UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta de diseño estructural del pavimento rígido convencional
y fibroreforzado de la Av. Sánchez Cerro en Piura usando la tecnología
del reciclado mecánico

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Espinoza Gonzáles, Álvaro Javier (0000-0003-4563-2426)

Vargas Guevara, Jessica Jeanette (0000-0002-4241-2324)

ASESOR

Lazo Lázaro, Guillermo (0000-0002-7968-7858)

Lima, agosto del 2020

DEDICATORIA

A mis padres, Carlos Espinoza y Patricia Gonzáles, por su ejemplo y fortaleza, soporte y cariño, pero sobre todo por su impulso constante para seguir adelante.

A la Ing. Ana Biondi Shaw, por ser un ejemplo a lo largo de mi vida académica y profesional, por su apoyo y su amistad incondicional.

Álvaro Espinoza Gonzáles

A mis padres, Ernesto Vargas y María Guevara, por su esfuerzo, consejo, enseñanzas, motivación y apoyo en las distintas etapas y decisiones de mi vida.

A mis hermanos Alonso, Nicolle y Cucho, por su alegría y compañía, me han ayudado a ser una mejor persona y profesional.

Jessica Vargas Guevara

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros, técnicos y trabajadores de COSAPI, por brindarnos las facilidades necesarias para realizar las investigaciones en el proyecto, así como su apoyo en la ejecución de los trabajos de campo necesarios para la presente investigación.

A la Ing. Maggie Martinelli, Ing. Milagros Soto, los técnicos y trabajadores de la empresa MyM Consultores y MyM Laboratorios, quienes nos brindaron las facilidades necesarias con los equipos e instalaciones para la realización de los ensayos de laboratorio en las muestras de suelo.

A todos ellos, nuestro más sincero agradecimiento y mejores deseos.

RESUMEN

Debido al incremento tránsito, el poco o nulo mantenimiento de la vía, la falta de drenaje pluvial y los estragos ocasionados por el fenómeno de “El Niño Costero”, la infraestructura vial de la Av. Sánchez Cerro se ha deteriorado a tal punto de presentar fallas estructurales y nulos niveles de serviciabilidad que no permiten un tránsito adecuado de los vehículos y peatones que circulan por la zona, afectando el confort del ciudadano y el paisajismo de la ciudad.

Ante ello, y debido a que la zona es altamente comercial, con muchas interferencias producidas por los servicios públicos, las tendencias de sostenibilidad a nivel global y los niveles existentes en el proyecto, se ha realizado optado por realizar una propuesta de rehabilitación del pavimento mediante una base reciclada de asfalto con colocación de una losa de pavimento rígido que permita cumplir con los objetivos del proyecto.

El objetivo principal del estudio es realizar el diseño del reciclado mecánico, también conocido como RAP, y el diseño de la losa de concreto del pavimento rígido mediante las metodologías AASHTO 1993, PCA 1984 y la “*Yield Line Theory*” (basada en *Technical Report N° 34* del Eurocódigo) utilizada para el diseño de losas reforzadas con fibras que permita verificar las condiciones de diseño, brindando soluciones tradicionales y alternativas que permitan mantener los niveles de la vía.

Palabras clave: pavimento rígido; rehabilitación del pavimento; reciclado mecánico; losa reforzada con fibras; fibras metálicas; evaluación de la condición del pavimento; AASHTO; PCA; Eurocódigo.

Structural design proposal for the conventional and fiber-reinforced rigid pavement of
Sánchez Cerro avenue in Piura using mechanical recycling technology

ABSTRACT

Due to the increase in traffic, the lack of maintenance and drainage of the road and the damage caused by "El Niño Costero", the infrastructure of Sánchez Cerro avenue has deteriorated to the point of presenting structural failures and zero levels of serviceability that do not allow the transit of vehicles and pedestrians, affecting the comfort of the citizen and the landscape of the city.

Given this, and because the area is highly commercial, with many interferences produced by public services, the global sustainability trends and existing levels in the project, it has been decided to carry out a proposal for the rehabilitation of the pavement through a recycled asphalt pavement (RAP) with the placement of a concrete slab that allows reach the objectives of the project.

The main objective is to carry out the mechanical recycling design and the design of the rigid pavement concrete slab using the AASHTO 1993, PCA 1984 and "Yield Line Theory" methodologies (based on Technical Report No. 34 of the Eurocode) used for the design of slabs reinforced with fibers that allows to verify the design conditions, providing traditional and alternative solutions that allow maintaining the levels of the road.

Keywords: rigid pavement; pavement rehabilitation; mechanical recycling; steel fiber reinforced slab; metallic fibers; assessment of pavement condition; AASHTO; PCA; Eurocode.

TABLA DE CONTENIDOS

1	GENERALIDADES	12
1.1	Introducción.....	12
1.2	Problema de investigación.....	13
1.2.1	Planteamiento del problema	13
1.2.2	Justificación del problema	14
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo general	15
1.3.2	Objetivos específicos	15
1.4	Metodología de investigación.....	15
1.4.1	La hipótesis.....	17
1.5	Indicadores de logro	17
2	MARCO TEÓRICO FUNDAMENTAL	18
2.1	Pavimento	18
2.1.1	Clasificación de los pavimentos	19
2.1.2	Ventajas y desventajas de los tipos de pavimentos	20
2.1.2.1	Pavimento rígido	21
2.1.2.2	Pavimento flexible.....	22
2.2	Fibras en el concreto.....	22
2.2.1	Tipos de fibras	23
2.2.1.1	Fibras naturales.....	24
2.2.1.2	Fibras artificiales orgánicas	25
2.2.1.3	Fibras metálicas	26
2.2.2	Ventajas del uso de fibras.....	26
2.3	Reciclado de pavimentos asfálticos	27
2.3.1	Tipos de reciclado asfáltico	27
2.3.1.1	Según la técnica utilizada	28
2.3.1.2	Según el proceso constructivo	29
2.3.2	Ventajas del reciclado de pavimentos	29
2.3.2.1	Según la técnica utilizada	30
2.3.2.2	Según el proceso constructivo	30
3	MARCO TEÓRICO ESPECÍFICO	31
3.1	Pavimento rígido	31

3.1.1	Tipos de pavimento rígido	31
3.1.2	Componentes de un pavimento rígido	33
3.2	Fibras de acero	34
3.3	Reciclado de pavimentos asfálticos en frío	36
3.3.1	Tipos de reciclado de pavimentos asfálticos en frío	37
3.3.1.1	Según el lugar en que se realizan	38
3.3.1.2	Según la profundidad del reciclado	38
3.3.1.3	Según el aditivo utilizado	39
3.3.1.4	Según el empleo de árido	40
3.3.2	Ventajas del reciclado de pavimentos asfálticos en frío	41
3.3.3	Recomendación de uso	41
3.4	Metodologías de diseño de pavimentos	44
3.4.1	Método de la AASHTO 1993	44
3.4.1.1	Parámetros de diseño	45
3.4.2	Método de la PCA 1984	55
3.4.2.1	Parámetros de diseño	56
3.4.3	Método de la <i>Yield Line Theory</i> (basado en el <i>Technical Report N° 34</i>)	59
3.4.3.1	Parámetros de diseño	60
4	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA	73
4.1	Descripción del proyecto	73
4.2	Clima	74
4.3	Geografía	75
4.4	Geomorfología	75
4.5	Evaluación de la condición actual del tramo en estudio	76
4.5.1	Exploración de campo	76
4.5.2	Condición actual del pavimento	77
4.5.3	Condición actual de las bermas	79
4.5.4	Condición actual del sistema de drenaje	80
4.6	Estudio de tránsito	80
4.6.1	Cálculo de los ejes equivalentes	82
5	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	84
5.1	Ensayos de laboratorio	84
5.1.1	Ensayos de propiedades índice en pavimento existente	85
5.1.2	Ensayos de propiedades especiales existente	86

5.1.3	Ensayos de propiedades índice para obtención de diseño del RAP	86
5.1.4	Ensayos de propiedades especiales para obtención de diseño del RAP	87
5.2	Especificaciones técnicas de las fibras	88
5.3	Criterios de diseño	88
6	DISEÑO DE PAVIMENTOS	90
6.1	Método de las diferencias acumuladas	90
6.2	Determinación del coeficiente de balasto combinado	91
6.3	Determinación de la espesor de la losa del pavimento rígido	92
6.3.1	Método AASHTO	92
6.3.2	Método de la PCA	93
6.3.3	Método de la “ <i>Yield Line Theory</i> ” basado en el TR N° 34	95
6.3.4	Resultados de diseño de acuerdo a la metodología	97
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
7.1	Conclusiones.....	99
7.2	Recomendaciones	100
8	REFERENCIAS	101
7.	ANEXOS	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Hipótesis de la investigación	17
Tabla 2 Indicadores de logro de la investigación	17
Tabla 3 Ventajas y desventajas de los tipos de pavimentos	20
Tabla 4 Ventajas y desventajas del pavimento rígido	21
Tabla 5 Ventajas y desventajas del pavimento flexible.....	22
Tabla 6 Características mecánicas de las fibras.....	24
Tabla 7 Propiedades típicas de las fibras naturales	25
Tabla 8 Principales ventajas de las técnicas de reciclado según proceso constructivo	30
Tabla 9 Especificaciones técnicas de las fibras utilizadas.....	36
Tabla 10 Ventajas y desventajas de los tipos de pavimentos	41
Tabla 11 Comparación del reciclado con cemento, emulsión y asfalto espumado. Ventajas y desventajas.....	43
Tabla 12 Guía para la selección del periodo de diseño de un pavimento rígido	45
Tabla 13 Confiabilidad sugerida según clasificación funcional del pavimento	46
Tabla 14 Desviación normal estándar (Z_r) asociado a la confiabilidad de diseño	47
Tabla 15 Serviciabilidad de diseño según tipo de vía	47
Tabla 16 Calidad del drenaje en la base y subbase.....	48
Tabla 17 Coeficiente de drenaje según porcentaje anual de lluvia y calidad de drenaje	48
Tabla 18 Valores recomendados del módulo de rotura del concreto según uso de la vía...	49
Tabla 19 Módulo de elasticidad del concreto según su peso unitario	49
Tabla 20 Coeficiente de transmisión de carga según tipo de berma	50
Tabla 21 Valores recomendados para la pérdida de soporte (L_s) según tipo de material....	54
Tabla 22 Factor de proyección según tasa de crecimiento del tráfico y periodo de diseño	58
Tabla 23 Características de la rehabilitación en los tramos del proyecto.....	74
Tabla 24 Conteo vehicular de la Av. Sanchez Cerro – Tramo II	81
Tabla 25 Conteo vehicular de la Av. Sanchez Cerro – Tramo II – Vía principal	81
Tabla 26 Conteo vehicular de la Av. Sanchez Cerro – Tramo II – Vías auxiliares	81
Tabla 27 Ejes estándar de carga equivalente para la Av. Sánchez Cerro – Tramo II.....	83
Tabla 28 ESALs de diseño para la Av. Sánchez Cerro – Tramo II.....	83
Tabla 29 Resumen de resultados de los ensayos de propiedades índice en muestras del pavimento existente	85
Tabla 30 Resumen de resultados de los ensayos de propiedades especiales en muestras del pavimento existente	86

Tabla 31 Resumen de los ensayos de propiedades índice en muestras de RAP.....	87
Tabla 32 Resumen de los ensayos de propiedades especiales en muestras de RAP	87
Tabla 33 Resumen de ensayos de adicionales en muestras de RAP	88
Tabla 34 Especificaciones técnicas de las fibras de acero utilizadas para el diseño	88
Tabla 35 Criterios de diseño de acuerdo a la metodología utilizada	89
Tabla 36 Determinación de los tramos de diseño del proyecto por el método de las diferencias acumuladas.....	90
Tabla 37 Determinación del espesor óptimo del pavimento según el método de la PCA...	95
Tabla 38 Resumen del diseño de la losa de concreto según la metodología	97
Tabla 39 Determinación del espesor óptimo del pavimento según el método de la “Yield Line Theory”	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del tráfico de pasajeros en el transporte hacia el departamento de Piura: 2007 – 2016 (miles de pasajeros).	14
Figura 2. Estructura causal compleja multivariable de la investigación	16
Figura 3. Estructura típica y distribución de cargas en una sección de pavimento flexible	19
Figura 4. Estructura típica de un pavimento semirrígido de tipo adoquinado.....	19
Figura 5. Estructura típica y distribución de cargas en una sección de pavimento rígido...	20
Figura 6. Clasificación de las fibras según BISFA, por Maccaferri, 2007.....	23
Figura 7. Pavimento de concreto hidráulico simple, por Vásquez, 2017	31
Figura 8. Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo de acero, por Vásquez, 2017	32
Figura 9. Sección típica de un pavimento rígido y flexible, por AASHTO, 1993.	33
Figura 10. Clasificación del reciclado de pavimentos, por Thenoux, 1999.	37
Figura 11. Tipo de reciclado según tipo de falla. Adaptado de Thenoux, 1999.....	42
Figura 12. Tipos de bermas ancladas al carril del pavimento, por Vásquez, 2017.	50
Figura 13. Correlaciones del Mr con las propiedades del suelo, por AASHTO, 2002	52
Figura 14. Ábaco de cálculo del módulo compuesto de reacción de la subrasante (k), por la AASHTO, 1993.	53
Figura 15. Ábaco de corrección del módulo de reacción de la subrasante (k) por el coeficiente de pérdida de soporte (L_s), por AASHTO, 1993	54
Figura 16. Relación entre la resistencia a la flexión y la edad de diseño, por Portland Cement Association (PCA), 1984.....	56
Figura 17. Tabla de correlaciones entre la clasificación de suelos y los valores de soporte según metodología, por la Portland Cement Association (PCA), 1995.	57
Figura 18. Esquema de distribución de momentos de flexión elásticos para cargas internas a) para carga típica, b) para carga P1, c) para carga P2 y d) para las combinaciones de P1 y P2, por The Concrete Society, 2016.	61
Figura 19. Desarrollo de grietas radiales y circunferenciales en una losa de concreto apoyada sobre el suelo, por The Concrete Society, 2016.	62
Figura 20. Ubicación de las cargas de diseño, por The Concrete Society, 2016.....	63
Figura 21. Dimensión efectiva de la placa base, por The Concrete Society, 2016.	64
Figura 22. Área de contacto equivalente para dos cargas puntuales adyacentes, por The Concrete Society, 2016.....	65
Figura 23. Cargas adyacentes en pasillos estrechos, por The Concrete Society, 2016.	65
Figura 24. Patrones de falla para cargas múltiples, por The Concrete Society, 2016.	66

