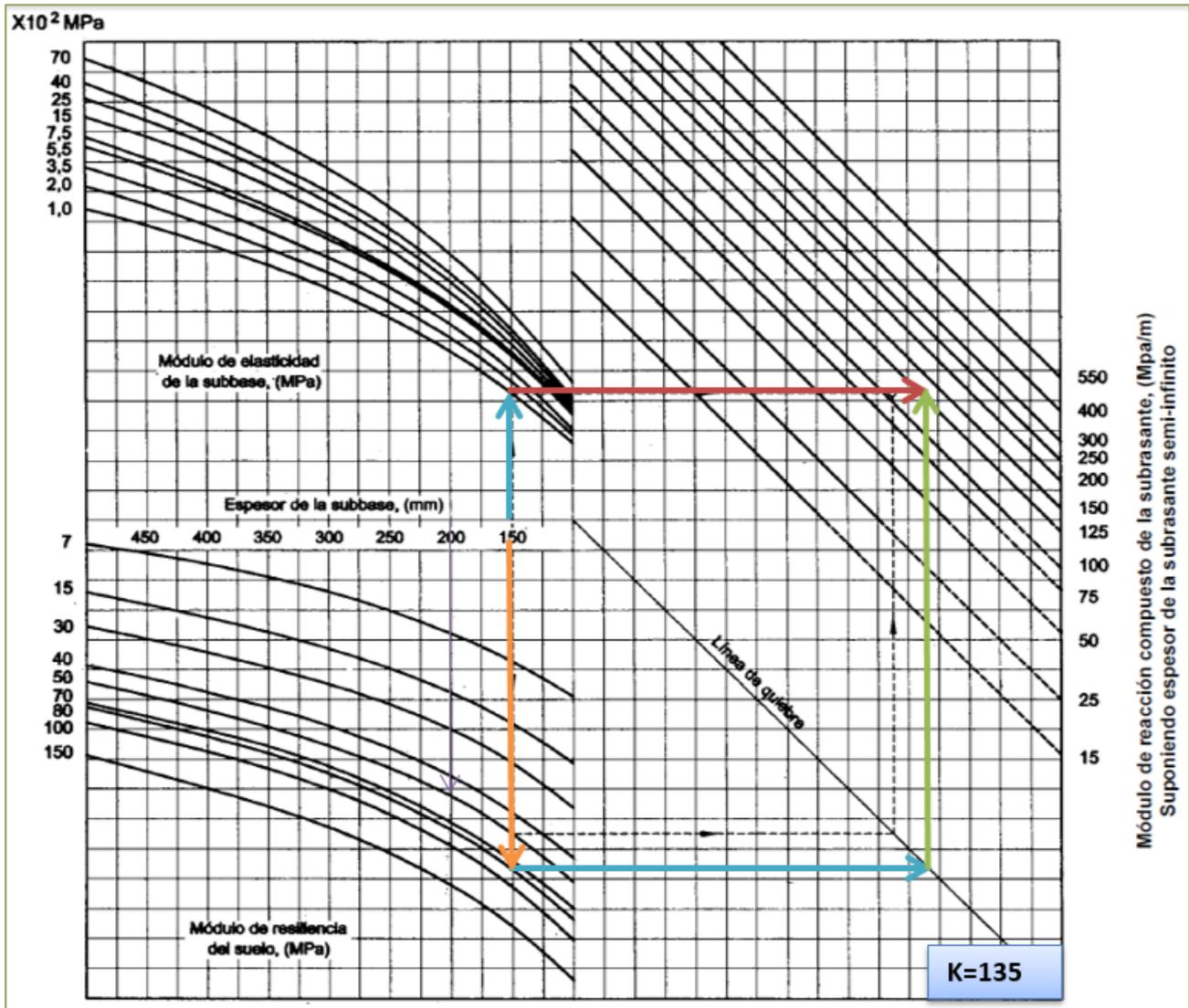


Figura 16: Cálculo del Módulo de Reacción Compuesto de la Subrasante, a través de Abaco.

A través de este Nomograma determinamos el valor del Módulo de Reacción Compuesto de la Subrasante ($K = 135 \text{ Mpa}$).

- ✓ Método de las fórmulas AASHTO para determinar el Módulo de reacción compuesto de la subrasante (K).

Datos de la sub base:

CBR = 20.00 %

Si $\text{CBR} \leq 10$

$$K1 = 2.55 + 52.5 \text{ LOG (CBR)}$$

Si $\text{CBR} > 10$

$$K1 = 46 + 9.08 (\text{LOG (CBR)})^{4.34}$$

$$K1 = 74.45 \text{ Mpa/m}$$

Datos del suelo de fundación:

CBR = **13.00** %

Si CBR \leq 10

$K_0 = 2.55 + 52.5 \text{ LOG (CBR)}$

Si CBR > 10

$K_0 = 46 + 9.08 (\text{LOG (CBR)}) ^{4.34}$

$K_0 = 60.50 \text{ Mpa/m}$

Con los valores de K_0 y K_1 , aplicamos la ecuación anterior, para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante.

MODULO DE REACCION COMPUESTO DE LA SUBRASANTE (K) = 65.69 Mpa/m

K) Determinación del coeficiente de drenaje (Cd):

Tabla 24: Determinación del coeficiente de drenaje (Cd).

CALIDAD DEL DRENAJE	TIEMPO QUE TARDA EL AGUA EN SER EVACUADA
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	el agua no evacua

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos de 1%	1 % - 5 %	5 % - 25 %	más del 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Mediano	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Malo	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy malo	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Escogemos Cd = 0.90

L) Coeficiente de Transmisión de Cargas.

Tabla 25: Cálculo del Coeficiente de Transmisión de Cargas.

Tipo de Pavimento	Elemento de transmisión de carga			
	Con. Asfáltico		Con. Hidráulico	
	SI	NO	SI	NO
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Reforzado continuo	2.9 - 3.2	----	2.3 - 2.9	----
J =	3.00			

M) Módulo de Elasticidad del Concreto.

$$\begin{aligned} \text{Concreto } f'c &= 280.00 \text{ kg/cm}^2 \\ E_c &= 57000 (f'c)^{0.5} \\ E_c &= \mathbf{3597088} \text{ psi} = \mathbf{24819.9} \text{ Mpa} \end{aligned}$$

N) Módulo de Rotura del Concreto.

$$\begin{aligned} \text{Concreto } f'c &= 280.00 \text{ kg/cm}^2 \\ S'c &= \mathbf{631.1} \text{ psi} = \mathbf{4.35} \text{ Mpa} \end{aligned}$$

O) Determinación del Espesor del Pavimento por la Fórmula AASHTO.

Parámetros Necesarios para el cálculo del espesor del pavimento:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= 65.69 \text{ Mpa/m} & \mathbf{S_o} &= 0.32 \\ \mathbf{E_c} &= 24820 \text{ Mpa} & \mathbf{R} &= 80 \% \Rightarrow \mathbf{Z_R} = -0.841 \\ \mathbf{S'c} = \mathbf{M_r} &= 4.35 \text{ Mpa} & \mathbf{P_t} &= 2 \\ \mathbf{J} &= 3.00 & \mathbf{\Delta PSI} &= 2.5 \\ \mathbf{C_d} &= 0.90 & \mathbf{W_{82}} &= 2527480.148 \\ & & \mathbf{D} &= ??? \text{ mm Por tanteo} \\ & & \mathbf{D} &= \mathbf{185.50} \text{ mm} \end{aligned}$$

Resolviendo:

$$\begin{aligned} \text{1er miembro} &= \text{Segundo miembro} \\ 6.403 &= -0.26912 + 6.691962861 + -0.062229377 + 0.045378281 \\ \mathbf{6.403} &= \mathbf{6.406} \\ \mathbf{OK} \end{aligned}$$

Por lo Tanto:

$$\mathbf{D (\text{espesor del Pavimento}) = 19 cm.}$$

P) Determinación del Espesor del Pavimento por Abaco AASHTO.

Para calcular el espesor del pavimento rígido con el nomograma proporcionado por AASHTO, necesitamos los mismos parámetros que se utilizan en la fórmula, a continuación, presentamos el ábaco y el cálculo del espesor del pavimento:

De esta manera se ha determinado el espesor de pavimento de concreto por el método AASHTO, a través de la fórmula y el nomograma. Ahora adoptamos el espesor del pavimento por la fórmula y la presentamos en la siguiente figura:



Figura 18: Estructura del Pavimento Rígido, Método AASHTO.

2.5.3. Diseño del Pavimento Rígido, Metodología PCA.

A) Determinación del Tránsito Futuro.

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

$$r = 3.00\%$$

$$n = 20 \text{ año}$$

$$T_i = 1322$$

$$T_n = 1322 (1 + 0.03)^{20}$$

$$\mathbf{T_n = 2388 \text{ vehículos}}$$

Donde:

Tn: Tránsito en el año enésimo

Ti: Tránsito en el año cero

r: tasa de crecimiento normal 3%

n': número de años hasta cuando se empieza a construir el pavimento

año en que se obtuvo los datos de tráfico: 2019

Tabla 26: Composición del Tránsito Proyectado.