Figura 25. Parámetros críticos de falla por punzonamiento para cargas internas, por The Concrete Society, 2016.....	69
Figura 26. Parámetros críticos de falla por punzonamiento para cargas internas, por The Concrete Society, 2016.....	70
Figura 27. (a) Patrones de carga para una carga q uniformemente distribuida que causa un momento flector positivo máximo; (b) momento flector negativo máximo, por The Concrete Society, 2016.	71
Figura 28. (a) y (b): áreas definidas de distribución uniforme carga, por The Concrete Society, 2016.	72
Figura 29. Ubicación del Proyecto, adaptado de Google Maps.	73
Figura 30. Temperatura promedio anual de la región Piura. Adaptado de INEI – Sistema de información regional para la toma de decisiones	75
Figura 31. Extracción de calicatas en el tramo en estudio.	76
Figura 32. Estructura promedio del pavimento existente.	77
Figura 33. Vista del cruce de la Av. Gullman con Av. Sánchez Cerro	78
Figura 34. Cruce de la Av. Gullman con la Av. Sánchez Cerro.....	78
Figura 35. Presencia de oquedades y sardineles peraltados en la calzada.....	79
Figura 36. Cruce de la Av. Sánchez Cerro con Av. Vice.....	79
Figura 37. Berma lateral de la Av. Sánchez Cerro antes de la Av. Vice.....	80
Figura 38. Pesos y medidas máximas permitidas, adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2016.	82
Figura 39. Gráfico del método de las diferencias acumuladas para el tramo II	90
Figura 40. Determinación del coeficiente de balasto para el tramo IIa.....	91
Figura 41. Determinación del coeficiente de balasto para el tramo IIb.....	92
Figura 42. Determinación del espesor de la losa por el método AASHTO para el tramo IIa (izquierda) y IIb (derecha) utilizando el software de diseño WinPas.....	93
Figura 43. Determinación del espesor de la losa por el método de la PCA para el tramo IIa, utilizando el software de diseño PCA-Cálculo.....	94
Figura 44. Determinación del espesor de la losa por el método de la PCA para el tramo IIb, utilizando el software de diseño PCA-Cálculo.....	94
Figura 45. Valores de diseño para la determinación del espesor de la losa reforzada con fibras, utilizando el software de diseño PAVE 2008.....	96
Figura 45. Verificación de la resistencia a la flexión y al punzonamiento de la losa con los valores previamente establecidos, utilizando el software de diseño PAVE 2008.....	96

1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

Es de conocimiento que la infraestructura vial tiene un rol muy importante como agente dinamizador del crecimiento económico de un país a través del desarrollo de los mercados locales y su integración espacial con los centros económicos (Vásquez & Bendezú, 2008).

En el Perú, se ha reconocido la existencia de un déficit de infraestructura vial (ferrocarriles, carreteras, aeropuertos y puertos) a un valor ascendente a US\$ 57,499 millones para el periodo 2016-2025, siendo el sector¹ con una de las brechas más importantes (Instituto Peruano de Economía (IPE), 2017). En el Perú, los caminos están agrupados en: la Red Vial Nacional, a cargo del gobierno central por medio del MTC-Provias Nacional; la Red Vial Departamental, a cargo de los gobiernos regionales; y, la Red Vial Vecinal, a cargo de los gobiernos locales (Decreto Supremo 036-2011-MTC).

Entre el 2001 y el 2015, el porcentaje de vías pavimentadas de la red vial nacional mejoró de 51% a 70%; sin embargo, el estado de las vías de la Red Vial Departamental y la Vecinal es muy pobre, con 86% y 92% de las vías aún no pavimentadas, respectivamente (Instituto Peruano de Economía (IPE), 2017).

En ese sentido, se contempla el diseño del pavimento rígido del proyecto de rehabilitación de la Av. Sánchez Cerro en la ciudad de Piura, la cual tiene como finalidad mejorar la calidad del servicio manteniendo los niveles de la vía existentes. Este mejoramiento será realizado tomando como referencia dos metodologías de diseño convencionales, así como el diseño de la losa reforzada con fibras con la finalidad de realizar un análisis comparativo del espesor y seleccionar la alternativa más adecuada para el proyecto.

Adicionalmente, nuestra investigación contempla la reutilización del pavimento existente mediante el reciclado mecánico de parte de su estructura original, el cual será parte constituyente del nuevo pavimento como una base negra o base reciclada para la transmisión de las cargas.

¹ En comparación con los sectores estratégicos de Vivienda, Educación, Salud, Agricultura e Interior.

1.2 Problema de investigación

1.2.1 Planteamiento del problema

El departamento de Piura fue una de las áreas más afectadas por las inundaciones producidas por el fenómeno de “El Niño Costero” con 430 943 personas impactadas (Venkateswaran, MacClune, & Enríquez, 2017). El impacto producido por este fenómeno en carreteras, puentes y caminos rurales se ha estimado en US\$ 1,543 millones, lo cual ascendería a casi 1% del PBI (Instituto Peruano de Economía (IPE), 2017).

Los últimos eventos de este fenómeno ocurrieron en 1982-1983 y 1997-1998, siendo el primero similar o hasta más grave que el segundo; con pérdidas en vidas humanas, personas afectadas y viviendas destruidas (Venkateswaran, MacClune, & Enríquez, 2017).

La falta de preparación y comunicación ante este fenómeno ocasionó que los habitantes sufrieran inundaciones periódicas con las lluvias intensas de febrero a marzo, cuando las lluvias se combinaron con un aumento de los caudales del río (Venkateswaran, MacClune, & Enríquez, 2017) generando un gran impacto en la infraestructura vial. De hecho, se estima que los daños en infraestructura de transporte en el 2017 fueron de 4931 km de vías, un 57.24% más con respecto al fenómeno de 1997-1998 (Venkateswaran, MacClune, & Enríquez, 2017).

Tal como señala Fernández (2015), “no ha existido un programa de mantenimiento rutinario en la red vial urbana, con una significativa falta de mejora o mantenimiento de los pavimentos existentes”. Esto se traduce en el lamentable estado de las principales calles de la ciudad, como las avenidas Don Bosco, Grau, Sánchez Cerro, Cáceres y Vice, que presentan “huecos” (Fernández, 2015).

En el tramo en estudio, se observa la presencia de abultamientos, hundimientos, grietas, fisuras, desprendimiento de agregados, entre otros daños posiblemente embebidos en el núcleo del pavimento existente, constituyendo fallas estructurales que indican la incapacidad del pavimento actual para resistir las cargas provenientes de los vehículos. Estos daños, posiblemente ocasionados por la falta de mantenimiento, dificultan un tránsito adecuado de los vehículos de carga ligera y pesada que circulan a lo largo de la avenida.

1.2.2 Justificación del problema

La avenida Sánchez Cerro está clasificada dentro de la red vial departamental como una vía de alto tránsito que en condiciones de operación normal se considera como una vía urbana; sin embargo, esta representa una de las principales vías de conexión entre la zona norte y sur del país, formando parte de la prolongación de la Panamericana Norte en la región Piura.

En la actualidad, esta vía está compuesta por una vía principal y una auxiliar por sentido. La vía principal presenta un 90% de desgaste superficial del pavimento, mientras que las vías auxiliares están constituidas en un 40% como trocha y lo restante se encuentra en mal estado en un 40% a nivel de base y en un 20% a nivel de desgaste superficial.

La rehabilitación de la avenida Sánchez Cerro permitirá aliviar el tráfico ocasionado por el aumento del tránsito de automóviles, buses interprovinciales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y el transporte de carga pesada que ha evolucionado con el paso del tiempo, mejorando la calidad global del servicio de transporte interprovincial y nacional.

Figura 1. Evolución del tráfico de pasajeros en el transporte hacia el departamento de Piura: 2007 – 2016 (miles de pasajeros).

Adaptado de “Piura, Compendio Estadístico 2017”, por INEI, 2017.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar el diseño del pavimento rígido en el Tramo II del proyecto de rehabilitación de la Av. Sánchez Cerro. Para el diseño del pavimento se ha considerado los métodos AASHTO 1993, PCA 1984 y la *Yield Line Theory* (basado en el *Technical Report N° 34 – 4th edition*) para losas reforzadas con fibras, las cuales cumplen con los requerimientos de la normativa nacional vigente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Obtener parámetros cuantitativos del estado de deterioro del pavimento a nivel superficial, mediante un reconocimiento visual del pavimento existente.
- Realizar el diseño de la base reciclada mecánicamente haciendo un análisis de la influencia del porcentaje de material granular en la mezcla.
- Comparar el espesor de la losa de acuerdo con la metodología de diseño aplicada y, seleccionar la alternativa que permita mantener los niveles de la vía existentes.

1.4 Metodología de investigación

La metodología aplicada corresponde a un enfoque cuantitativo correlacional debido a la estrecha interrelación que existe entre las variables analizadas en la presente investigación para el análisis de los resultados.

Estas variables se han agrupado en variables dependientes e independientes debido a su naturaleza u origen. Estas, tienen una estructura causal más compleja que radica en su estrecha interrelación para la obtención de los resultados, así como de la metodología aplicada. En la siguiente figura se presenta lo explicado anteriormente para aclaración de las ideas expuestas.

Figura 2. Estructura causal compleja multivariable de la investigación

Elaboración propia.

Su análisis, ha requerido una recolección de datos previa que ha conllevado a dividir esta investigación en tres etapas fundamentales para su desarrollo. La primera relacionada a la revisión y estructuración de la bibliografía existente; la segunda, relacionada a la recolección y análisis de los datos de campo (desarrollados mediante inspección visual, recolección de muestras y ensayos en laboratorio) y; por último, del análisis de la información obtenida y diseño del esosor de la base reciclada, así como del esosor de la losa del pavimento rígido por las metodologías descritas previamente.

El proyecto de rehabilitación de la Av. Sanchez Cerro, en su tramo II, corresponde al tramo comprendido entre el Óvalo Cáceres y la Av. Gullman en la ciudad de Piura, con una extensión aproximada de 1.80 km. Este tramo es parte integral del proyecto “Mejoramiento de la Av. Sánchez Cerro tramo, Av. Gullman – Av. Chulucanas – Distrito de Piura, Provincia de Piura – Piura”.

1.4.1 La hipótesis

Las hipótesis planteadas en la investigación obedecen a un orden de tipo causal, la cuales afirman una interrelación entre las variables planteadas. Estas son:

Tabla 1

Hipótesis de la investigación

Hipótesis	Indicador	Forma de medición
La variación/aumento del espesor de material granular, del pavimento existente, mejora el desempeño global de la base reciclada (RAP)	CBR de material combinado	Porcentaje (%)
El diseño del pavimento por los métodos convencionales es la solución óptima cuando se tiene una restricción de niveles en la vía.	Espesor de la losa de concreto	Metros (m)
El uso de fibras de refuerzo es la solución óptima cuando se tiene una restricción de niveles en la vía.	Espesor de la losa de concreto	Metros (m)

Elaboración propia

1.5 Indicadores de logro

Los indicadores de logro corresponden a las medidas que nos permiten verificar el cumplimiento del desarrollo de nuestros objetivos a través del análisis y procesamiento de la información recopilada. Estos son:

Tabla 2

Indicadores de logro de la investigación

Objetivos Específicos	Indicador de logro
Obtener parámetros cuantitativos del estado de deterioro del pavimento a nivel superficial, mediante un reconocimiento visual del pavimento existente.	Mapeo de los daños encontrados en la vía y determinación de las alternativas a emplear para su solución.
Realizar el diseño de la base reciclada mecánicamente haciendo un análisis de la influencia del porcentaje de material granular en la mezcla.	Determinación del espesor óptimo de la base reciclada y análisis de la influencia del material granular en el desempeño del RAP.
Comparar el espesor de la losa de acuerdo con la metodología de diseño aplicada y, seleccionar la alternativa que permita mantener los niveles de la vía existentes.	Determinación del espesor de la losa de concreto óptima que se adecue a los niveles de la vía existentes.

Elaboración propia

2 MARCO TEÓRICO FUNDAMENTAL

2.1 Pavimento

El pavimento está constituido por “...una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2013, p. 21). La estructura del pavimento está conformada por tres capas: la superficie de rodadura, base y sub base, las mismas que se colocan sobre una sub rasante perfilada y compactada adecuadamente de acuerdo a la normatividad vigente

La subbase “es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador del agua... Esta capa puede ser de material granular o tratada con asfalto, cal o cemento” (MTC, 2013, pp. 23-24). El CBR mínimo para una altura inferior a los 3000 msnm es de 40% min según tabla N° 402-02 del Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013.

La base “es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa² será de material granular drenante ($\text{CBR} \geq 80\%$) o será tratada...” (MTC, 2013, pp. 23-24).

Por último, la capa de rodadura “es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito” (MTC, 2013, pp. 23-24).

² **NOTA:** El CBR mínimo para un tráfico en ejes equivalentes ($<1'000,000$) es 80%, y cuando el tráfico en ejes equivalentes ($>1'000,000$) es 100%, ambos referidos al 100% de la Máxima Densidad seca y una penetración de Carga de 0.1” (2.5mm) según Tabla 403-02 del Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013

2.1.1 Clasificación de los pavimentos

Diversos autores hacen referencia a tres tipos de pavimentos, de acuerdo a la superficie de rodadura y la forma en la que transmiten los esfuerzos y deformaciones a las capas inferiores.

El pavimento flexible, por ejemplo, “se caracteriza... porque transmiten a la subrasante las cargas que reciben solo en las zonas próximas a la aplicación de la carga. La carga de diseño es puntual y las diferentes capas tienen un buen comportamiento resistente al esfuerzo cortante” (Cespedes, 2002, p. 37).

Figura 3. Estructura típica y distribución de cargas en una sección de pavimento flexible

Elaboración propia.

Por otro lado, el pavimento semirrígido “... es una estructura de pavimento compuesta básicamente por capas asfálticas con un espesor total bituminoso...; también se considera como pavimento semirrígido la estructura compuesta... sobre base tratada... [así como] se ha incluido los pavimentos adoquinados” (MTC, 2015, p. 22).

Figura 4. Estructura típica de un pavimento semirrígido de tipo adoquinado

Elaboración propia.

Por último, los pavimentos rígidos “reciben el apelativo... debido a la naturaleza de la losa que lo constituye... [esta] absorbe casi la totalidad de los esfuerzos producidos por las repeticiones de las cargas de tránsito, proyectando en menor intensidad los esfuerzos a las capas inferiores...” (MTC, 2015, p. 261).

Figura 5. Estructura típica y distribución de cargas en una sección de pavimento rígido

Elaboración propia.

2.1.2 Ventajas y desventajas de los tipos de pavimentos

Investigaciones realizadas por diversos autores consideran que los factores que influyen en la elección de un tipo de pavimento son variables según las características de cada proyecto; sin embargo, recalcan la importancia de los costos asociados en el tiempo, tanto el costo inicial como el de mantenimiento.

Tabla 3

Ventajas y desventajas de los tipos de pavimentos

Concepto	Rígido	Flexible
Costo Inicial	+	-
Costo de mantenimiento	-	+
Facilidad en la construcción	+	-
Resistencia al ataque por sulfatos	-	+
Resistencia a los combustibles	+	-
Requerimiento de espesores	-	+
Reflexión de la luz	+	-

Adaptado de “Diseño y Construcción de Pavimentos. Programa de Actualización 1994-1995”, por Vivar, 1995.

2.1.2.1 Pavimento rígido

El Instituto Bolivariano del Cemento y Hormigón³ (IBCH, 2015) menciona que las principales ventajas de este tipo de pavimento son los costos globales inferiores debido a una vida útil mayor, en comparación con otros; de igual manera, su resistencia y durabilidad es mayor ya que soporta hasta tres veces su carga máxima, las variaciones de temperatura, derrames, entre otros. Este tipo de pavimentos es uno de los pocos que no tiene sustitutos para la construcción de pistas de aterrizaje en aeropuerto. En la siguiente tabla, otro autor hace una breve comparación entre las ventajas y desventajas de este pavimento.

Tabla 4

Ventajas y desventajas del pavimento rígido

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Como superficie de rodamiento presenta buenas condiciones.• Brinda una rasante uniforme con una sensación de seguridad que produce el valor alto del coeficiente de rozamiento.• Es un pavimento sin las ondulaciones que, a veces, se producen en los pavimentos flexibles.• Absorbe menos luz que el pavimento flexible y la difunde mejor; por ello, es más luminoso de noche, y cuando está húmedo no produce los efectos espejo.• El costo de conservación es pequeño.• Su valor de recuperación es alto, porque, cuando falla o resulta inadecuado, puede servir como capa de base a una superficie de rodadura de tipo bituminoso.• Tiene larga vida, se ha demostrado que por lo menos puede fijarse en 30 años, habiendo muchos casos en los que se ha sobrepasado esta cifra.	<ul style="list-style-type: none">• Un pequeño defecto de diseño, o de construcción, produce la aparición de fisuras; este defecto es, en cierta medida, independiente del tráfico; la retracción del fraguado y efectos térmicos son causas fundamentales y, una vez producidas, pueden originar la destrucción del pavimento.• Su elevado costo inicial limita su uso en vías de tránsito con volúmenes muy altos o de grandes pesos, en zonas urbanas y en aeropuertos, donde el mayor costo se justifica o puede ser fácilmente recuperable.• El inconveniente técnico más significativo, radica en la necesidad de dotarlos de juntas, las cuales es preciso mantenerlas.• Es necesario cerrar el acceso al tráfico durante la construcción y también durante el tiempo de fraguado; lo mismo ocurre con la reparación de averías y calas.

Nota: Se ha actualizado y realizado un resumen de la tabla que aparecía en la fuente original. Adaptado de “Los Pavimentos en las Vías Terrestres: Calles, Carreteras y Aeropistas”, por Céspedes, 2002.

³ Entiéndase como hormigón (en Bolivia) como la mezcla de cemento, agua, piedra y arena, es decir, concreto.

2.1.2.2 Pavimento flexible

Tienen como principal ventaja un menor costo inicial de ejecución y las facilidades de rehabilitación, como el reciclado del pavimento. Aunque el costo asociado por mantenimiento es considerable, el costo de oportunidad por la intervención es mayor.

Tabla 5

Ventajas y desventajas del pavimento flexible

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Bajo costo, puede lograrse mano de obra local, así como materiales o equipos de la zona.• Fácil construcción y reparación de deterioros.• Bajo costo inicial, excepto en los tipos superiores.• Resistente a la formación de capas de hielo.• No tiene uniones.• Tiene condiciones que permiten su rehabilitación y reconstrucción.• Puede someterse inmediatamente al tráfico	<ul style="list-style-type: none">• Un mal drenaje permite al agua disminuir la capacidad portante de las capas y por lo tanto la destrucción del pavimento.• La construcción debe hacerse en épocas que no llueve para no malograr la compactación de sus capas.• En aeropuertos para grandes aviones su uso no es recomendable por ser afectado por las altas temperaturas de las turbinas y por la presencia de aceites y combustibles que caen al pavimento.

Nota: Se ha actualizado y realizado un resumen de la tabla que aparecía en la fuente original. Adaptado de “Los Pavimentos en las Vías Terrestres: Calles, Carreteras y Aeropistas”, por Céspedes, 2002.

2.2 Fibras en el concreto

Las fibras son pequeños filamentos delgados y discontinuos que, al ser incorporados al concreto, forman una micro-armadura; por otro lado, tienen como la función principal la de inhibir el surgimiento de fisuras por retracción y conferir al concreto de mayor ductilidad (Maccaferri América Latina, 2007, p. 3).

El ACI 544.1R (2002) hace referencia al comportamiento del concreto normal, en el cual se usa el acero como refuerzo para resolver sus deficiencias estructurales; sin embargo, las fibras al ser discontinuas, se distribuyen al azar en toda la matriz de concreto (p. 3).

2.2.1 Tipos de fibras

En el mercado actual, existen diversos tipos de fibras que son clasificadas de acuerdo a su materia prima, pudiendo estas ser metálicas, naturales o sintéticas. Aunque el ACI 544.1R (2002) hace referencia a una clasificación básica de fibras de acero, vidrio, sintéticas y naturales, en la siguiente figura se muestra un análisis más complejo de la clasificación.

Figura 6. Clasificación de las fibras según BISFA⁴, por Maccaferri, 2007.

Completando la información de la Figura 6, Sotil y Zegarra (2017) indican que la clasificación puede complementarse de acuerdo a las propiedades que las fibras otorgan al concreto en estado fresco o endurecido, brindando un aporte estructural o no a los elementos. Las fibras estructurales son capaces de mejorar la resistencia a la rotura y a la fisuración, sustituyendo parcial o completamente a los sistemas convencionales de armaduras de acero, mientras que las fibras no estructurales controlan la fisuración por retracción, así como su resistencia al fuego, abrasión y, en algunos casos, al impacto.

De igual manera, estas fibras cuentan con distintas propiedades que radican principalmente en la variación de la resistencia a la tracción y del alargamiento en la rotura. En la siguiente tabla se muestran algunas características de las fibras más comunes en el mercado.

⁴ BISFA: The International Bureau for the Standardisation of Man-Made Fibres

Tabla 6

Características mecánicas de las fibras

Fibras	Diámetro (μm)	Densidad (10 kg/mn²)	Módulo elástico (kN/mn²)	Resistencia a tracción (kN/mn²)	Elongación a ruptura (%)
Acero	5 - 500	7.84	200	0.5 - 2	0.5 - 3.5
Vidrio	9 - 15	2.60	70 - 80	2 - 4	2 - 3.5
Amianto	0.02 - 0.04	3.00	180	3.30	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0.90	5 - 7	0.50 - 0.75	8
Nylon	-	1.10	4	0.90	13 - 15
Polietileno	-	0.95	0.30	0.0007	10
Carbono	9	1.90	230	2.60	1
Kevlar	10	1.45	65 - 133	3.60	2.1 - 4
Acrílico	18	1.18	14 - 19.5	0.4 - 1	3

Nota: Se ha organizado la información que aparecía en la fuente original para un mayor entendimiento. Adaptado de “Manual Técnico: Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón”, por Maccaferri, 2007.

2.2.1.1 Fibras naturales

El ACI 544.1R (2002) reconoce dos grupos de fibras, la que son procesadas y las que no. Las fibras no procesadas han demostrado que pueden ser utilizadas satisfactoriamente al fabricar finas láminas de cemento para muros y techos, así como para edificaciones, aunque se han encontrado deficiencias en la durabilidad, principalmente por la reacción entre la pasta de cemento y las fibras, en donde las fibras se expanden debido a la presencia de humedad. Estas fibras pueden ser de coco, de bambú, de sisal⁵, entre otras.

Por otro lado, el ACI 544.1R (2002) también indica que las fibras procesadas también se han usado para fabricar láminas de cemento, aunque como complemento del asbesto, siendo la pulpa de madera una de las primeras en reemplazar este material debido a que la industria de fibrocemento Noruega no era capaz de obtener el suministro usual de asbesto por las consecuencias de la primera guerra mundial. Este tipo de fibras se han utilizado para algunos productos de cemento reforzado tales como tejas, revestimientos, tuberías de techo, entre otros (ACI 544.1R, 2002).

Algunas propiedades para las fibras mencionadas anteriormente se muestran en la Tabla 7.

⁵ Es un tipo de planta también conocida como agave sisalana, originaria de Yucatán, México.

Tabla 7

Propiedades típicas de las fibras naturales

Tipo de fibra	Longitud (pulg)	Diámetro (pulg)	Gravedad Específica	Módulo de Elasticidad (ksi)	Resistencia a la tracción (psi)
Coco	2 - 4	0.004 – 0.016	1.12-1.15	2750-3770	17,400-29,000
Sisal	N/A	N/A	N/A	1880-3770	40,000-82,400
Bambú	N/A	0.002-0.016	1.5	4780-5800	50,750-72,500
Fibra de madera (pulpa kraft)	0.1 – 0.2	0.001-0.003	1.5	N/A	101,500

Nota: Se ha organizado y traducido parte de la información que aparecía en la fuente original para un mayor entendimiento. Adaptado de “ACI 544.1R *Report on fiber reinforced concrete*”, por ACI 544.1R, 2002.

2.2.1.2 Fibras artificiales orgánicas

El ACI 544.1R (2002) considera este tipo de fibras como sintéticas, aunque se ha respetado la clasificación de la asociación The International Bureau for Standardisation of Man-made Fibre (BISFA) por ser una fuente más reciente. Este tipo de fibras ha demostrado una alta ductilidad al tiempo en que conservan la integridad del elemento. La BISFA reconoce que pueden ser fabricadas a partir de polímeros naturales o sintéticos, siendo algunas de las fibras más comunes las siguientes:

Fibra orgánica	Descripción
Polipropileno	Fibras compuestas por macromoléculas lineales que poseen en su cadena entre 50 a 80% en peso de acrilonitrilo.
Vinilo	Fibras compuestas por macromoléculas polivinil alcohol con diferentes niveles de acetato.
Modacrylic	Fibras compuestas por macromoléculas lineales que poseen en su cadena entre 50 a 80% en peso de acrilonitrilo
Poliamida o Nylon	Fibras compuestas por macromoléculas lineales que poseen en su cadena elementos ligantes de almidón en serie, de los cuales al menos 85% son ligados a una unidad de cicloalifático.
Aramida	Fibras compuestas por macromoléculas lineales graduadas por un grupo aromático de elementos ligantes de almidón o amida, unidos directamente a dos anillos aromáticos, donde el número de ligantes de amida, si presente, no sea excedente al número de ligantes de almidón.

Nota: Se ha organizado y traducido parte de la información que aparecía en la fuente original para un mayor entendimiento. Adaptado de “ACI 544.1R *Report on fiber reinforced concrete*”, por ACI 544.1R, 2002.