COMPOSICIÓN DE TRAFICO PROYECTADA

VEHÍCULOS		VEH/DIA 2019	VEH/DIA 2039
Vehículo ligero	A	1215	2194
Bus	B2	21	38
Camión 2 ejes	C2	52	94
Camión 3 ejes	C3	22	40
Semi tráiler	T2S3	12	22
Total		1322	2388

B) Factores de Diseño.

* **Determinación de la Resistencia del Concreto:**

Según el MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (MTC), establece que en Pavimentos de Concreto Hidráulico podemos tomar valores desde 280kg/cm², este valor es el que tomaremos nosotros, por tratarse de una vía de bajo volumen de tránsito vehicular.

* **Determinación del C.B.R.:**

Según los Estudios de Mecánica de Suelos, se obtuvo el siguiente valor de CBR, de acuerdo al tipo de suelo.

$$\frac{\text{CBR DE DISEÑO}}{\text{SUBRASANTE}} = 13\%$$

C) Diseño.

✓ **Determinación del Módulo de Reacción (K)**

Tabla 27: Determinación del Módulo de Reacción(K) en función al CBR(%)

CBR	K	CBR	K	CBR	K	CBR	K
2.0	2.0	7.0	5.3	14.0	7.2	33.0	10.0
2.1	2.1	7.6	5.6	15.0	7.3	35.0	10.5
2.8	2.8	8.0	5.7	16.0	7.5	39.0	11.2
3.0	3.0	9.0	6.0	18.0	7.8	43.0	12.0
4.0	3.9	10.0	6.2	20.0	8.0	47.0	13.0
4.7	4.2	11.0	6.5	22.0	8.4	52.0	14.0
5.0	4.4	12.0	6.7	25.0	8.8	57.0	15.0
6.0	4.9	13.0	6.9	30.0	9.6	64.0	16.8

CBR		K
12.0	-	6.7
13.0	-	K
14.0	-	7.2
K =	6.95	Kg/cm³

✓ **Determinación del Módulo de Reacción de la Sub base (Kc).**

Tabla 28: Determinación del Módulo de Reacción de la Subbase Granular, en función del Módulo de Reacción de la Subrasante.

<u>Valor K</u> <u>Subrasante</u>	<u>Valor K (Kg/cm³) sobre la base de espesor</u>				
	<u>10</u>	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>22.5</u>	<u>30</u>
1.4	1.80	2.10	2.30	2.40	3.10
2.1	2.70	3.00	3.27	3.40	4.20
2.8	3.60	3.90	4.23	4.40	5.30
5.5	6.10	6.40	7.13	7.50	8.90
8.3	8.90	9.10	9.90	10.30	11.90

CBR	Kc
5.5	-
6.95	-
8.3	-

$$Kc = 7.80 \text{ Kg/cm}^3$$

✓ **Determinación del Módulo de Resiliencia (MR).**

El método de PCA propone, el cálculo del módulo de resiliencia en función a la resistencia del concreto, tenemos:

$$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$$

$$MR = 0.15 * f'c = 42 \text{ Kg/cm}^2$$

Cálculo del Número de ejes equivalente de diferentes pesos.

Tabla 29: Cálculo del N° de ejes equivalentes de diferentes pesos.

Tipo de Vehículo	Veh/día	FDIR	FDIST	Veh/Carril	<u>EJES POR AÑO</u>			
					7 TN	11 TN	18.0 TN	25 TN
B2	21	0.5	1	11	11	11		
T2S3	12	0.5	1	6	6	6		6
C2	52	0.5	1	26	26	26		
C3	22	0.5	1	11	11		11	
TOTAL					54	43	11	6

Factor de Crecimiento:

n=	20 años	Fc: factor de crecimiento vehicular (%)
r=	3.00%	r: consideramos una tasa normal.
Fc =	$\frac{(1+r)^n - 1}{r}$	n: periodo de diseño del pavimento
Fc =	$\frac{(1+0.03)^{20}-1}{0.030}$	
FC =	26.87	

Ejes de X Tn/ Período de Diseño:

Ejes de 7 Tn (15.4 kips):	529615.08
Ejes de 11 Tn (24.1 kips):	421730.53
Ejes de 18 Tn (39.5 kips):	107884.55
Ejes de 25 Tn (54.8 kips):	58846.12

D) Cálculo del Espesor del Pavimento Rígido.

Para el cálculo del espesor del pavimento por la metodología del PCA (Asociación del Cemento Portland), necesitamos asumir un espesor de pavimento, y al final llegar a determinar un valor con el cual cumpla el diseño por fatiga y por erosión, es decir que el porcentaje de erosión y de fatiga sean menores al 100%.

Tenemos los siguientes datos necesarios para el cálculo del espesor:

Tabla 30: Parámetros de Diseño para calcular el espesor de la losa con la Metodología PCA.

K Subrasante:	6.95 Kg/cm ³	253.09 pci
K Combinado:	7.80 Kg/cm ³	284.04 pci
Espesor de Losa propuesto:	0.228 m	9.0 pulg
Subbase (h):	0.15 m	
Factor de Seguridad por Carga:	1.1	
Módulo de Ruptura Propuesto:	42 Kg/cm ²	597.37 psi

Nota: El Espesor de La Subbase granular queda a criterio del diseñador, y es importante decir, que este valor varía dependiendo al tráfico proyectado y el tipo de vía a construirse.

Para el primer tanteo, tomamos un espesor de losa de 9 pulgadas (22.8 cm).

Tabla 31: Cálculo del Espesor del Pavimento, e= 9 pulg. (22.8 cm).

CARGA POR EJE (Kips)	CARGA POR EJE x Fsc	NÚMERO REPETICIONES ESPERADAS	ANÁLISIS DE FATIGA		ANÁLISIS DE EROSIÓN	
			NÚMERO REPETICIONES ADMISIBLES	CONSUMO DE FATIGA (%)	NÚMERO ADMISIBLE DE REPETICIONES	DAÑO POR EROSIÓN (%)
1	2	3	4	5	6	7
EJES SIMPLES		Esf. Equivalente: 190			Factor de erosión: 2.63	
		Factor de relación de esfuerzos: 0.318				
15.4	16.94	529615.08	Indeterminado	0.00%	Indeterminado	0.00%
24.1	26.51	421730.53	4000000	10.54%	6000000	7.03%
EJES TÁNDEM		Esf. Equivalente: 163			Factor de erosión: 2.76	
		Factor de relación de esfuerzos: 0.273				
39.5	43.45	107884.55	Indeterminado	0.00%	10450000	1.03%
EJES TRIDEM		Esf. Equivalente:			Factor de erosión	
		Factor de relación de esfuerzos:				
54.8	20.0933			0.00%		0.00%
				0.00%		0.00%
TOTAL				10.54%	TOTAL	8.06%

En la tabla 31, observamos que el diseño del pavimento cumple tanto para análisis de fatiga, como para erosión, ya que su suma no sobrepasa el 100%, es decir que el número de repeticiones admisibles o permisibles es mucho mayor que el número de repeticiones esperadas (repeticiones encontradas a través de nuestro estudio de tránsito vehicular), de esta manera analizamos que el espesor asumido es correcto, para el periodo de diseño seleccionado.

Tabla 32: Esfuerzo Equivalente - sin Berma de Concreto (Eje Simple/Eje Tandem)

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

Fuente: *Guide for Design of Pavements Structures*. AASHTO 1993.

Tabla 33: Factor de Erosión - Juntas con Dowels, sin Berma de Concreto (Eje Simple/Eje Tandem)

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

Fuente: *Guide for Design of Pavements Structures*. AASHTO 1993.