2.2.1.3 Fibras metálicas

El ACI 544.1R (2002) define a estas fibras por su relación de aspecto (relación de longitud a diámetro) de aproximadamente 20 a 100, con cualquiera de las secciones transversales de un mismo elemento, y que son lo suficientemente pequeñas como para dispersarse homogéneamente en una mezcla de concreto en estado fresco y usando los procedimientos de mezcla habituales siendo el compuesto principal el acero al carbono o acero inoxidable.

En cambio, la ASTM 820 clasifica estas fibras de acuerdo al producto utilizado en su fabricación en a) Tipo I: Fibras de alambre de acero conformadas en frío, b) Tipo II: Fibras de acero cortadas en hojas, c) Tipo III: Fibras extraídas por fusión y d) Tipo IV: Otras fibras.

Por último, la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE) clasifica estas fibras de acuerdo a su sección transversal en a) cuadrada, b) circular y c) creciente.

Por otro lado, los volúmenes de fibra utilizados en el concreto varían normalmente del 0.25% al 2% del peso total del concreto. Utilizar mayores cantidades compromete la trabajabilidad y la dispersión de las fibras (Kosmatka, 2015).

De igual manera, es importante reconocer que el concreto reforzado con fibras de acero se usa ampliamente como método de estabilización y revestimiento de taludes, así como en elementos prefabricados donde es necesario un aumento de la resistencia al impacto o a la tenacidad. De igual manera, el concreto reforzado con fibras de acero en estructuras sometidas al agua en alta velocidad han mostrado que pueden durar hasta tres veces más que las alternativas en concreto convencionales.

2.2.2 Ventajas del uso de fibras

De acuerdo con la *Portland Cement Association* (PCA) (2011) la utilización de fibras en el concreto puede ayudar a disminuir fisuración, aumentando la durabilidad de las estructuras. Es conveniente que se determinen la dosificación y tipo de fibras a utilizar, dependiendo de las normas que las estipulan, para que de este modo se logre proporcionar la funcionalidad del material en los diferentes espacios y a su vez se garantice un adecuado desempeño de la estructura.

Cárdenas (2014), brinda algunas ventajas relacionadas al uso de las fibras en general:

- a) Alta resistencia a la corrosión y a la tensión.
- b) Adaptable a cualquier tipo de proyecto, marinas, geotecnia, túneles o taludes.
- c) Las fibras de acero ayudan a controlar la aparición de las fisuras en el concreto ya que las fibras forman un puente entre los agregados grueso y evita la aparición de la fractura.
- d) Aumenta la capacidad portante mejorando la resistencia a la tracción, flexión y corte.
- e) Mejoran la capacidad de resistencia localizada.
- f) Convierten al concreto en un material capaz de transmitir la carga e impactos de forma homogénea en todas las direcciones en cualquier punto.
- g) Mejoran el comportamiento de la estructura bajo cargas sísmicas al añadir las fibras a una estructura de armado tradicional.

2.3 Reciclado de pavimentos asfálticos

El reciclado de pavimentos consiste en la reutilización del material proveniente del pavimento existente, generalmente luego de un tratamiento, como parte de la construcción de un refuerzo o de alguna capa nueva para la vía o carretera (Vivar, 1995). Esta técnica tiene como ventaja principal el ahorro de costos en materias primas, transporte, recursos energéticos y económicos, así como la preservación del medio ambiente por el cambio realizado en el proceso constructivo.

2.3.1 Tipos de reciclado asfáltico

Las técnicas de reciclado de pavimentos pueden ser clasificadas según la tecnología usada, el trabajo (en tipo y magnitud), así como la ubicación de la obra y, la habilidad y grado de sofisticación de los contratistas (Vivar, 1995). De acuerdo con lo anterior, el autor señala que los tipos de reciclado son: reciclado en frío, reciclado en caliente, en reciclado in-situ a pequeña escala y reciclado in-situ a gran escala.

La segunda clasificación la brinda Montejo (2002), quien hace referencia a que el reciclado de pavimentos asfálticos debe ser según el proceso constructivo que se realiza, es decir, que deben ser agrupado en: reciclado superficial, reciclado in-situ y reciclado en planta.

Aunque, en realidad, una clasificación más conveniente del reciclado de pavimentos asfálticos debiera estar acorde con la técnica utilizada, ya que ambas pueden ser ejecutadas en planta o in-situ; y, el proceso constructivo variara según el tipo de rehabilitación que se requiera brindar al pavimento existente (superficial, parcial o total).

En general, podemos agrupar las técnicas de reciclado de la siguiente manera:

- a) En función del lugar donde se lleva a cabo la mezcla:
 - Reciclado “in situ”
 - Reciclado “en planta”
- b) En función de la temperatura de elaboración y colocación de la mezcla
 - Reciclado en frío
 - Reciclado en caliente
- c) En función del ligante añadido:
 - Con cemento o betún asfáltico
 - Con emulsiones asfálticas
 - Con aglomerante hidráulico como el cemento Pórtland.

En línea a lo anterior, cada proceso de reciclado está formado por la combinación de las tecnologías mencionadas anteriormente, tal como se describe a continuación.

2.3.1.1 Según la técnica utilizada

El reciclado de asfalto en frío “consiste en la recuperación de un pavimento asfáltico existente (RAP, *Reclaimed Asphalt Pavement*), el mezclado del pavimento asfáltico recuperado con asfalto, agregado nuevo (si es necesario) y aditivos (si es necesario)” (Thenoux & García, 1999, p. 5)

Por su parte, según la FHWA-SA-98-042 (Estados Unidos) (1997), el reciclado de asfalto en caliente es el proceso mediante el cual el RAP se combina con materiales vírgenes, a veces junto con un agente de reciclaje para producir la mezcla y, normalmente, usando entre el 10% y 30% del RAP. “... éste método no es susceptible a los cambios de clima como... [el] reciclado en frío y la calidad puede ser... mejor controlada” (Vivar, 1995, p. 240).

En ambos casos, el proceso puede ser llevado in-situ o en planta mediante diversos equipos que llevan anexos una máquina fresadora o equipo escarificador que permita la remoción del pavimento a diversas profundidades.

2.3.1.2 Según el proceso constructivo

En primer lugar, se encuentra el reciclado superficial, el cual consiste en el tratamiento de la capa superficial del pavimento, por lo general, de espesores menores a 2.5 centímetros en los que el pavimento no tenga fallas atribuibles a deficiencias estructurales; de igual manera, el proceso puede realizarse en caliente o en frío, con la incorporación o no, de agentes de reciclaje o porcentajes menores de materiales vírgenes (Montejo, 2002, p. 591).

En segundo lugar, está el reciclado in-situ (o parcial), que puede rehabilitar el pavimento a una profundidad mayor a 2.5 centímetros, incorporando el material de la base; normalmente, se escarifica el material y se mezcla con un agente de reciclaje y agregado nuevo para cumplir con las exigencias de la nueva mezcla; además, los aditivos más utilizados son las emulsiones asfálticas, cementos, cal y cenizas volantes (Montejo, 2002, p. 591).

Por último, se encuentra la técnica de reciclado en planta, ya que el proceso consiste en escarificar el material in situ y llevarlo triturado a una planta en la que se realiza la mezcla, incorporando agentes de reciclaje y material pétreo virgen, así como asfalto nuevo (Montejo, 2002, p. 591).

2.3.2 Ventajas del reciclado de pavimentos

En su libro, Bellia (2002) nos dice que “reciclar pavimentos asfálticos, a diferencia de otros materiales, resulta siempre en menores costos, se usan menos materias primas y, al eliminarse los transportes a botaderos, se ahorra en combustible y tiempo” (p. 85).

Algunas ventajas de esta técnica son brindadas de acuerdo con la clasificación anterior.

2.3.2.1 Según la técnica utilizada

Las principales ventajas de la técnica de reciclado en frío consisten en la reducción del impacto ambiental (reducción de materias primas, escombros y contaminación), ahorro de energía por concepto de transporte, corrección/eliminación de deformaciones superficiales, destrucción de patrones de agrietamiento de los pavimentos en servicio, no perturbación de la subrasante, continuidad de la rasante, corrección de la resistencia al deslizamiento, entre otros (Thenoux & García, 1999, pp. 5-6).

2.3.2.2 Según el proceso constructivo

Bellia (2002) señala que el “reciclar pavimentos asfálticos, a diferencia de otros materiales, resulta siempre en menores costos, se usan menos materias primas y, al eliminarse los transportes a botaderos, se ahorra en combustible y tiempo” (p. 85). Asimismo, la siguiente tabla muestra un comparativo de las ventajas que representa el reciclado de pavimentos según la técnica elegida.

Tabla 8

Principales ventajas de las técnicas de reciclado según proceso constructivo

Técnica de reciclado	Ventajas
Reciclado superficial	<ul style="list-style-type: none">• Mejora la resistencia al deslizamiento• Corrige las deficiencias de origen superficial• Mejora el perfil geométrico de la calzada• Permite eliminar la capa de restitución de gálibo en refuerzos
Reciclado in-situ o parcial	<ul style="list-style-type: none">• Mejora la resistencia al deslizamiento y el perfil geométrico• Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural• Permite incrementar en forma limitada la resistencia estructural• Elimina temporalmente las fisuras reflejas• Permite corregir las características de las mezclas asfálticas• Permite corregir el desempeño del RAP superficial (6 a 7 cm) con deformaciones plásticas.
Reciclado en planta	<ul style="list-style-type: none">• Refuerza estructuralmente al pavimento de acuerdo con las necesidades del proyecto.• Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural• Produce mezclas asfálticas de mejor calidad• Permite eliminar o corregir las capas intermedias de deficiente comportamiento• Elimina las fisuras reflejas• Mejora la resistencia al deslizamiento• Corrige el perfil geométrico de la calzada

Adaptado de “Ingeniería de pavimentos para carreteras”, por Montejo, 2002.

3 MARCO TEÓRICO ESPECÍFICO

3.1 Pavimento rígido

Es una estructura compuesta por una capa de subbase y una losa de concreto apoyada sobre el suelo natural conocido como subrasante. Inicialmente, la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993) señaló que:

Los pavimentos rígidos generalmente consisten en un lecho preparado debajo de una capa de subbase y una losa de pavimento. La base puede estar estabilizada o no. En los casos de diseño de carretera de bajo volumen donde el tráfico de camiones es bajo, puede que no sea necesaria una capa de subbase entre la plataforma preparada y la losa del pavimento. (p. 21)

3.1.1 Tipos de pavimento rígido

Existen distintos tipos de pavimentos rígidos que se clasifican según su aplicación y la función que ejerce el acero de refuerzo en el comportamiento ante las cargas, en cualquiera de ellos, “el concreto asume y resiste las tensiones producidas por el tránsito y las variaciones de temperatura” (García, 2016).

El primer tipo es el pavimento de concreto hidráulico simple. Estos pueden contar con elementos de transferencia de cargas, que son los dowells, con la finalidad de evitar el escalonamiento. Cuando no se cuentan con estos elementos de transferencia de cargas, su aplicación es para tráfico ligero y apoyado directamente sobre la subrasante (García, 2016, p. 7)

Figura 7. Pavimento de concreto hidráulico simple, por Vásquez, 2017

El segundo tipo es el pavimento de concreto hidráulico con refuerzo continuo (CRCP), que “contiene refuerzo de acero longitudinal continuo sin juntas transversales, excepto donde se requiera para juntas de cabecera⁶, en aproximaciones de puentes y en transiciones a otras estructuras de pavimento⁷” (Federal Highway Administration [FHWA], 2016, p. 2)

Figura 8. Pavimento de concreto hidráulico con refuerzo de acero, por Vásquez, 2017

El tercer tipo es el pavimento de concreto hidráulico pre o post-tensado, siendo su definición la de un concreto pre o post tensado, en el cual se le han introducido esfuerzos internos a la losa [previo al vaciado o posterior a este] con el fin de reducir los esfuerzos potenciales de tracción en el concreto ocasionados por las cargas (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [MVCS], 2009, p. 26). Este tipo de pavimentos es utilizado por lo general en las pistas de aterrizaje de los aeropuertos ya que las cargas transmitidas a las losas son considerables.

El último, es el pavimento de concreto hidráulico reforzado con fibras, que es una mezcla constituida a partir de cemento hidráulico, agregados finos y gruesos, junto con fibras discontinuas de acero (American Concrete Institute [ACI], 1988), en el cual, las fibras pueden proporcionar la capacidad de resistencia a la tracción y compresión posterior a la fisuración, así como el control del ancho de las fisuras en elementos de concreto (American Concrete Institute [ACI], 2018).

⁶ Normalmente hace referencia a las juntas de construcción o dilatación.

⁷ Estas juntas también pueden ser admitidas en la vecindad de alguna obra de arte, comunes en carreteras de gran longitud.

3.1.2 Componentes de un pavimento rígido

Figura 9. Sección típica de un pavimento rígido y flexible, por AASHTO, 1993.

En primer lugar, se encuentra la sub rasante (*subgrade*), la cual es el soporte directo de la estructura del pavimento y está conformado por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo, en estado óptimo, que pueda resistir las cargas de diseño que provienen del tránsito (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2013, p. 23).

Luego, se encuentra ubicada la subbase, la cual, de acuerdo con el MTC (2013) “es una capa de material especificado... [que] soporta a la base y a la carpeta de rodadura. Además, se utiliza como capa de drenaje... esta capa puede ser de material granular ($\text{CBR} \geq 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento” (p. 24).

La base, por otro lado, es “la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante ($\text{CBR} \geq 80\%$) o tratada” (MTC, 2013, p. 24).

Por último, la capa de rodadura (*surface course / pavement slab*) es “la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito” (MTC, 2013, p. 24).

De igual manera, existen elementos o técnicas necesarias para el buen comportamiento del pavimento, entre ellos se encuentran las juntas y mecanismos de transferencia de cargas.

Por ejemplo, las juntas se clasifican en juntas longitudinales y juntas transversales, ambas tienen como función la de controlar el agrietamiento del pavimento y permitir el movimiento y alabeo de las losas de concreto, así como la transmisión de las cargas mediante los *dowels* (MTC, 2013, p. 282). Las juntas longitudinales son las que delimitan los carriles que serán por donde transitarán los vehículos, mientras que las juntas transversales están dispuestas en sentido perpendicular a las anteriores (MTC, 2013, p. 282).

En cuanto a las juntas, es válido mencionar que existen distintos tipos, entre ellas se encuentran las de contracción, las de dilatación y las de construcción. El MTC (2013) explica con mayor detalle sus características.

Por otro lado, entre los mecanismos de transferencia de carga se encuentran los pasadores o *dowells*, que “son barras de acero lisas (cuyo diámetro aproximado es 1/8 del espesor de la losa), insertadas en la mitad de las juntas con el propósito de transferir cargas sin restringir el movimiento y permitiendo el alineamiento horizontal y vertical” (MTC, 2013, p. 285).

Entre estos mecanismos se considera la trabazón de agregados, el cual es “el engranaje mecánico que existe entre los agregados de ambas caras de las losas adyacentes... cuando el tamaño [de los agregados] es menor de 25 mm proveen una resistencia marginal” (MTC, 2013, p. 285).

3.2 Fibras de acero

El tipo de fibras que se utilizarán en la presente investigación son las fabricadas con acero debido a que es recomendado, para uso estructural, que las fibras tengan un módulo de elasticidad mayor a 3 veces el valor del módulo de elasticidad del concreto y, este tipo de fibras, tiene un valor 7 veces mayor.

Las fibras de acero tienen aproximadamente entre 0.5 – 2.5 pulgadas de largo y 0.017 – 0.04 pulgadas de diámetro, la dosis suele ser alta y puede variar entre 0.25% y 2% o entre 20 y 157 kg/m³ (American Concrete Pavement Association [ACPA], 2003).

Existen cinco tipos generales de fibras de acero que son clasificadas según el producto o proceso que se ha utilizado como fuente de su fabricación, los cuales son descritos por la normativa americana y son los siguientes:

- Tipo I – Fibras de alambre de acero conformadas en frío. Este tipo de fibras son especificadas por su diámetro (d) o diámetro equivalente (d_e) y su longitud nominal después de la deformación (l_n) que establece una relación de aspecto nominal (λ_n) está establecida como (l_n / d) o (l_n / d_e) (ASTM A820 / A 820 M, 2006).
- Tipo II – Fibras de acero cortadas en hojas (láminas). Especificadas según su espesor (t), ancho (w) y longitud nominal después de la deformación (l_n), La relación de aspecto nominal (λ_n) puede ser calculada como: $\lambda_n = l / \sqrt{4t \cdot w / \pi}$ (ASTM A820 / A 820 M, 2006).
- Tipo III – Fibras extraídas por fusión. Estas se encuentran especificadas según su diámetro equivalente, (d_e), su longitud (l), o longitud nominal (l_n). El diámetro equivalente es calculado de la longitud nominal promedio medida y la masa (peso) de una conocida cantidad de fibras. La relación de aspecto nominal (λ_n), puede ser calculada de la siguiente como: $\lambda_n = l / d_e = l_n / d_e$ (ASTM A820 / A 820 M, 2006).
- Tipo IV – Fibras cortadas en fábrica. Especificación igual a la del Tipo III (ASTM A820 / A 820 M, 2006).
- Tipo V– Fibras modificadas estiradas en frío. Se especifican por un rango de diámetros equivalentes, (d_{e-r}) y longitud (l), o longitud nominal (l_n). El diámetro equivalente se calcula según lo indicado en el tipo III y IV. Se puede calcular un rango de relaciones nominales de aspecto, (l_{n-r}) de acuerdo a lo siguiente: $\lambda_{n-r} = l / d_{e-r} = l_n / d_{e-r}$ (ASTM A820 / A 820 M, 2006).

Las fibras utilizadas en la presente investigación son las Fibras metálicas clasificadas como Tipo I. Las especificaciones técnicas de estas fibras usadas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9

Especificaciones técnicas de las fibras utilizadas

	Unidad	Valor
Propiedades físicas		
Diámetro	mm	1.00
Longitud	mm	50
Relación de aspecto (L/D)	-	50
Número de fibras por kilogramo	-	3200
Propiedades mecánicas		
Resistencia a la tracción del acero	MPa	> 1100
Deformación a la ruptura	%	< 4
Módulo elástico	MPa	210000

Adaptado de “Technical Data Sheet – Wirand Fibre FF1”, por Maccaferri, 2010.

De acuerdo con Folliard, Sutfin y Turner (2006), se debe tener en consideración las siguientes ventajas de las fibras de acero para entender el comportamiento de la mezcla de concreto, seleccionar los parámetros de diseño y sus factores de corrección:

- Permite que la resistencia de la fibra se desarrolle a lo largo de la longitud de la fibra.
- Aumenta la velocidad de construcción
- Reduce el daño en los bordes y las articulaciones
- Elimina el rebrote del hormigón debido a la corrosión del acero. (p. 24)

3.3 Reciclado de pavimentos asfálticos en frío

El reciclado de pavimentos asfálticos en frío es una técnica que “se define como el procesamiento y tratamiento con material bituminoso y/o aditivos químicos, de un pavimento asfáltico existente, sin aplicación de calor, para producir una capa de pavimento restaurado” (Thenoux & García, 1999, p. 5).

Además, en su artículo, López Chegne (2016) define este procedimiento como:

... una técnica de rehabilitación que consiste en la reutilización de materiales procedentes de las capas que conforman el paquete estructural del pavimento en servicio, que ha perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento (como la cohesión, la textura, deformación de la superficie de rodadura) pero que tienen el potencial de ser reutilizados para conformar nuevas capas... Con la aplicación de la técnica de reciclado se reduce el consumo de ambos recursos y se disminuye la eliminación de estos materiales en los botaderos, evitando el correspondiente impacto ambiental.

3.3.1 Tipos de reciclado de pavimentos asfálticos en frío

Los procesos denominados en frío son aquellos compuestos por actividades que no involucran variaciones drásticas o considerables de temperatura. Esto es, que se consiguen a través de la utilización de equipos e insumos, agentes o aditivos, que se integran para reutilizar el producto asfáltico existente, con el fin de generar un nuevo material que posea unas condiciones mecánicas identificables, manejables y utilizables.

En la actualidad, existen diversas maneras de clasificar el reciclado de pavimentos asfálticos, así como las diferencias en su finalidad como en el proceso constructivo. En la siguiente figura, Thenoux (1999) muestra un resumen de las combinaciones de elementos que pueden dar origen a variadas formas de reciclado.

Figura 10. Clasificación del reciclado de pavimentos, por Thenoux, 1999.

El reciclaje en frío constituye un procedimiento de construcción internacionalmente reconocido desde el punto de vista ecológico, económico y técnico, pues posee, por una parte, características de rapidez en su ejecución debido al avance tecnológico de las máquinas disponibles en la actualidad y, por otro lado, contribuye significativamente en el manejo ambiental al reducir la explotación de canteras fuentes de agregados pétreos.

Además, disminuye el ítem del transporte de materiales y permite conseguir un material nuevo de características muy similares al material original, es decir, aquél que se reutiliza, permitiendo también la reducción de los costos finales del mantenimiento.

Los procedimientos para reciclar el pavimento en frío se diferencian de acuerdo con el sitio en donde se ejecuten las actividades, siendo las características de las combinaciones mencionadas anteriormente, las siguientes:

3.3.1.1 Según el lugar en que se realizan

- a) Reciclado in situ: Todo el procesamiento del material recuperado del pavimento asfáltico es realizado sobre la superficie. En la actualidad, se pueden distinguir dos tipos de procedimiento de reciclado en frío in-situ los cuales son designados como “tren de unidad simple” y “tren de unidades múltiples”. El tren de unidad simple, consiste en una máquina fresadora autopropulsada utilizada sólo para el procesamiento del RAP e incorporación del ligante (aditivo reciclador). En el caso del tren de unidades múltiples, el procesamiento del RAP es completado por un equipo distinto de la máquina fresador (pp. 7-8).
- b) Reciclado en planta: El RAP fresado es transportado hasta la planta donde es acopiado. Al construir los acopios de RAP, se deben seguir procedimientos preestablecidos para optimizar la posterior explotación... Las plantas pueden ser fijas o móviles y normalmente estarán compuestas por una tolva alimentadora de RAP (donde también puede incorporarse agregado virgen), correas transportadoras, sistema de pesaje del material, ... [entre otros] (p. 8).

3.3.1.2 Según la profundidad del reciclado

- a) Fresado superficial: Consiste en el fresado controlado del pavimento para restaurar la superficie hasta un perfil especificado... El pavimento restaurado puede ser usado inmediatamente por el tráfico regular y recarpetado algún tiempo después, o simplemente dejado en esa forma como una superficie texturada. (p. 9)
- b) Reciclado parcial: Este tipo de reciclado es una técnica de rehabilitación de pavimentos asfálticos que reutiliza los materiales del pavimento existente y actúa sólo sobre las capas asfálticas, sin llegar a la base granular. Es típicamente realizado como un medio de eliminar el agrietamiento severo de las capas asfálticas y al mismo tiempo para mejorar la calidad de rodado o serviciabilidad. Normalmente es ejecutado hasta profundidades que varían entre 80 mm y 150 mm (pp. 9-10).

- c) Reciclado profundo: El reciclado profundo o total (en inglés “full depth reclamation”) es una técnica en la cual la totalidad de la carpeta asfáltica y buena parte del espesor de la base son uniformemente chancados y mezclado, resultando una capa de base estabilizada; una mejor estabilización se puede alcanzar con el empleo de aditivos como emulsión / cemento o asfalto espumado. Se utiliza cuando el pavimento ha sufrido daños estructurales que se extienden más allá de la carpeta asfáltica y comprometen la estabilidad de la base. Normalmente la profundidad a la cual se realiza este tipo de reciclado es por sobre los 150 mm (p. 10).

3.3.1.3 Según el aditivo utilizado

En la actualidad existen una serie de aditivos que están siendo utilizados para el reciclado de pavimentos asfálticos. Todos ellos tienen el objetivo común de “ligar” las partículas individuales entre sí para incrementar la resistencia del material y/o hacerlo más resistente al agua. La decisión de que producto usar estará influenciada por los siguientes factores:

- Precio: El costo unitario del aditivo siempre será la principal preocupación.
- Disponibilidad: Ciertos aditivos pueden no estar disponibles en un lugar específico.
- Características del material a reciclar: Algunos aditivos son más efectivos que otros con ciertos tipos de material.
- Políticas del mandante. Algunos tienen políticas rígidas respecto al uso de ciertos aditivos, lo cual normalmente estará influenciado por experiencias anteriores. (p. 10)

Algunas de las características del uso, o no, de aditivos en el RAP son las siguientes:

- a) Sin aditivos: al material recuperado se le da un tratamiento como el que se le da a un agregado virgen. Es el tipo de reciclado más simple, sin embargo, no es usual la utilización del RAP como árido, ya que su empleo da algunos problemas:
- Se consigue una baja compactación inicial.
 - El material puede sufrir deformaciones plásticas a lo largo del tiempo.
 - Se desaprovecha el material bituminoso que contiene el RAP. (p. 10)

- b) Aditivos bituminosos: El material tratado con aditivos bituminosos no sufre el fenómeno de agrietamiento por retracción asociado a aquellos tratados con productos hidráulicos y puede ser abierto al tráfico inmediatamente debido a la resistencia inicial que alcanzan las partículas superficiales... Los ligantes bituminosos producen una capa flexible con muy buena resistencia a la fatiga comparado con aquellas tratadas con productos hidráulicos, permitiendo reducir el espesor de la capa sin sacrificar capacidad estructural. (p. 11)
- c) Aditivos hidráulicos: La principal función de estos aditivos es incrementar la resistencia, la cual es gobernada principalmente por la cantidad de aditivo que es utilizado, pero también por las características del material que está siendo tratado... agregar mayor cantidad de este tipo de aditivos puede ser negativo para el comportamiento de la capa reciclada. Incrementando la resistencia hace que el material incluso sea más frágil con una consecuente reducción en las propiedades de fatiga de la capa reciclada... (p. 11)
- d) Aditivos mixtos: Desde la perspectiva de un reciclado con emulsión, se puede llegar a uno mixto con cemento o cal, para evitar los problemas asociados a la alta plasticidad de los materiales que se reciclan, o en algunos casos los debido a la falta de cohesión, o para acelerar el curado de la capa. Por otra parte, ciertos materiales tratados con aditivos bituminosos presentan una pobre capacidad de mantener su resistencia cuando son sumergidos en agua (resistencia retenida). Esto puede ser solucionado con la adición de cemento o cal. Pequeñas cantidades de cemento o cal... pueden incrementar significativamente la resistencia retenida sin afectar las propiedades de fatiga de la capa. (p. 11)

3.3.1.4 Según el empleo de árido

La decisión de incorporar árido nuevo al material a reciclar dependerá principalmente de la necesidad de corregir la granulometría resultante del material fresado, como también en el caso que se requiera aumentar el espesor del pavimento reciclado... Por otra parte, ha sido demostrado tanto en laboratorio como en varios proyectos ejecutados, que incorporando árido nuevo durante el proceso de reciclado en frío (10 % a 25 %) se han obtenido estructuras recicladas mejoradas con menos vacíos de aire y con un control de la estabilidad. (p. 12)

3.3.2 Ventajas del reciclado de pavimentos asfálticos en frío

En este análisis se considera aquellos factores técnico-económicos a tomar en cuenta para la elección de la mejor alternativa según las características de cada proyecto. Al respecto, la **Tabla 10** hace referencia a dicho análisis en el cual Vivar (1995) aclara la diferencia de costos mencionados debido a sus características en el tiempo:

Al hablar del costo... se debe hablar de su costo anual, el cual depende de su costo inicial, de su vida útil..., y de su costo anual de mantenimiento como costos directos y de los costos de operación como costos indirectos... Los costos directos involucran los materiales, la mano de obra y los equipos que intervienen directamente en la elaboración del pavimento. Los costos indirectos... involucran por ejemplo a la dirección y administración de la obra, construcción y operación del campamento, gastos generales y oficina técnica y de ingeniería. (pp. 33-35)

Tabla 10
Ventajas y desventajas de los tipos de pavimentos

Concepto	Rígido	Flexible
Costo Inicial	+	-
Costo de mantenimiento	-	+
Facilidad en la construcción	+	-
Resistencia al ataque por sulfatos	-	+
Resistencia a los combustibles	+	-
Requerimiento de espesores	-	+
Reflexión de la luz	+	-

Nota: Adaptado de “Diseño y Construcción de Pavimentos. Programa de Actualización 1994-1995” de Vivar, 1995.