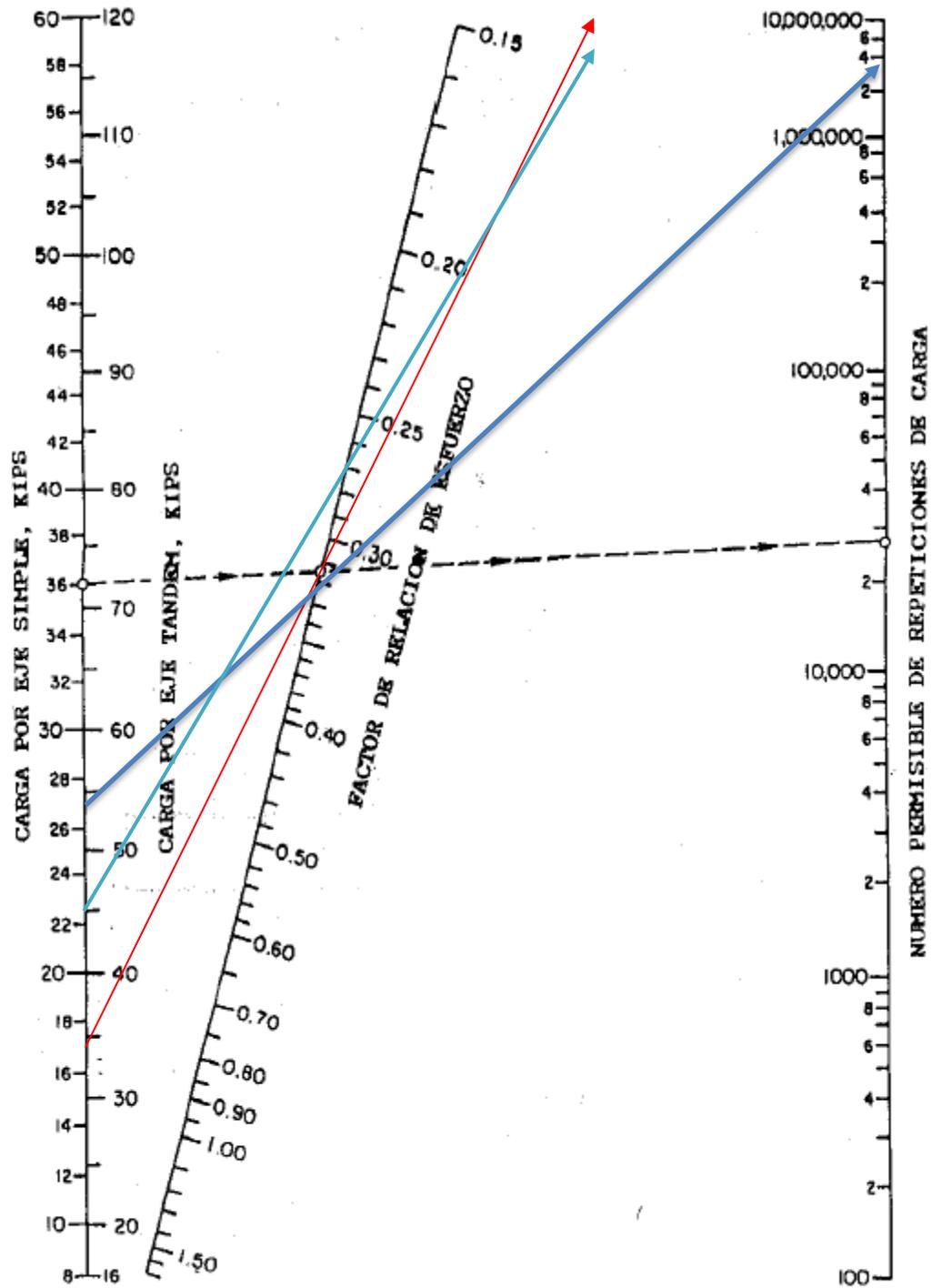


Figura 19: Análisis por fatiga número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de relación de esfuerzo (con y sin berma de hormigón)

Fuente: *Guide for Design of Pavements Structures*. AASHTO 1993.

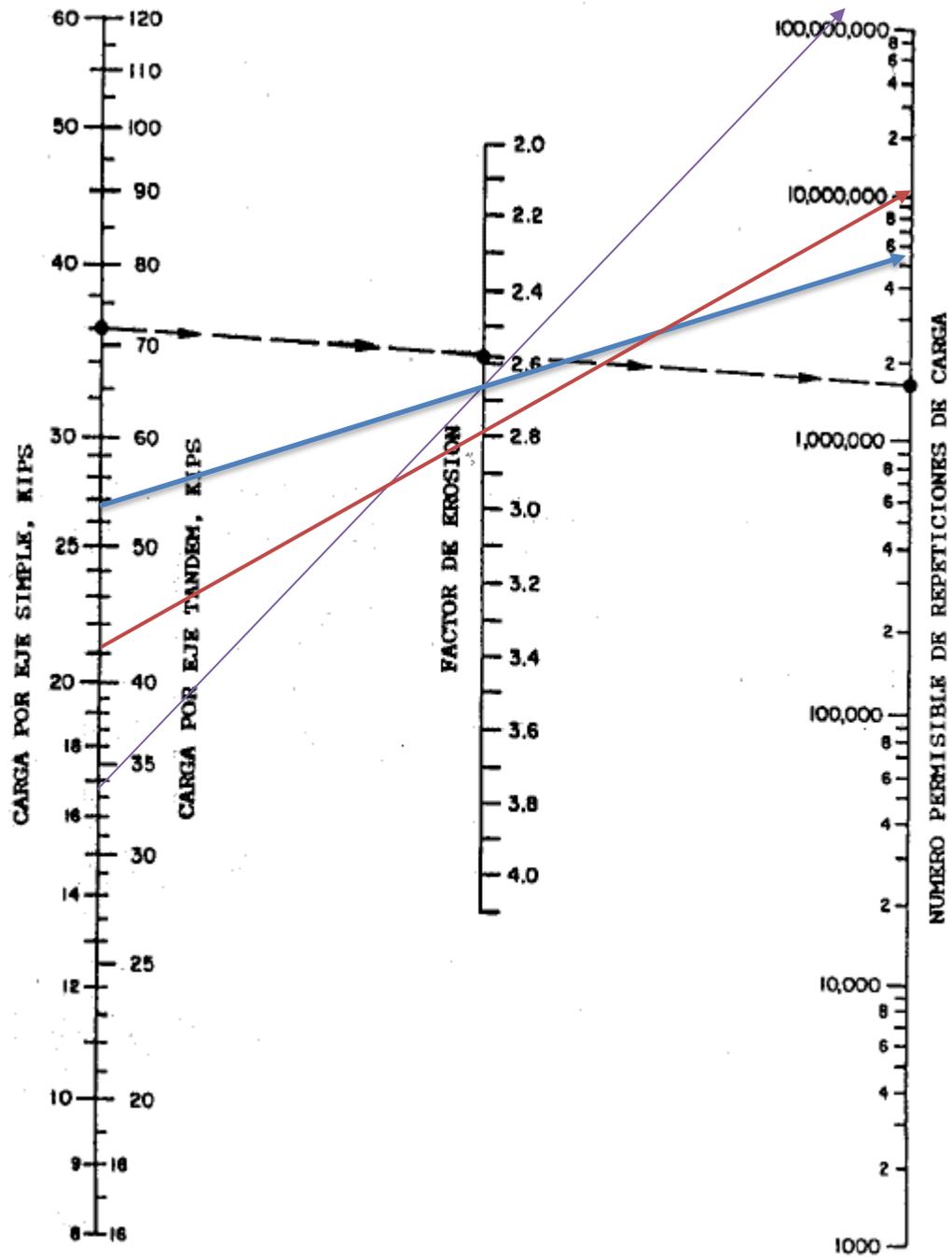


Figura 20: Análisis por erosión - número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de erosión (sin berma de hormigón).

Fuente: *Guide for Design of Pavements Structures*. AASHTO 1993.

Para el segundo tanteo, tomamos un espesor de losa de 8.5 pulgadas (21.5 cm).

Tabla 34: Cálculo del Espesor del Pavimento, $e= 8.5$ pulg. (21.5 cm).

CARGA POR EJE (Kips)	CARGA POR EJE x Fsc	NÚMERO REPETICIONES ESPERADAS	ANÁLISIS DE FATIGA		ANÁLISIS DE EROSIÓN	
			NÚMERO REPETICIONES ADMISIBLES	CONSUMO DE FATIGA (%)	NÚMERO ADMISIBLE DE REPETICIONES	DAÑO POR EROSIÓN (%)
1	2	3	4	5	6	7
EJES SIMPLES		Esf. Equivalente: 206			Factor de erosión: 2.71	
		Factor de relación de esfuerzos: 0.345				
15.4	16.94	529615.08	Indeterminado	0.00%	Indeterminado	0.00%
24.1	26.51	421730.53	390000	108.14%	4200000	10.04%
EJES TÁNDEM		Esf. Equivalente: 174			Factor de erosión: 2.82	
		Factor de relación de esfuerzos: 0.291				
39.5	43.45	107884.55	Indeterminado	0.00%	6000000	1.80%
EJES TRIDEM		Esf. Equivalente:			Factor de erosión	
		Factor de relación de esfuerzos:				
54.8	20.09			0.00%		0.00%
				0.00%		0.00%
TOTAL				108.14%	TOTAL	11.84%

En la tabla 34, observamos que el diseño no es adecuado, ya que el consumo de fatiga, sobrepasa el 100% de las repeticiones admisibles, por erosión cumple, pero; no cumple por ambos diseños que se requiere, por lo tanto, no adoptamos el espesor de 8.5 pulgadas o 21.5 cm.

No se toma en cuenta la carga por ejes trídem, por tratarse de una vía de bajo volumen de tránsito vehicular. Además, los vehículos de 3 ejes que transitan en el lugar de estudio es escaso.

De esta manera logramos determinar nuestro espesor de pavimento rígido con la metodología del PCA, es necesario comentar que, si disminuimos el espesor del pavimento, disminuiría el costo de construcción de la vía, pero a la vez, el diseño de la vía no cumpliría al realizar un análisis de cargas por fatiga.