Luego del análisis realizado, Vivar, (1995) afirma que “si aplicamos los criterios anteriores a un ‘pavimento urbano promedio’, encontraremos que el costo por año de un pavimento rígido es aproximadamente la mitad del costo anual de un pavimento flexible equivalente”. (pp. 35-36)

3.3.3 Recomendación de uso

En la siguiente figura se presentan una serie de fallas que son de normal ocurrencia en los pavimentos asfálticos, las cuales se han relacionado con el tipo o tipos de reciclado que pueden solucionarlas [ARRA, 92], siendo de gran utilidad a la hora de tener que seleccionar el tipo de reciclado en frío más apropiado para solucionar la forma de deterioro.

TIPO DE FALLA DEL PAVIMENTO	TIPO DE RECICLADO		
	Fresado Superficial	Reciclado Parcial	Reciclado Profundo
Defectos Superficiales			
Pérdida de áridos	x	x	
Exudación	x		
Pérdida de fricción	x		
Deformaciones			
Corrugaciones (ondulaciones)	x (1)		
Ahuellamiento poco profundo	x (1)		
Ahuellamiento profundo		x (2)	x (2,3)
Grietas Asociadas a Cargas			
Piel de cocodrilo		x	x
En la huella de circulación		x	x
En los bordes		x	x
Grietas no Asociadas a Cargas			
En bloque (retracción)		x	x
Transversales (térmicas)		x	x
Grietas de Reflexión		x	x
Baches			
Superficiales		x	x
Profundos		x	x
Problemas de Base / Subbase			x
Calidad de Rodado / Rugosidad			
Irregularidades generalizadas	x		
Depresiones (asentamientos)	x (4)		x (5)
Hinchamientos	x (4)		x (6)
<p>(1) Puede ser una corrección temporal si no es removida toda la capa afectada o tratada con la adición de mezcla asfáltica especial.</p> <p>(2) Se puede requerir la adición de árido nuevo para mezclas inestables.</p> <p>(3) Se puede requerir la estabilización química de la subrasante, si el suelo es blando y húmedo.</p> <p>(4) Puede ser sólo corrección temporal si la falla está relacionada a problemas de la subrasante.</p> <p>(5) Se usa si las depresiones son debidas a la subrasante blanda y húmeda.</p> <p>(6) Se usa si el hinchamiento es debido a un suelo expansivo de la subrasante.</p>			

Figura 11. Tipo de reciclado según tipo de falla. Adaptado de Thenoux, 1999.

De igual manera, se puede tomar en cuenta las siguientes ventajas comparativas del uso de aditivos en el reciclado de los pavimentos para tomar una decisión del tipo de ligante a considerar en el diseño.

Tabla 11

Comparación del reciclado con cemento, emulsión y asfalto espumado. Ventajas y desventajas.

CEMENTO	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad: Puede obtenerse prácticamente en cualquier lugar, ya sea a granel o envasado. • Costo: En comparación al asfalto es barato. • Facilidad de aplicación: Puede siempre ser esparcido a mano, en ausencia de esparcidores mecánicos o mezcladores de lechada. • Aceptación: Es bien conocido en la industria de la construcción. Las normas y especificaciones están normalmente disponibles. • Significativo incremento de la resistencia a compresión con la mayoría de los materiales. • Mejora la resistencia al agua de los materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> • El agrietamiento por retracción es inevitable, pero puede ser minimizado. • El incremento de la rigidez reduce la resistencia a la fatiga. • Requiere curado apropiado. El tráfico temprano puede dañar la superficie.
EMULSIÓN	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Pavimento flexible: Usando emulsión se crea un material visco elástico con mayor resistencia a la fatiga. • Facilidad de aplicación: El tren de reciclado es acompañado por un tanque de emulsión para su aplicación a través de un esparcidor. • Aceptación: Las emulsiones son relativamente bien conocidas en industria de la construcción. Normas y especificaciones están normalmente disponibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo: No son normalmente fabricadas in-situ, el proceso requiere estricto control de calidad. Los agentes emulsificantes son caros. Se debe transportar agua, no sólo asfalto. • Contenido de humedad del material en pavimento existente es a veces demasiado alto y llega a saturarse al agregar emulsión. • El curado puede tomar largo tiempo. Desarrollo de resistencia depende de pérdida de humedad. • Disponibilidad: La formulación requerida para trabajo de reciclado puede no estar disponible.
ASFALTO ESPUMADO	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de aplicación: Se aplica a través de un esparcidor especial, luego de acoplar un tanque suministrador. • Pavimento flexible robusto: El material tratado tiene un mortero flexible uniendo las partículas gruesas. Por lo tanto, muestra una resistencia superior tanto a la deformación como a fatiga. • Costo: El asfalto espumado usa un asfalto de grado de penetración normal, por lo tanto, no tiene costo de fabricación. • Tasa de ganancia de resistencia: El material puede ser sometido al tráfico inmediatamente después de colocado. 	<ul style="list-style-type: none"> • El espumado requiere que asfalto esté caliente, normalmente a 170 °C, lo cual exige planta especial de calentamiento y precauciones de seguridad. • Calidad del asfalto: La calidad de reciclado resultante está determinada por características de la espuma las que dependen de la calidad del asfalto utilizado. • Tipo de material y condición: Material saturado y material deficiente en finos no puede ser tratado con asfalto espumado.

Nota: Adaptado de Thenoux (1999).

3.4 Metodologías de diseño de pavimentos

El diseño de pavimentos rígidos considera diversas variables definidas según la metodología utilizada, las cuales, según Torres (2007) se dividen en:

- Teóricas: son las que presentan la estructura del pavimento en función del estudio elástico de sistemas multicapas, sometidos a cargas estáticas.
- Empíricas: se apartan de la mecánica y se limitan a la clasificación de suelos y tipos de pavimentos más usualmente experimentales.
- Semiempíricas o diseños mecanicistas – empíricos, combinan los resultados anteriores, llevándose a cabo ensayos en laboratorio o vías de servicio. (p. 55)

Son las metodologías descritas anteriormente las que permiten el diseño estructural de los pavimentos de forma práctica y racional, por medio de nomogramas de diseño (Torres, 2007, p. 55). Algunos de ellos se mencionan a continuación:

3.4.1 Método de la AASHTO 1993

“Este método se basa en el uso de una ecuación empírica, desarrollada por la observación de algunos pavimentos de hormigón estudiados durante ensayos de la AASHTO sobre carreteras” (Torres, 2007, p. 56).

Originalmente, el algoritmo encontrado para el desarrollo de esta ecuación empírica fue realizado a partir de las observaciones derivadas del experimento vía de la AASHO.

Este procedimiento se aplica en el diseño de pavimentos de:

- Concreto simple y con juntas
- Concreto reforzado y con juntas
- Concreto continuamente reforzado.

La ecuación obtenida para el diseño de pavimentos por este método toma en cuenta distintos parámetros que permiten calcular el espesor de la losa.

$$\log(W_{18}) = Z_R S_0 + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32p_t) \log\left(\frac{s'c \cdot c_d(D^{0.75} - 1.132)}{215.63j \left[D^{75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right]}\right)$$

Donde:

- W_{18} : Número provisto de aplicaciones de carga por eje equivalente de 18 kips
 Z_R : Desviación estándar normal
 S_0 : Error est. comb. de la predicción del tráfico y el comportamiento de la estructura
 D : Espesor del pavimento de concreto
 ΔPSI : Diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial y final de diseño
 C_d : Coeficiente de drenaje
 J : Coeficiente de transmisión de cargas
 E_c : Módulo de elasticidad del concreto
 k : Módulo de reacción de la subrasante
 $S'c$: Módulo de rotura del concreto

3.4.1.1 Parámetros de diseño

- El tráfico de diseño, en ejes equivalentes de 18 kips (W_{18}) es definido como las cargas esperadas y acumulativas de un eje equivalente de 18000 lbs que recorren el pavimento durante el periodo de análisis (García, 2016, p. 11).
- El periodo de diseño, por lo general, es igual o mayor a 20 años con la finalidad de evaluar las alternativas a largo plazo, incluido una rehabilitación como mínimo (García, 2016, p. 12). En la siguiente tabla se muestran algunas recomendaciones para seleccionar el periodo de análisis según el tipo de carretera a construir y el volumen de tránsito asociado.

Tabla 12

Guía para la selección del periodo de diseño de un pavimento rígido

Condiciones de la carretera	Periodo de diseño (años)
Altos volúmenes. Urbano	30 – 50
Altos volúmenes. Rural	20 – 50
Bajos volúmenes. Pavimentado	15 – 25
Bajos volúmenes. Afirmado	10 - 20

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

- El valor de la confiabilidad (R) se refiere al nivel de probabilidad que tiene un pavimento de durar a través de los años para el cual es analizado, siendo este un valor que toma en cuenta las posibles variaciones a partir del modelo de comportamiento de la AASHTO (García, 2016, p. 14)

Tabla 13

Confiabilidad sugerida según clasificación funcional del pavimento

Clasificación funcional	Confiabilidad recomendada (R)	
	Urbano	Rural
Interestatales y otras autopistas	85 – 99.9	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 95
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

- La desviación estándar total o error estándar combinado (S_0) representa la desviación estándar conjunta, e indica el número de ejes que puede soportar un pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado P_t (García, 2016, p. 14).

Los valores recomendados para el diseño de un pavimento rígido puede ser de 0.35 para construcciones nuevas y de 0.40 para sobrecapas, en el pavimento flexible, estos valores cambian a 0.45 y 0.50, respectivamente (García, 2016).

- La desviación normal estándar (Z_r) define, estadísticamente, el tránsito que puede soportar el pavimento a lo largo del periodo de diseño, siguiendo una ley de distribución normal con una media M_t y una desviación típica S_0 (Torres, 2007, p. 58). La siguiente tabla correlaciones los valores de la desviación normal estándar asociados a la confiabilidad elegida para el análisis.

Tabla 14

Desviación normal estándar (Z_r) asociado a la confiabilidad de diseño

Confiabilidad (R) (%)	Desviación normal estándar acumulada (Z_r)
50	0.0000
60	-0.2533
70	-0.5244
75	-0.6745
80	-0.8416
85	-1.0364
87.5	-1.1503
90	-1.2816
91	-1.3408
92	-1.4051
93	-1.4758
94	-1.5548
95	-1.6449
96	-1.7507
97	-1.8808
98	-2.0537
99	-2.3263
99.9	-3.0902
99.99	-3.7190
99.999	-4.2649

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

- La serviciabilidad (ΔPSI) se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía, se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente (García, 2016, pág. 15). La AASHTO predice el porcentaje de pérdida de la serviciabilidad (ΔPSI) para distintos niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea el ΔPSI , mayor la capacidad de carga del pavimento antes de la falla.