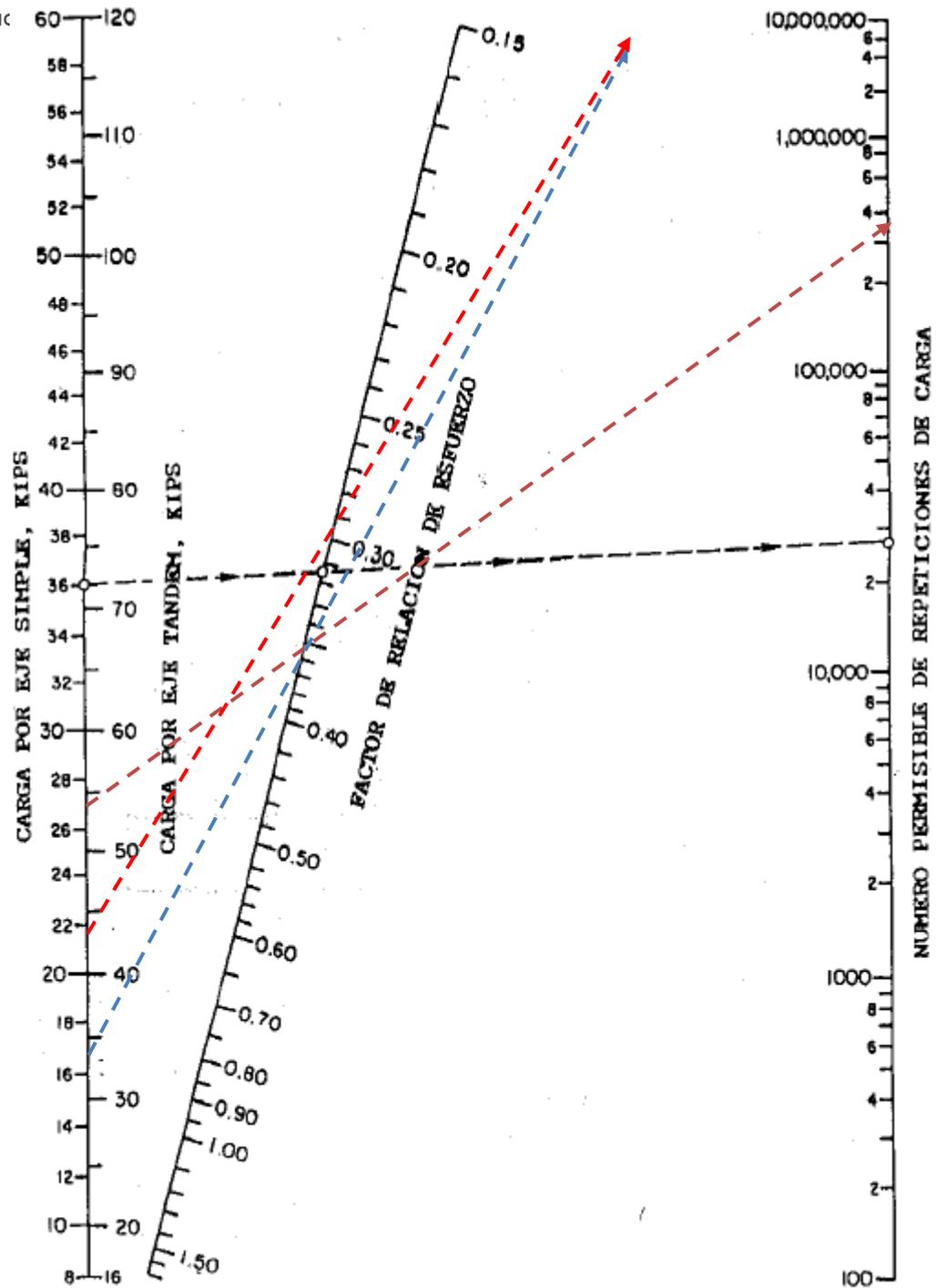


Figura 21: Análisis por fatiga número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de relación de esfuerzo (con y sin berma de hormigón), $e=8.5$ pulg.

Fuente: *Guide for Design of Pavements Structures*. AASHTO 1993.

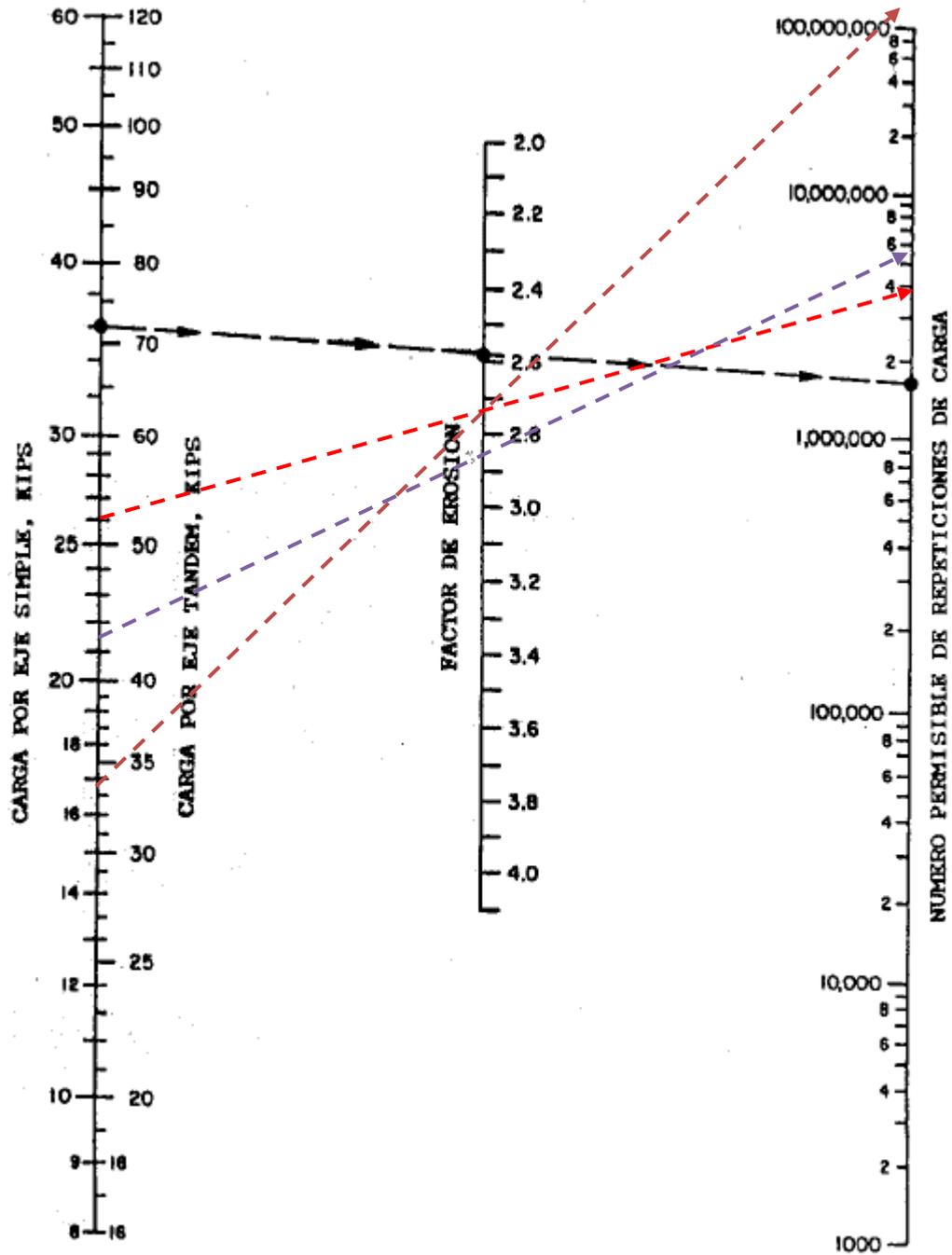


Figura 22: Análisis por erosión - número permisible de repeticiones de carga basado en el factor de erosión (sin berma de hormigón). $E = 8.5$ pulg.

Fuente: *Guide for Design of Pavements Structures*. AASHTO 1993.

De esta manera podemos determinar la estructura del pavimento rígido, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 23: Estructura Pavimento Rígido PCA.

Una vez determinado los espesores de la losa de concreto, podemos adoptar una separación de juntas transversales y longitudinales, esto a través del ancho de nuestra calzada.

Separación Juntas Longitudinales: 2.60 metros.

Separación Juntas Transversales: 3.20 metros

2.5.4. Análisis de Costos de Construcción

✓ Metrados de la estructura del Pavimento Rígido.

Tabla 35: Metrados de la estructura del pavimento.

METRADOS DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, METODOLOGIA AASHTO Y PCA						
METODO DE DISEÑO	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	LONGITUD	ESPEJOR	ANCHO (Carril)	CUNETAS (m3)	VOLUMEN TOTAL (m3)
PCA	SUBABSE GRANULAR	249.55	0.15	2.6	37.4325	232.0815
	LOSA DE CONCRETO	249.55	0.23	2.6	57.3965	355.8583
AASHTO	SUBABSE GRANULAR	249.55	0.15	2.6	37.4325	232.0815
	LOSA DE CONCRETO	249.55	0.19	2.6	47.4145	293.9699

Elaboración Propia.

En las tablas 35 observamos los metrados de la sub base granular y el pavimento de concreto, que constituyen la estructura del pavimento rígido, los metrados se hallaron conforme al diseño de las metodologías de AASHTO y PCA. La longitud del Pasaje San Mateo es de 249. 55 metros.

✓ **Precios Unitarios en el Pavimento.**

Tabla 36: Precios Unitarios para la Sub Base Granular.