Tabla 15

Serviciabilidad de diseño según tipo de vía

Tipo de vía	Índice de serviciabilidad del pavimento			
	Pavimento flexible		Pavimento rígido	
	PSI inicial	PSI final	PSI inicial	PSI final
Vías principales		2.50		2.50
Vías secundarias	4.20	2.00	4.50	2.00
Condición de falla		1.50		1.50

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

- El coeficiente de drenaje (C_d) es el valor que depende de dos parámetros, la calidad de drenaje, que se determina como el tiempo en que tarda el agua infiltrada en ser evacuada; y, el porcentaje de tiempo a lo largo del año, durante el cual, el pavimento está expuesto a niveles próximos a la saturación (García, 2016, p. 16). Algunos valores recomendados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 16

Calidad del drenaje en la base y subbase

Calidad del drenaje	El agua libre se remueve en...
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Aceptable	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	El agua no drenará

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

Tabla 17

Coeficiente de drenaje según porcentaje anual de lluvia y calidad de drenaje

Calidad del drenaje	% del tiempo en que la estructura del pavimento rígido está expuesta a humedades cercanas a la saturación			
	Menos del 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
Aceptable	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

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

- El módulo de rotura del concreto (S'_c), o módulo de ruptura (f_r) o MR, expresa la resistencia a la flexión del concreto en libras por pulgada cuadrada (MPa) y es determinada mediante los métodos de ensayo de la ASTM C78 o ASTM C293 (García, 2016, pág. 18), en el cual se mide la resistencia a la falla por omento de una viga o losa de concreto no reforzada. El ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete (Estados Unidos): art. 19.2.3.1 y art. 25.4.2.5 recomiendan la siguiente ecuación para el cálculo de este coeficiente:

$$f_r = 7.5\lambda\sqrt{f'c} \text{ [psi]} \quad \text{o} \quad f_r = 0.62\lambda\sqrt{f'c} \text{ [MPa]}$$

Donde $f'c$ representa la resistencia a la compresión del concreto y, λ , el factor de modificación que refleja la reducción de las propiedades mecánicas del concreto ligero en relación a un concreto de peso normal con la misma resistencia a la compresión. Para el caso de concretos de peso normal, λ es igual a 1.0. Asimismo, la AASHTO (1993) recomienda algunos valores según el uso de la vía, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 18

Valores recomendados del módulo de rotura del concreto según uso de la vía

Tipo de pavimento	Módulo de ruptura ($S'c$) recomendado	
	Kg/cm ²	psi
Autopista	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas industriales	45.0	640.1
Urbanas principales	45.0	640.1
Urbanas secundarias	42.0	597.4

Nota: El formato ha sido actualizado. Adaptado de “*Guide Design for Pavement Structures*”, por AASHTO, 1993.

- El módulo de elasticidad del concreto (E_c) es la “relación que existe entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material” (MVCS, 2009, p. 62). Este módulo se puede calcular según lo descrito en la norma ASTM C-469 o correlacionando su resistencia a la compresión ($f'c$). Para este último caso, la siguiente tabla muestra las ecuaciones de correlación existentes.

Tabla 19

Módulo de elasticidad del concreto según su peso unitario

Peso unitario del concreto (w_c)	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
1450 – 2500 kg/m ³	$E_c = (w_c)^{1.5} 0.043 \sqrt{f'c}$	$E_c = (w_c)^{1.5} 0.136 \sqrt{f'c}$
2300 kg/m ³ (peso normal)	$E_c = 4700 \sqrt{f'c}$	$E_c = 15000 \sqrt{f'c}$

Nota: El formato ha sido actualizado. Adaptado de “Norma E.060: Concreto armado”, por Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2009.

- El coeficiente de transmisión de carga (J) representa la capacidad que tiene el pavimento para distribuir la carga a través de las discontinuidades o fisuras afectadas por la existencia de dowells, la trabazón de los agregados y la presencia de bermas adyacentes. Valores altos de este coeficiente corresponden a pavimentos con bajo módulo de reacción de la subrasante (k), un alto coeficiente de dilatación térmica del concreto (α) y un fuerte gradiente de temperatura (ΔT) (Vásquez, 2017, p. 32).

Figura 12. Tipos de bermas ancladas al carril del pavimento, por Vásquez, 2017.

Algunos de los valores recomendados para este coeficiente son:

Tabla 20

Coeficiente de transmisión de carga según tipo de berma

Tipo de berma	Concreto asfáltico		Anclada y de concreto	
	Sí	No	Sí	No
Dispositivos de transmisión de carga	Sí	No	Sí	No
Pavimentos con juntas de concreto simple o concreto reforzado	3.20	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
Pavimento de concreto continuamente reforzado	2.9 – 3.2	NA	2.3 – 2.9	NA

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

- El módulo de resiliencia (Mr) es un coeficiente que mide la propiedad elástica del suelo reconociendo ciertas características no lineales, el cual puede ser usado directamente para el diseño de pavimentos flexibles, pero debe ser convertido a un módulo de reacción de la subrasante (valor-k) para el diseño de pavimentos rígidos o compuestos (AASHTO, 1993, pp. 13-14).

La siguiente ecuación es la recomendada por la AASHTO para el cálculo de este factor, el cual fue publicado en versiones posteriores de esta guía.

$$Mr = 2555 \times CBR^{0.64} [psi]$$

Donde el CBR (*California Bearing Ratio* o valor de soporte de California) es una prueba de resistencia simple que compara la capacidad de carga de un material con la de una piedra triturada bien graduada, tiene como objetivo evaluar la resistencia de los materiales cohesivos que tienen un tamaño máximo de partículas de menos de 19 mm (0.75 pulg) (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2000), es decir, que mide un índice de resistencia de los suelos comparando un material patrón (en este caso una piedra triturada de alta calidad) con la del suelo a analizar.

El CBR se puede determinar de acuerdo con el manual de ensayo de materiales, especificación MTC E 132 (CBR de suelos en laboratorio) o MTC E 133 (CBR en el terreno o in-situ) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), basado en las especificaciones ASTM y AASHTO de los Estados Unidos de América.

Figura 13. Correlaciones del M_r con las propiedades del suelo, por AASHTO, 2002

- El módulo efectivo de reacción de la subrasante (k) es el valor de la capacidad de soporte del suelo, el cual depende del módulo de resiliencia (M_r) de la subrasante y la subbase, así como del módulo de elasticidad de la sub base, pudiéndose determinar mediante la correlación de otros parámetros (Torres, 2007, p. 64). Se recomienda que el módulo de elasticidad no se mayor a 4 veces el valor de la subrasante.

Figura 14. Ábaco de cálculo del módulo compuesto de reacción de la subrasante (k), por la AASHTO, 1993.

Vásquez (2017) indica que el ábaco anterior se basa en el modelo de fundación semi-infinita y, en caso de no emplear una subbase ($D_{SB} = 0$ pulg), el valor del módulo de reacción de la subrasante (k), en psi/pulgadas, es igual a $M_r [\text{psi}] / 19.4$.

- El factor de pérdida de soporte (L_s) es el valor que se le da a la pérdida de soporte que pueden llegar a tener las losas de un pavimento de concreto, por efecto de la erosión en la subbase, por corrientes de agua o por asentamientos diferenciales en la subrasante (Torres, 2007, p. 63). La AASHTO calcula el valor de este coeficiente mediante la siguiente figura.

Figura 15. Ábaco de corrección del módulo de reacción de la subrasante (k) por el coeficiente de pérdida de soporte (L_s), por AASHTO, 1993

Algunos valores recomendados para este coeficiente son:

Tabla 21

Valores recomendados para la pérdida de soporte (L_s) según tipo de material

Tipo de material	Rango de E (ksi)	Pérdida de soporte (L_s)
Base granular tratada con cemento	1000 a 2000	0.00 a 1.00
Mezclas de grava – cemento	500 a 1000	0.00 a 1.00
Base tratado con asfalto	350 a 1000	0.00 a 1.00
Mezclas estabilizadas con asfalto	40 a 300	0.00 a 1.00
Estabilización con cal	20 a 70	1.00 a 3.00
Materiales granular no tratados	15 a 45	1.00 a 3.00
Materiales de suelo fino o subrasante natural	3 a 40	2.00 a 3.00

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

3.4.2 Método de la PCA 1984

El método de la *Portland Cement Association* (PCA, por sus siglas en inglés) se basa en la teoría del comportamiento de las losas según Westergaard, Picket y Ray⁸, así como las pruebas y modelos a escala de los ensayos de Arlington y, los pavimentos experimentales sujetos a pruebas de tráfico controlado como la AASHTO (Portland Cement Association [PCA], 1995, p. 4).

En cuanto a la teoría de Westergaard, esta señala que las losas funcionan como una placa elástica apoyadas sobre una base continua, de tal manera que la deformación de la losa, debido a la carga aplicada, es acompañada por una deformación igual en la base, siendo la deformación total determinada por la rigidez de la losa y del terreno (Céspedes, 2002, p. 220). Esta relación es denominada como radio de rigidez relativa.

Por otro lado, con las bases de diseño mencionadas anteriormente, el método de la PCA establece que el diseño del pavimento se realiza de acuerdo a dos criterios fundamentales, la fatiga y la erosión⁹. La fatiga permite mantener los esfuerzos producidos por las cargas dentro de límites seguros de diseño, previniendo el agrietamiento de la losa; por otro lado, la erosión limita las deflexiones del pavimento en el borde de las losas, juntas y esquinas, controlando la erosión de la cimentación y de los materiales en las bermas (PCA, 1995).

En la guía de 1984, se incluye el reconocimiento de ciertas condiciones necesarias para el desempeño del pavimento, tales como la transferencia de carga en las juntas, el efecto de las bermas de concreto, el efecto de subbases de concreto pobre y la consideración de ejes triples (o tridems) para el diseño (PCA, 1995).

Es importante destacar que existen gráficos de diseño, especialmente para los pavimentos aeroportuarios, en los cuales intervienen factores como las propiedades del cemento, la capacidad de carga de la subrasante, el tipo de aeronaves, cargas y frecuencia de operación; así como el uso, pudiendo ser pistas de aterrizaje, de rodaje, plataformas o pisos de hangares.

⁸ El método de la PCA también ha incorporado el análisis de cómputo por medio de elementos finitos.

⁹ El criterio por erosión es necesario ya que algunas formas de daños del pavimento tales como bombeo en las juntas y daños de las bermas no son debidas a las fatigas

3.4.2.1 Parámetros de diseño

Si bien muchos de estos parámetros han sido descritos previamente, se harán algunas precisiones o aclaraciones necesarias que son de aplicabilidad para el diseño del pavimento por el método de la PCA.

- El periodo de diseño es considerado como el tiempo de vida de un pavimento, aunque su definición no es precisa, diversos autores indican que la vida de un pavimento termina con la primera capa o, por el contrario, este parámetro puede ser considerado como un periodo de análisis de tráfico, aunque se sabe que el tráfico no puede ser predicho con mucha precisión por un periodo largo (PCA, 1995, p. 8). Ya que este parámetro influye en el espesor de diseño de la losa, la PCA recomienda utilizar un periodo de diseño de 20 años, aunque esta selección variara según el criterio del especialista y el análisis económico del proyecto.
- El módulo de rotura (MR) es la resistencia del concreto a la flexión, la cual es considerada en el procedimiento de diseño mediante el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo las cargas repetitivas de camiones (PCA, 1995, p. 5). Es importante mencionar que las pruebas de laboratorio para la determinación del módulo de rotura (MR) son realizadas a los 7, 14, 28 y 90 días de acuerdo a los requerimientos del proyecto; por lo general, las pruebas a los 7 y 14 días sirven para determinar el momento de apertura del pavimento al tráfico; las pruebas a los 28 días para el diseño de espesores de pavimentos en carreteras y calles; y, la prueba a los 90 días para el diseño de espesores en pistas de aterrizaje (PCA, 1995, p. 6).

Figura 16. Relación entre la resistencia a la flexión y la edad de diseño, por Portland Cement Association (PCA), 1984.

- El módulo de reacción de la subrasante (k) de Westergaard está definido como la carga transmitida en libras por pulgada cuadrada, sobre una placa de 30 pulg. de diámetro que es dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga; los valores resultantes son expresados en libras por pulgada cúbica (pci) (PCA, 1995, p. 6). La PCA recomienda algunos valores de k cuando las subbases son o no tratadas con cemento, aunque limitados por un determinado espesor de la subbase. Por otro lado, la siguiente figura muestra las correlaciones existentes para determinar el módulo de reacción de la subrasante (k) con el CBR del material, así como interrelación según la clasificación de los suelos. Esta última correlación debiera ser usada de forma referencial debido a la alta variabilidad de los suelos.

Figura 17. Tabla de correlaciones entre la clasificación de suelos y los valores de soporte según metodología, por la Portland Cement Association (PCA), 1995.

Si bien las tablas de la PCA con valores recomendados de k hacen referencia a un $k_{\text{combinado}}$ para la subrasante-subbase cuando son o no tratadas con cemento, estos valores son limitados. Ante ello, se debe tener en consideración que el $k_{\text{combinado}}$ puede ser determinado por el nomograma de la AASHTO mostrado en las Figuras 12 y 13, y, además, considerar el valor de pérdida de soporte (L_s).

- El tráfico es la cantidad y pesos de las cargas por eje esperadas durante el periodo de diseño, siendo derivados de las estimaciones del tráfico de vehículos y camiones, así como de sus cargas axiales respectivas (PCA, 1995, p. 8). Este parámetro diferencia a los ejes de los vehículos en simples, tandem y tridem. El primer caso es cuando el eje tiene una rueda a ambos lados, el segundo cuando se tiene dos ruedas a ambos lados y, el tercero, cuando se tiene tres ruedas a ambos lados. De acuerdo con lo anterior y dependiendo del tipo de vehículo, se puede tener una combinación de ejes que deben ser clasificados.
- La proyección del tráfico es considerada más como un método para obtener la información del volumen de tráfico de diseño, en donde se requiere usar tasas anuales de crecimiento del tráfico (PCA, 1995, p. 9). El factor de proyección se multiplica por el tráfico para obtener el valor de diseño. En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados para este factor.

Tabla 22

Factor de proyección según tasa de crecimiento del tráfico y periodo de diseño

Tasa anual de crecimiento del tráfico (%)	Factor de proyección	
	20 años	40 años
1	1.1	1.2
1 ½	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2 ½	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3 ½	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4 ½	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5 ½	1.7	2.9
6	1.8	3.2

Adaptado de “Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción”, por Vásquez, 2017.