ANÁLISIS DE COSTOS PAVIMENTO RIGIDO - UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE CAJAMARCA					
	ESTUDIO: ANÁLISIS ECONOMICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO - PRECIOS UNITARIOS DE LA SUBBASE				
	GUIA: Revista de Costos y Presupuestos (Tarifas Horarias en S/ al 31/05/2019)				
DESCRIPCIÓN	UNID.	CUAD.	CANTIDAD	COSTO PARCIAL	COSTO TOTAL
SUB - BASE GRANULAR E=0.15 M.					
Rendimiento: 1 m3					
1. Materiales					S/ 29.96
1.1. Material para Subbase	m3		1.2	24.96	29.96
Transporte interno	m3		1	3.79	3.79
Extracción de material de cantera	m3		1.1	6.68	7.35
Chancado de Agregados para Subbase	m3		1	10.99	10.99
Transporte de Agua para la obra	m3		0.17	16.68	2.84
Sub Total					24.96
2. Mano de Obra					S/ 3.01
Ayudante	HH	1	0.03088	14.92	0.46
Capataz	HH	1	0.00772	26.56	0.21
Chofer	HH		0.00772	22.90	0.18
operador Equipo Pesado	HH		0.0772	26.17	2.02
Herramientas				5%	0.14
3. Equipo y Maquinaria					S/ 18.04
Camión Cisterna 10000 LTS	HM		0.029	218.14	6.33
Compactadora Manual Rodillo Liso 8HP	HM		0.0154	171.71	2.64
Compactadora Pata de Cabra	HM		0.00772	262.844	2.03
Moto Niveladora 120 H 125HP	HM		0.0154	457.495	7.05
TOTAL					S/ 51.01

Tabla 37: Precios Unitarios de Losa de Concreto.

ANALISIS DE COSTOS PAVIMENTO RIGIDO - UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE CAJAMARCA					
ANALISIS ECONOMICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO - PRECIOS UNITARIOS DEL CONCRETO					
ESTUDIO:		Revista de Costos y Presupuestos (Tarifas Horarias en S/ al 31/05/2019)			
GUIA:					
DESCRIPCIÓN	UNID	CUAD	CANTID.	COSTO PARCIAL	COSTO TOTAL
CONCRETO F'C 280 KG/CM2 LOSA					
Rendimiento: 25 m3					
Unidad: m3					
1. Materiales					S/ 300.17
Arena Gruesa Clasificada	m3		0.5	48.31	24.16
Cemento Portland (42.5 kg)	bls		13.00	17.87	232.31
Piedra Chancada de 1/2" - 3/4" Huso 67	m3		0.8	51.61	41.29
Gasolina 84 Octanos (Grifo Lima)	gal		0.12	9.69	1.16
Aceite Motor Gasolina SAE 30W	gal		0.004	37.40	0.15
Grasa Múltiple EP	lb		0.008	10.38	0.08
Agua	ml		0.18	5.68	1.02
2. Mano de Obra					S/ 107.04
Capataz	HH	1	0.064	26.23	1.68
Operario	HH	1	0.64	21.86	13.99
Oficial	HH	1	0.64	17.51	11.21
Peon	HH	1	3.84	15.78	60.60
Operador Equipo	HH		0.64	22.61	14.47
Herramientas				5%	5.10
3. Equipo y Maquinaria					S/ 20.87
Mezcladora de Concreto T.Tambor 23 HP 11-12P3	HM		0.32	26.21	8.39
Cortadora de Pavimento	HM		0.04744	15.12	0.72
Grupo Electrogeno 150KVA	HM		0.04744	179.725	8.53
Regla Moduladora BT 90 D	HM		0.04744	26.04	1.24
Vibrador de Hormigon 4HP, 2.40 plg	HM		0.32	6.27	2.01
TOTAL					S/ 428.08

Fuente: Elaboración propia, 2019

En la tabla 36 y 37, se realizaron los precios unitarios de los materiales que conforman la estructura del pavimento rígido (Sub Base Granular y Losa de concreto), la mano de obra, así como el equipo y maquinaria que intervienen. Para los costos de construcción se tomaron en

cuenta los costos que brinda la revista de costos y presupuestos.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

En este capítulo se muestra los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad Privada del Norte de las muestras extraídas del suelo de subrasante del pasaje San Mateo y los resultados de los diseños del pavimento, tránsito vehicular y costos de construcción.

Resultados de los Estudios de Mecánica de Suelos:

3.1. Límites de Atterberg

Tabla 38: Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad del material del pasaje San Mateo.

<i>DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO (LL)</i>					
ID	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
G	Número de Golpes	N	34	28	19
H	Contenido de Humedad	%	41.18	41.67	44.44

Fuente: Elaboración propia, 2019.

<i>DETERMINACIÓN LÍMITE PLÁSTICO (LP)</i>				
ID	DESCRIPCIÓN	UND	1	2
H	Promedio Límite Plástico	%		23.81

Fuente: Elaboración propia, 2019.

LL =	42.90
LP =	23.81
IP=	19.09

3.2. Proctor Modificado

Tabla 39: Proctor Modificado del Material del Pasaje San Mateo.

<i>COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO</i>						
ID	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3	4
N	Promedio Contenido de humedad	%	12.2	13.2	16.2	17.45
O	Densidad Seca Máxima; D _s	gt/cm ³	1.59	1.74	1.81	1.49

Fuente: Elaboración propia, 2019

OPTIMO C.H:	15.20
--------------------	-------

Máxima D.S.: 1.88

3.3. CBR (California Bearing Ratio).

Tabla 40 Compactación de CBR del material del Pasaje San Mateo.

ENSAYO		COMPACTACION DE CBR							
CARACTERISTICAS DE LOS MOLDES									
Molde N°	M1			M2			M3		
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.91	1.94	2.00	2.04	2.15	2.21			
CONTENIDO DE HUMEDAD									
Ensayo N°	1- A	1- B	1- C	2 - A	2 - B	2 - C	3 - A	3 - B	3 - C
Densidad seca (gr/cm ³)	1.71			1.80			1.94		

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 41: Ensayo Carga – Penetración Suelo Natural.

ENSAYO		CARGA - PENETRACION SUELO NATURAL								
PENETRACIÓN		MOLDE N° 1			MOLDE N° 2			MOLDE N° 3		
		Carga	Esfuerzo		Carga	Esfuerzo		Carga	Esfuerzo	
(mm)	(pulg)	(lb)	(kg/cm ²)	(Lb/pulg ²)	(lb)	(kg/cm ²)	(Lb/pulg ²)	(lb)	(kg/cm ²)	(Lb/pulg ²)
2.54	0.100	280.00	31.44	92.00	410.00	46.04	134.72	490.00	55.02	161.00
5.08	0.200	480.00	53.89	157.72	690.00	77.47	226.72	790.00	88.70	259.58

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 42: CBR Y DENSIDAD SECA.

ENSAYO		C.B.R Y DENSIDAD SECA					
ESFUERZOS PARA 01" Y 02" DE PENETRACIÓN							
MOLDE N°	MOLDE N° 1		MOLDE N° 2		MOLDE N° 3		
Penetración (")	0.1 "	0.2 "	0.1 "	0.2 "	0.1 "	0.2 "	
CBR (%)	9.20	10.51	13.47	15.11	16.10	17.31	
Ds (GR/CM3)	1.71		1.80		1.94		

Fuente: Elaboración propia, 2019

Ds Máx : 1.88 gr/cm³

95 % Ds máx : 1.79 %

CBR (0.1") : 13.00%

Estudios de Tránsito Vehicular:

3.4. Tránsito Vehicular del Estudio.

Tabla 43: Resultados de Tránsito Promedio Diario Semanal.

DÍAS	VEHICULOS LIVIANOS		VEHICULOS PESADOS			TOTAL
	AUTO	B2	C2	C3	T2S3	
Domingo	844	9	37	9	4	903
Lunes	1060	11	42	16	8	1137
Martes	1092	12	46	20	10	1180
Miércoles	1073	9	44	15	7	1148
Jueves	1042	11	48	15	12	1128
Viernes	1215	21	52	22	12	1322
Sábado	1037	8	49	3	10	1107
TPDS	7363	81	318	100	63	7925
% Participación	92.91%	1.02%	4.01%	1.26%	0.79%	100.00%

Fuente: Elaboración Propia.

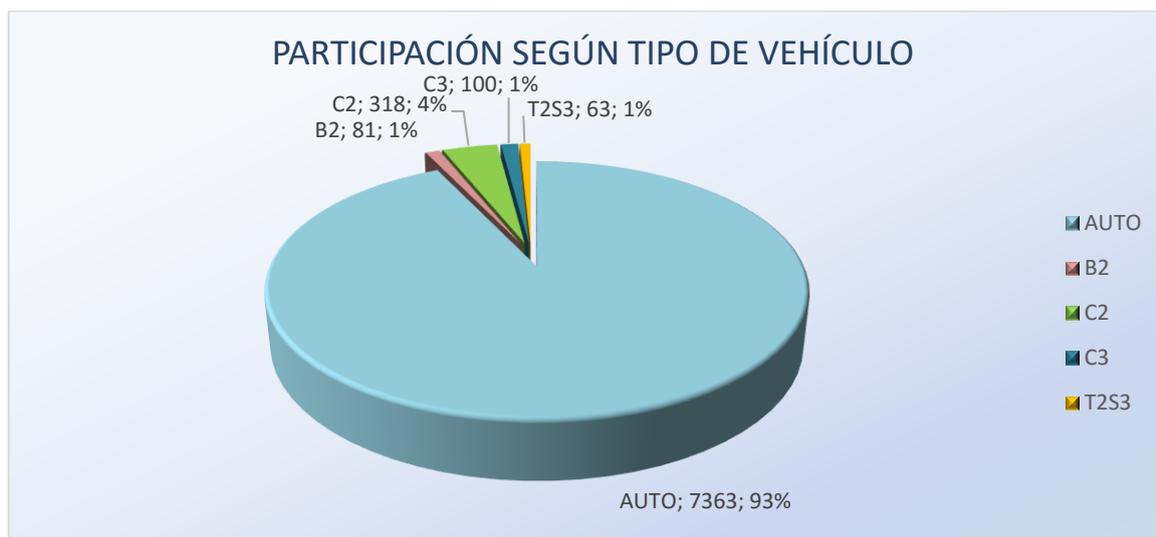


Figura 24: Participación según tipo de vehículo.

Como sabemos el análisis de tránsito vehicular y contar con datos estadísticos de tránsito, son muy importantes para el diseño de pavimentos, ya que la vía estará expuesta a la carga vehicular, durante todo el periodo de vida útil. En la tabla 43 y la figura 24, constatamos que la

participación de tránsito pesado en nuestra vía de estudio es baja, en cambio los vehículos ligeros abarcan el 93% de la totalidad.

Diseño del Pavimento – Método AASHTO:

Al diseñar el pavimento por la metodología AASHTO, primero encontramos todos los parámetros necesarios para calcular el espesor del pavimento.

K =	65.69	Mpa/m	So =	0.32	
Ec =	24820	Mpa	R =	80 % =>	ZR = -0.841
S'c = Mr =	4.35	Mpa	Pt =	2	
J =	3.00		ΔPSI =	2.5	
Cd =	0.90		W82 =	2527480.148	
			D =	???	mm Por tanteo
			D =	185.50	mm

De esta manera determinamos un espesor de pavimento rígido de 19 cm (7.5 pulgadas).

Diseño del Pavimento – Método PCA:

Al diseñar el pavimento por la metodología PCA, primero encontramos todos los parámetros necesarios para calcular el espesor del pavimento. El espesor del pavimento se asume hasta que los resultados de análisis por fatiga y por erosión sumen menor o igual al 100%.

K Subrasante:	6.95 Kg/cm ³	253.09 pci
K Combinado:	7.80 Kg/cm ³	284.04 pci
Espesor de Losa propuesto:	0.228 m	9.0 pulg
Subbase (h):	0.15 m	
Factor de Seguridad por Carga:	1.1	
Módulo de Ruptura Propuesto:	42 Kg/cm ²	597.37 psi

Cabe decir que primero asumimos un valor de 9 pulgadas de espesor de pavimento, y cumplieron los análisis de carga por fatiga y erosión, por lo que el espesor es correcto. Pero al querer disminuir el costo de construcción, asumimos un segundo espesor de 8.5 pulgadas, pero el análisis de cargas por fatiga no cumple ya que el porcentaje de consumo de las repeticiones

de carga admisibles sobrepasan el 100 %. De esta manera adoptamos un espesor de 9 pulgadas o 23 cm.

Costos de construcción:

Determinamos los siguientes costos de construcción de pavimento rígido, para la metodología PCA y AASHTO:

Tabla 44: Análisis de Costos de Construcción del Pavimento Rígido.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PAVIMENTO RÍGIDO - MÉTODO AASHTO		PAVIMENTO RÍGIDO - MÉTODO PCA		Costo Parcial
		Cantidad	PU (S/)	Cantidad	PU (S/)	
Subbase Estabilizada Granulométricamente	m3	232.0815	51.01	232.0815	51.01	11837.85
Pavimento de Hormigón de Cemento Portland	m3	293.9699	428.08	355.8583	428.08	152336.32
TOTAL			137680.90		164174.17	

Elaboración Propia.

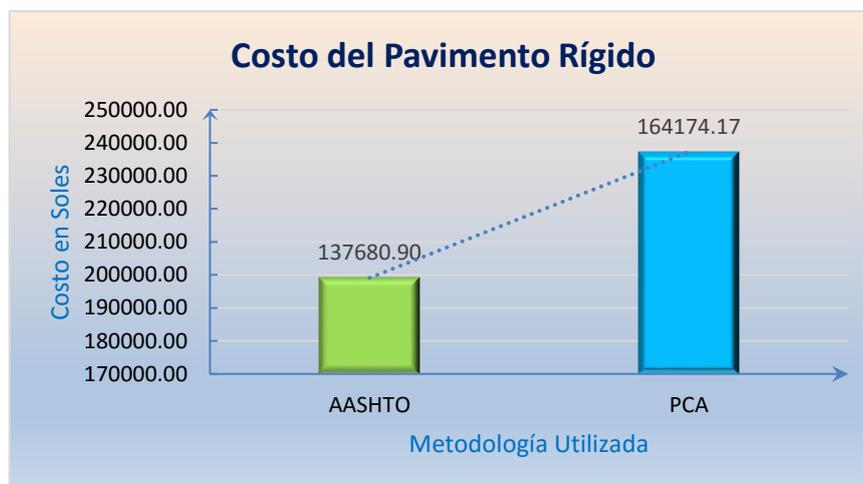


Figura 25: Costos del Pavimento Rígido, según metodología.

En la tabla 44 y la figura 25 podemos analizar a detalle una diferencia en costos de construcción, con la metodología PCA, tendríamos un costo de S/ 164,174.17 y La AASHTO un costo de S/ 137,680.90, haciendo una diferencia de S/26,493.27 en costos entre pavimentos.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN

- En la tabla 31, observamos que el diseño del pavimento cumple tanto para análisis de fatiga, como para erosión, ya que su suma no sobrepasa el 100%, es decir que el número de repeticiones admisibles o permisibles es mucho mayor que el número de repeticiones esperadas (repeticiones encontradas a través de nuestro estudio de tránsito vehicular), de esta manera analizamos que el espesor asumido es correcto, para el periodo de diseño seleccionado.
- En la tabla 34, observamos que el diseño no es adecuado, ya que el consumo de fatiga, sobrepasa el 100% de las repeticiones admisibles, por erosión cumple, pero; no cumple por ambos diseños que se requiere, por lo tanto, no adoptamos el espesor de 8.5 pulgadas o 21.5 cm. De esta manera logramos determinar nuestro espesor de pavimento rígido con la metodología del PCA, es necesario comentar que, si disminuimos el espesor del pavimento, disminuiría el costo de construcción de la vía, pero a la vez, el diseño de la vía no cumpliría al realizar un análisis de cargas por fatiga.
- En la tabla 35, observamos los metrados de la sub base granular y el pavimento de concreto, que constituyen la estructura del pavimento rígido, los metrados se hallaron conforme al diseño de las metodologías de AASHTO y PCA. La longitud del Pasaje San Mateo es de 249.55 metros.
- En la tabla 36 y 37, se realizaron los precios unitarios de los materiales que conforman la estructura del pavimento rígido (Sub Base Granular y Losa de

concreto), la mano de obra, así como el equipo y maquinaria que intervienen. Para los costos de construcción se tomaron en cuenta los costos que brinda la revista de costos y presupuestos. Como sabemos el análisis de tránsito vehicular y contar con datos estadísticos de tránsito, son muy importantes para el diseño de pavimentos, ya que la vía estará expuesta a la carga vehicular, durante todo el periodo de vida útil.

- En la tabla 43 y la figura 24, constatamos que la participación de tránsito pesado en nuestra vía de estudio es baja, en cambio los vehículos ligeros abarcan el 93% de la totalidad.
- En la tabla 44 y la figura 25 podemos analizar a detalle una diferencia en costos de construcción, con la metodología PCA, tendríamos un costo de S/ 164,174.17 y La AASHTO un costo de S/ 137,680.90, haciendo una diferencia de S/26,493.27 en costos entre pavimentos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Haciendo la contratación de la hipótesis, tomamos como cierta la hipótesis, ya que el método de diseño de pavimentos rígido AASHTO tiene menor espesor de pavimento y, por lo tanto menor costo de construcción, respecto al método de diseño PCA, en una vía pública de la ciudad de Cajamarca, sin embargo al hacer un análisis de la estructura en función al tipo de diseño de pavimento durante toda la vida útil de este, nos damos cuenta que el espesor del pavimento AASHTO, no cumpliría con los parámetros de análisis de fatiga y erosión, que presenta la metodología PCA, por lo que no es conveniente escoger la metodología AASHTO.
 - Las propiedades físico-mecánicas del material proveniente de la subrasante de la vía pública Pasaje San Mateo, Barrio Mollepampa, son las siguientes:
 - El límite líquido es de 42.90, el límite plástico es de 23.81, el índice de plasticidad es de 19.09, la máxima densidad seca es de 1.88 gr/cm³ y el CBR a una penetración de 0.1'' es de 13%.
 - El estudio de tráfico de la vía pública seleccionada (Pasaje San Mateo), se hizo en una vía alterna (Av. Nuevo Cajamarca), ya que la vía en estudio es una vía nueva y para tener datos más influyentes se tomó esta consideración. Se encontraron los siguientes datos:
 - En el día de máxima demanda vehicular se encontró que el número de vehículos ligeros representa el 93% del total de vehículos; y, los vehículos pesados (B2, C2, C3, T2S3) el 7%, dando a conocer que la incidencia de estos

sería bajo en el periodo de vida útil del pavimento, por lo que escogeríamos el diseño de pavimento con menor espesor (AASHTO), pero por las razones antes descritas no adoptamos esta metodología.

- En el diseño por PCA, se determinó un espesor de losa de 23 cm (9 pulgadas) y en el diseño por AASHTO se determinó un espesor de 19 cm (7.5 pulgadas).
- Al realizar el análisis de costos de los pavimentos se obtuvo que en la metodología PCA tendríamos un precio de S/ 164,174.17 y S/ 137,680.90 para la metodología AASHTO, obteniendo una diferencia de S/ 26,493.27 soles, por lo que concluimos que, al hacer este análisis técnico económico, nuestra mejor alternativa sería la metodología AASHTO.

5.2. RECOMENDACIONES

- En el caso de presentarse fallos en el terreno natural se recomienda realizar la excavación y remplazo de material defectuoso con el material de buenas características como material tipo afirmado. De requerirse, se puede contemplar la instalación de un producto geosintético (geo-textil tejido referencia T2400 o 3*3 HF o el equivalente de estos en el mercado) el cual debe cumplir con la normatividad vigente INVIAS 2013. este producto debe instalarse en las áreas en donde se va a intervenir para separar, estabilizar y evitar que se refleje los cambios volumétricos del suelo natural.
- Se recomienda utilizar módulos de rotura mayores, para generar esfuerzos equivalentes bajos, que nos permitan diseñar espesores de losas mínimos, teniendo en cuenta el tránsito vehicular.
- Para garantizar una superficie de acabado homogénea, debe existir control topográfico durante todo el proceso de colocación de capa, ya que, si lo anterior no se cumple, es condición para que se genere acumulación de humedad, que termina infiltrándose.
- Se recomienda considerar la variable clima (estado del tiempo atmosférico) para el proceso constructivo, teniendo en cuenta el régimen de lluvias que se presenta en la zona. Cuando se presente lluvias se debe cubrir el concreto a fin que no se presente el lavado de la superficie que posteriormente comprometa la durabilidad del concreto.

REFERENCIAS

1. Montejo Fonseca A. (2010). *Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño*. (3.^a ed.). Colombia: Universidad Católica de Colombia.
2. Rondón Quintana H., Reyes Lizcano F. (2015). *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá: ECOE Ediciones.
3. Rico Rodríguez A, Del Castillo H. (1998). *La ingeniería de los suelos en las vías terrestres: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas*. México: Limusa.
4. Instituto de la Construcción y Gerencia (2012). *Ingeniería de Pavimentos: Materiales, diseño y conservación*. (3.^a ed.). Perú: ICG.
5. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2002). *Pavimentos de concreto para carreteras*. México: IMCYC.
6. Instituto Colombiano de Productores de Cemento (1996). *Pavimentos de Concreto, Manual de Diseño*. Medellín: Piloto Ltda.
7. American Association of State Highway and Transportation (1993). *Guide for Design of Pavements Structures*. Washington: AASHTO.
8. Cornejo A., Velásquez J. (2009). *Análisis comparativo entre métodos de diseño de estructuras de pavimento rígido* (Tesis de titulación). Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, el Salvador.
9. Torres, R. (2007). *Análisis comparativo de costos entre el pavimento flexible y el pavimento rígido* (Tesis de Titulación). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
10. Burgos, B. (2014). *Análisis comparativo entre un pavimento rígido y un pavimento flexible para la ruta s/r: Santa Elvira – El arenal, en la comuna de Valdivia*. (Tesis de Titulación). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
11. Párraga, J., Sánchez, A. (2002). *Estudio comparativo sobre los costes de mantenimiento y rentabilidad económica, social y deportiva entre campos de fútbol con pavimentos de césped natural y artificial en el ámbito universitario*. Revista Motricidad, pp 22-46.

ANEXOS

ANEXO 1: ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS

ANEXO 2: ESTUDIO DE TRÁNSITO VEHICULAR

Tabla 45: Aforo Vehicular de la semana (22/07/2019-28/07/2019).

ESTUDIO DE TRANSITO - UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE CAJAMARCA			
	ESTUDIO:	PAVIMENTACION DEL PASAJE SAN MATEO - BARRIO MOLLEPAMPA - CAJAMARCA - TRÁNSITO VEHICULAR	
	NORMA:	Reglamento Nacional de Tránsito - Código de Tránsito. DECRETO SUPREMO No 016-2009-MTC	
Lugar:	PASAJE SAN MATEO-BARRIO MOLLEPAMPA-CAJAMARCA	Fecha(dd/mm/aa)	22/07/2019 AL 28/07/2019
Aforador:	Christian Kevin Minchán Lezcano	Estacion de Conteo	PASAJE SAN MATEO

ESTUDIO DE TRANSITO

HORA	VEH. LIVIANOS										VEHICULOS PESADOS																											
											   																											
	AUTO					B2					C2					C3					T2S3																	
DIAS	L	M	MI	J	V	S	D	L	M	MI	J	V	S	D	L	M	MI	J	V	S	D	L	M	MI	J	V	S	D										
6:30	6:45	25	19	22	18	21	19	11	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0					
6:45	7:00	24	23	21	13	25	20	9	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0					
7:00	7:15	28	22	23	21	24	16	13	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0					
7:15	7:30	23	19	26	19	21	13	16	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
7:30	7:45	29	21	13	16	18	15	20	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0					
7:45	8:00	16	20	17	17	17	13	22	0	0	1	0	0	0	0	2	2	0	1	1	1	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0			
8:00	8:15	23	31	15	15	20	18	15	1	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	1	1	0	1	0	1	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0			
8:15	8:30	19	16	22	13	20	12	17	0	1	0	0	1	0	0	1	2	2	1	1	2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
8:30	8:45	20	12	13	15	24	17	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
8:45	9:00	15	19	26	15	20	15	12	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
9:00	9:15	17	17	20	21	22	16	8	1	0	0	0	0	0	0	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
9:15	9:30	10	16	16	15	27	18	9	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
9:30	9:45	11	9	17	13	17	20	13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0		
9:45	10:00	9	8	14	14	17	12	0	0	0	1	0	1	0	1	0	2	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0		
10:00	10:15	17	11	11	28	27	13	11	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	1	3	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
10:15	10:30	11	12	15	18	25	12	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0		
10:30	10:45	15	13	21	14	23	16	16	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

10:45	11:00	8	15	15	15	17	11	14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0				
11:00	11:15	11	17	22	19	13	16	13	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
11:15	11:30	13	16	11	15	12	13	16	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
11:30	11:45	12	17	11	18	22	15	15	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0				
11:45	12:00	11	14	22	21	27	14	16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0				
12:00	12:15	24	18	23	17	21	18	12	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0				
12:15	12:30	17	22	16	14	27	16	23	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0				
12:30	12:45	26	26	19	20	16	15	13	0	1	0	0	1	0	1	1	1	3	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0				
12:45	13:00	23	23	26	18	21	20	21	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	2	1	2	4	2	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0				
13:00	13:15	24	14	18	13	22	26	14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0				
13:15	13:30	22	21	24	11	26	16	18	0	0	0	1	0	0	0	1	1	2	1	1	2	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1				
13:30	13:45	24	19	13	16	22	12	15	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
13:45	14:00	28	12	18	13	17	18	15	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	1	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
14:00	14:15	12	22	15	27	19	16	11	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1			
14:15	14:30	16	11	17	18	21	29	9	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	2	0	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
14:30	14:45	15	22	13	31	23	25	13	0	0	0	1	0	0	0	2	1	2	0	2	1	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	1	0	0	0				
14:45	15:00	12	12	18	26	23	29	24	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15:00	15:15	15	28	17	27	23	21	14	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0	1	2	1	2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0			
15:15	15:30	12	10	23	26	27	14	14	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0			
15:30	15:45	16	23	20	11	26	12	14	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	2	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
15:45	16:00	19	30	25	27	24	19	13	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
16:00	16:15	21	22	18	14	19	22	13	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
16:15	16:30	24	15	25	15	18	25	17	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1		
16:30	16:45	23	29	23	13	26	11	12	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
16:45	17:00	21	12	26	14	15	15	17	0	2	1	0	0	1	0	0	1	2	1	1	2	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
17:00	17:15	22	15	11	23	23	30	19	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
17:15	17:30	24	17	23	19	24	19	14	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0		
17:30	17:45	16	16	22	15	12	24	12	0	0	0	0	0	0	0	2	3	1	1	3	3	0	0	2	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
17:45	18:00	18	29	21	13	25	23	14	0	1	0	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
18:00	18:15	19	29	25	17	21	29	14	1	0	0	0	1	0	0	2	0	1	2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18:15	18:30	21	14	17	9	17	12	15	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	
18:30	18:45	16	10	14	25	19	11	18	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	0	1	0	2	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
18:45	19:00	27	27	19	9	27	12	15	1	0	2	0	0	0	1	1	1	2	1	1	2	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
19:00	19:15	19	27	21	18	20	25	13	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19:15	19:30	31	12	17	27	35	19	16	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0		
19:30	19:45	14	10	21	15	23	28	14	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19:45	20:00	17	28	12	28	22	22	12	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	2	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	
20:00	20:15	18	27	19	25	13	11	16	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
20:15	20:30	13	21	16	28	13	21	14	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20:30	20:45	13	28	14	12	14	19	18	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
20:45	21:00	11	13	11	15	12	14	10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	
TOTAL		1060	1081	1073	1042	1215	1037	844	11	12	9	11	21	8	9	42	46	44	48	52	49	37	16	20	15	15	22	3	9	8	10	7	12	12	10	4			

ANEXO 3: PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 26: Realizando el ensayo de penetración en la prensa de CBR.



Figura 27: Realizando el Ensayo Proctor Tipo A.



Figura 28: Secado en estufa de muestras para los ensayos.



Figura 29: Sumersión de moldes CBR para determinar hinchamiento.

ANEXO 4: REGLAMENTO NACIONAL DE TRÁNSITO

Reglamento Nacional de Tránsito - Código de Tránsito.

DECRETO SUPREMO N.º 016-2009-MTC

Modificatoria N.º 016-2017-MTC

De conformidad con el Numeral 1.2 del Numeral 1 de la Única Disposición Complementaria Transitoria del Decreto Supremo N.º 016-2017-MTC, publicado el 30 julio 2017, se dispone que hasta el 31 de julio de 2018, sólo se impondrán papeletas educativas por exceso de velocidad detectadas a través del dispositivo de control y monitoreo inalámbrico. A partir del 01 de agosto de 2018, la autoridad a cargo de la fiscalización impondrá las infracciones que correspondan por exceso de velocidad conforme a lo establecido en el Texto Único Ordenado del Reglamento Nacional de Tránsito, aprobado mediante el presente Decreto.

Que, la Ley N.º 29259 establece la modificación de las sanciones y medidas preventivas previstas en la Ley General de Transporte y Tránsito Terrestre, Ley N.º 27181, siendo necesario actualizar el Reglamento Nacional de Tránsito, conforme a lo dispuesto por el marco legal aplicable;

TITULO III. De las vías.

CAPÍTULO I. Aspectos Generales.

Artículo 9º Elementos.

La vía comprende la calzada, la acera, la berma, la cuneta, el estacionamiento, el separador central, el jardín y el equipamiento de servicios necesarios para su utilización.

Las vías públicas se utilizan de conformidad con el presente reglamento y las normas que rigen sobre la materia.

Artículo 10° Autoridad competente.

Los elementos integrantes de la vía pública, sean funcionales, de servicio o de ornato complementarios, son habilitados o autorizados por las respectivas Autoridades, según su competencia.

Artículo 13° Normas técnicas.

Las normas técnicas de diseño, construcción y mantenimiento de las vías se encuentran establecidas en el Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura, al que se sujetarán las Autoridades competentes en sus respectivas jurisdicciones.

Artículo 24.- Prohibiciones.

Está prohibido en la vía:

- 1) Destinar las calzadas a otro uso que no sea el tránsito y el estacionamiento.
- 2) Ejercer el comercio ambulatorio o estacionario.
- 3) Colocar propaganda u otros objetos que puedan afectar el tránsito de peatones o vehículos o la señalización y la semaforización.
- 4) Efectuar trabajos de mecánica, cualquiera sea su naturaleza, salvo casos de emergencia.
- 5) Dejar animales sueltos o situarlos en forma tal que obstaculicen el tránsito.
- 6) Construir o colocar parapetos, kioscos, cabinas, cercos, paraderos u ornamentos en las esquinas u otros lugares de la vía que impidan la visibilidad del usuario de la misma.
- 7) Colocar en la calzada o en la acera, elementos que obstruyan la libre circulación.
- 8) Derivar aguas servidas o de regadío o dejar elementos perturbadores del libre tránsito o desperdicios como maleza, desmonte, material de obra y otros, salvo maleza en los lugares autorizados.

9) Recoger o dejar pasajeros o carga en lugares no autorizados.

Artículo 29.- Dispositivos de control de tránsito.

Los dispositivos de control del tránsito que se instalen en la vía pública, deben cumplir con las exigencias establecidas en el Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras, que aprueba el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, en concordancia con los Convenios Internacionales suscritos por el Perú.

Artículo 30° Tránsito en zona urbana.

La autoridad competente podrá fijar en zona urbana:

- a) Vías o carriles para la circulación exclusiva de vehículos del servicio público de transporte de pasajeros.
- b) Sentidos de tránsito variables para un tramo de vía o una vía determinada, en horarios que la demanda lo justifique.

CAPÍTULO 11. Dispositivos de control.

SECCION I. Aspectos Generales.

Artículo 33° Señalización.

La regulación del tránsito en la vía pública, debe ejecutarse mediante señales verticales, marcas en la calzada, semáforos, señales luminosas y dispositivos auxiliares.

Las normas para el diseño y la utilización de los dispositivos de regulación, se establecen en el Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras que aprueba el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La instalación, mantenimiento y renovación de los dispositivos de regulación del tránsito, en las vías urbanas de su jurisdicción es competencia de las Municipalidades Provinciales y de las Municipalidades Distritales, y se ejecutará conforme a lo establecido en el presente Reglamento y sus normas complementarias.

SECCION V. Policía Nacional del Perú.

Artículo 57° Obediencia al efectivo policial.

Los usuarios de la vía están obligados a obedecer de inmediato cualquier orden de la Policía Nacional del Perú asignados al control del tránsito, que es la autoridad responsable de fiscalizar el cumplimiento de las normas de tránsito.

Las indicaciones de los efectivos de la Policía Nacional del Perú, asignados al control del tránsito, prevalecen sobre las señales luminosas o semáforos, y éstas sobre los demás dispositivos que regulan la circulación.

TITULO IV. De la circulación.

CAPÍTULO I. De los peatones y uso de la vía.

Artículo 67° Circulación del peatón.

Debe circular por las aceras, bermas o franjas laterales, según sea el caso, sin utilizar la calzada ni provocar molestias o trastornos a los demás usuarios, excepto cuando deba cruzar la calzada o encuentre un obstáculo que esté bloqueando el paso, y en tal caso, debe tomar las precauciones respectivas para evitar accidentes. Debe evitar transitar cerca al sardinel o al borde de la calzada.

CAPÍTULO 11. De los conductores y uso de la vía.

Artículo 83° Precauciones.

El conductor de cualquier vehículo debe:

1. Tener cuidado y consideración con los peatones y con los vehículos que transiten a su alrededor.

2. Tomar las debidas precauciones con los peatones que despejen la intersección en el momento que el semáforo ya no los autoriza a cruzar la calzada, debiendo detener su marcha absteniéndose de usar la bocina de forma que pudiera causar sobresalto o confusión al peatón.

3. Tener especial cuidado con las personas con discapacidad, niños, ancianos y mujeres embarazadas.

SECCION VI. Velocidades.

Artículo 160° Prudencia en la velocidad de la conducción.

El conductor no debe conducir un vehículo a la velocidad mayor de la que sea razonable y prudente, bajo las condiciones de transitabilidad existentes en la vía, debiendo considerar los riesgos y peligros presentes y posibles.

En todo caso la velocidad debe ser tal, que le permita controlar el vehículo para evitar accidentes.

Artículo 162° Límites máximos de velocidad.

Cuando no existan los riesgos o circunstancias señaladas en los artículos anteriores, los límites máximos de velocidad son los siguientes:

a) Zona urbana:

1. En calles y jirones: 40 km/h
2. En avenidas: 60 km/h
3. En vías expresas: 80 km/h
4. Zona escolar: 30 km/h
5. Zona de hospital: 30 km/h

Artículo 164° Límites máximos de velocidad especiales.

Límites máximos especiales:

- a) En las intersecciones urbanas no semaforizadas; la velocidad precautoria, no debe superar a 30 km/h.
- b) En la proximidad de establecimientos escolares, deportivos y de gran afluencia de personas, durante el ingreso, su funcionamiento y evacuación, la velocidad precautoria no debe superar a 20 km/h.
- e) En vías que circunvalen zonas urbanas, 60 km/h, salvo señalización en contrario.

«**Artículo 168-A.-** Tolerancia sobre las velocidades máximas permitidas

A las velocidades máximas permitidas en el presente Reglamento debe aplicarse un margen de tolerancia de 5 Km/h, por lo que el exceso de velocidad es sancionable sólo cuando se supere la velocidad máxima más el margen de tolerancia señalado.» (*)

(*) Artículo incorporado por el Artículo 3 del Decreto Supremo N° 025-2014-MTC, publicado el 01 enero 2015.

(*) De conformidad con la Tercera Disposición Complementaria Final del Decreto Supremo N° 009-2015-MTC, publicado el 24 septiembre 2015, se dispone que en los casos en que se utilice sistemas de control y monitoreo inalámbrico para medir la velocidad a los vehículos del servicio de transporte público de personas en los ámbito nacional y regional, se considerará un margen de error de 10 km/h en la velocidad detectada del vehículo que se encuentra en movimiento. En estos casos no es de aplicación lo dispuesto en el presente artículo.

ANEXO 5: PLANOS