- De acuerdo con la PCA (1995), los factores de seguridad de carga (LSF, por sus siglas en inglés) son coeficientes de mayoración de las cargas de tráfico, en el cual, se recomienda un valor de 1.20 para proyectos interestatales y otros de múltiples carriles donde habrá altos volúmenes de tráfico de camiones; 1.10 para carreteras y calles arteriales donde el volumen de tráfico de camiones será moderado; y, 1.00 para carreteras, calles residenciales, y otras que soportarán pequeños volúmenes de tráfico de camiones (pp. 11-12).

3.4.3 Método de la *Yield Line Theory* (basado en el *Technical Report N° 34*)

Este método considera la aplicación de cargas concentradas en áreas circulares pequeñas sobre una losa de gran tamaño que generan esfuerzos que tienden a ser iguales a la resistencia límite última a la tracción del concreto en la parte inferior de la losa. En este estado, se supone que el momento a la flexión a lo largo de las líneas de fluencia (momento positivo) es el valor total del momento plástico (o residual después de la fisuración). Sin embargo, un requisito de serviciabilidad principal es evitar grietas en la superficie de la losa, donde el momento de flexión de la losa a lo largo de las líneas de deformación se limita al momento de agrietamiento de diseño del concreto, aunque con el factor de seguridad parcial apropiado para este estado límite último. Este comportamiento dúctil de la losa es proporcionado por el uso de fibras o acero de refuerzo en el concreto (The Concrete Society, 2016, p. 27).

En cuanto a las cargas, estas deberán ser consideradas puntuales bajo dos condiciones de falla, por flexión y por punzonamiento; en donde el diseño de la losa, bajo cargas puntuales, se da en el estado límite último del concreto, el cual está basado en la teoría de las líneas de rendimiento (*Yield Line Theory*) (The Concrete Society, 2016, p. 27).

Se debe tener en consideración que el diseño al corte de la losa alrededor de las cargas concentradas debe estar de acuerdo con el Eurocódigo 2.

Por otro lado, el espesor mínimo de diseño es de 150 mm para las losas soportadas directamente sobre el terreno de acuerdo al TR N° 34. En ese sentido, se debe tomar en cuenta la reducción del espesor de la losa causada por mallas de acero, rieles, bucles de inducción, cables guía y otras características (The Concrete Society, 2016, p. 27).

3.4.3.1 Parámetros de diseño

- a) Factores de seguridad parciales: De acuerdo con *The Concrete Society* (2016), estos factores pueden ser de 1.5 para concreto normal o reforzado con fibras y 1.15 para concreto con refuerzo (barras o fabricado). De igual manera, los factores de seguridad de las cargas son de 1.2 para estructuras metálicas (tipo racks) fijas, 1.6 para cargas dinámicas y 1.5 para otro tipo de cargas. Para cargas uniformemente distribuidas y cargas lineales, se utiliza un factor de seguridad global de 1.5.
- b) Efecto de fatiga para cargas dinámicas pesadas: Se considera que cuando existen materiales de manejo de equipos muy pesados, se deben considerar los efectos de la fatiga. Por lo general, esto ocurrirá cuando se utilicen camiones pesados para el manejo de pallets dobles, el manejo de bobinas de papel con abrazaderas y cargas para trabajos de ingeniería pesada con *The Concrete Society* (2016).
- c) Requerimientos del refuerzo: El contenido de refuerzo debe ser tal que la proporción de momentos de resistencia mayorados, con y sin fisuras, no sea inferior al 50%. La capacidad de momento de una fibra de acero individual, o fibra de acero combinada con malla de refuerzo, debe calcularse verificando la capacidad de momento. Para la malla de refuerzo, se recomienda que el área de la sección transversal del refuerzo (A_s) sea al menos del 0,08%, con un límite superior del 0,125% en las juntas de movimiento restringidas aserradas. La malla debe estar en la parte inferior de la losa y debe instalarse con espaciadores para proporcionar una cobertura nominal suficiente según las recomendaciones de *The Concrete Society* (2016).
- d) Radio de rigidez relativa (l): Mide la rigidez de la losa de concreto respecto del suelo de soporte. Westergaard introdujo este concepto, que se determina como:

$$l = [(E_{cm}h^3)/(12(1 - \nu^2))k]^{0.25}$$

Donde:

- E_{cm} : módulo de elasticidad del concreto a corto plazo (N/mm^2)
 h : espesor de la losa (mm)
 k : módulo de reacción de la subrasante (N/mm^3)
 ν : coeficiente de Poisson, tomado como 0.2.

La importante física de la rigidez relativa se muestra en la **Figura 18**.

Figura 18. Esquema de distribución de momentos de flexión elásticos para cargas internas a) para carga típica, b) para carga P_1 , c) para carga P_2 y d) para las combinaciones de P_1 y P_2 , por *The Concrete Society*, 2016.

- e) **Momentos de flexión para cargas internas puntuales:** El momento flector bajo una carga concentrada P_1 es máximo y positivo (tensión en la parte inferior de la losa) directamente debajo de la carga. A medida que aumenta la distancia desde la carga, el momento circunferencial permanece positivo y disminuye a cero a una distancia de $1.0 l$ de la carga. Luego, se vuelve negativo y alcanza su máximo a $2.0 l$ de la carga. El momento negativo máximo (tensión en la parte superior de la losa) es menor que el momento positivo máximo (*The Concrete Society* (2016), p. 28).

La **Figura 19** muestra el caso de una carga puntual aplicada sobre un área circular pequeña en una gran losa de concreto apoyada sobre el suelo. A medida que aumenta la carga, los esfuerzos de flexión debajo de la carga serán iguales a la resistencia a la flexión del concreto. La losa comenzará a ceder, lo que provocará grietas de tensión radial en el fondo de la losa causadas por momentos tangenciales positivos.

Figura 19. Desarrollo de grietas radiales y circunferenciales en una losa de concreto apoyada sobre el suelo, por *The Concrete Society*, 2016.

El agrietamiento por tracción ocurrirá en la parte superior de la losa cuando el momento circunferencial negativo máximo exceda la capacidad de momento negativo de la losa (es decir, como una sección de concreto simple). Cuando se alcanza esta condición, se considera que ha ocurrido una falla ya que el criterio de diseño es evitar grietas en la superficie (*The Concrete Society* (2016), p. 29).

f) Ubicación de las cargas: *The Concrete Society* (2016) considera tres ubicaciones de carga (ver **Figura 20**) para el diseño de la losa, las cuales son clasificadas en:

- Carga interna: cuando el centro de la carga se encuentra a una distancia mayor a $(a + l)$ del borde de la losa (es decir, un borde libre o una junta).
- Carga de borde: cuando el centro de la carga se encuentra adyacente a un borde o junta libre a una distancia mayor $(a + l)$ de una esquina (es decir, una esquina libre, la intersección de un borde libre y una junta, o de dos juntas).
- Carga de esquina: cuando el centro de la carga está ubicada a una distancia (a) a cada uno de los dos bordes o juntas que forman la esquina.

Donde (a) es el radio equivalente del área de contacto de la carga y (l) es la rigidez relativa.

Figura 20. Ubicación de las cargas de diseño, por *The Concrete Society*, 2016.

Cabe señalar que las cargas en los bordes adyacentes a las juntas se consideran de la misma manera que las de los bordes “reales” que se encuentran, por ejemplo, en el perímetro de un edificio. Sin embargo, las cargas efectivas en las juntas se reducen mediante la transferencia de carga a través del enclavamiento agregado (Ver ítem h).

g) Cargas de diseño: *The Concrete Society* (2016) establece los tipos de cargas a considerar para el diseño de las losas de concreto, siendo estas las siguientes:

- Cargas puntuales: Para calcular las tensiones impuestas por una carga es necesario conocer el tamaño de la carga y el radio del área de contacto, a . Como las placas base y las huellas de las ruedas de los camiones son generalmente rectangulares, primero se establece el área de contacto real, a partir de la cual se calcula el radio del círculo equivalente. En ausencia de detalles del área de contacto para las cargas de las ruedas neumáticas, el área de contacto se puede calcular utilizando la carga y la presión de los neumáticos. A menos que un área más grande pueda justificarse mediante un análisis apropiado, teniendo en cuenta la rigidez relativa de la losa y la placa base, las dimensiones de la placa base deben tomarse como la menor de las dimensiones reales y las dimensiones efectivas calculadas de acuerdo con la

Figura 21.

En ausencia de detalles específicos del proyecto para estanterías de paletas ajustables, se debe utilizar una dimensión efectiva de 100 mm × 100 mm (*The Concrete Society* (2016), p. 29).

Figura 21. Dimensión efectiva de la placa base, por *The Concrete Society*, 2016.

Las siguientes ecuaciones para el cálculo de las cargas internas, de borde y de esquina, han sido tomadas de Meyerhof y *The Concrete Society* (2016), donde se debe interpolar los valores de a/l entre 0 y 0.2:

Para cargas internas con:

$$a/l = 0 : P_{u,0} = 2\pi(M_p + M_n)$$

$$a/l \geq 0.2 : P_{u,0.2} = 4\pi(M_p + M_n)/[1 - (a/3l)]$$

Para cargas de borde libre con:

$$a/l = 0 : P_{u,0} = [\pi(M_p + M_n)/2] + 2M_n$$

$$a/l \geq 0.2 : P_{u,0.2} = [\pi(M_p + M_n) + 4M_n]/[1 - (2a/3l)]$$

Para cargas en esquina con:

$$a/l = 0 : P_{u,0} = 2M_n$$

$$a/l \geq 0.2 : P_{u,0.2} = 4M_n/[1 - (a/l)]$$

Donde:

M_n : momento negativo de resistencia (kNm)

M_p : momento positivo último de resistencia (kNm)

- Cargas puntuales adyacentes: Cuando las cargas puntuales están muy cerca, se puede considerar que actúan conjuntamente como una carga única en un área de contacto que es equivalente a las cargas individuales expresadas como círculos más el área entre ellas, como se muestra en la **Figura 22**. Este método puede usarse para pares de cargas en centros de hasta el doble de la profundidad de la losa. De lo contrario, el comportamiento combinado debe determinarse como cargas múltiples (*The Concrete Society* (2016), p. 30).

Figura 22. Área de contacto equivalente para dos cargas puntuales adyacentes, por The Concrete Society, 2016.

Esto también puede aplicarse a combinaciones de ruedas de carretillas elevadoras y montantes verticales al recoger o colocar *pallets*. Un diseño típico para pasillos muy estrechos se muestra en la **Figura 23**.

Figura 23. Cargas adyacentes en pasillos estrechos, por The Concrete Society, 2016.

- Cargas múltiples (dobles y cuádruples): *The Concrete Society* (2016) indica las ecuaciones que deben usarse para el diseño de la losa considerando la aplicación de múltiples cargas internas.

Para **cargas puntuales dobles**, donde el espaciado de la línea central x es menor de $2h$ (el doble de la profundidad de la losa), se debe usar el enfoque anterior. De lo contrario, la carga de falla total se aproxima a lo siguiente, donde se debe interpolar los valores de a/l entre 0 y 0.2:

Interpolar para valores de a/l entre 0 y 0.2.

$$a/l = 0 \quad : P_{u,0} = [2\pi + (1.8x/l)](M_p + M_n)$$

$$a/l \geq 0.2 \quad : P_{u,0.2} = \left[\frac{4\pi}{1-(a/3l)} + \frac{1.8x}{l-(a/2)} \right] (M_p + M_n)$$

Para **cargas puntuales cuádruples** con espaciado de línea central de x e y , la carga de falla total está dada por la suma de las cargas de falla de las cargas puntuales individuales o por la suma de las cargas de falla de las cargas individuales concentradas dobles o por la siguiente carga de falla total aproximada, la que proporcione el valor más pequeño:

$$a/l = 0 \quad : P_{u,0} = [2\pi + (1.8x + y)/l](M_p + M_n)$$

$$a/l \geq 0.2 \quad : P_{u,0.2} = \left[\frac{4\pi}{1-(a/3l)} + \frac{1.8(x+y)}{l-(a/2)} \right] (M_p + M_n)$$

Los patrones de falla resultantes son ilustrados en la **Figura 24**.

Figura 24. Patrones de falla para cargas múltiples, por *The Concrete Society*, 2016.

Se encontrará que la carga de falla de un grupo de cargas será menor que la suma de las cargas individuales a menos que las cargas estén bien separadas (al menos 3.5 *l* para dos cargas en línea). Para columnas de entrepiso u otras cargas puntuales similares, las comprobaciones de los efectos combinados se deben llevar a cabo cuando las cargas estén más cerca de 3.5 *l*.

h) Transferencia de carga en las juntas: Las juntas entre paños y las intersecciones de estas deben considerar medidas para transferir la carga sin causar el escalonamiento. No es posible transferir más del 50% de la carga a través de una junta. La transferencia de carga debe considerarse individualmente según los siguientes tipos:

- **Juntas formadas de movimiento libre**. Los mecanismos de unión consisten en *dowels* redondos o cuadrados, o *dowels* de placa¹⁰ individuales.
- **Juntas aserradas de movimiento libre**. Los *dowels* son colocados en su posición con unas cápsulas que le permite el desplazamiento. Las grietas son inducidas a través de esta junta y la transferencia de carga es proporcionada por el enclavamiento de los agregados.
- **Juntas formadas de movimiento restringido**. La restricción es brindada por barras de refuerzo longitudinales colocadas tal como los *dowels*, pero con una longitud de anclaje completa a cada lado de la junta. La cantidad debe corresponder al refuerzo en la losa, generalmente en el rango 0.08–0.125%. Los *dowels* de conexión suelen ser de 12 mm en centros de 450–600 mm.
- **Juntas aserradas de movimiento restringido (solo losas reforzadas con mallas de acero)**. Las grietas profundas son inducidas por cortes de sierra. La malla de refuerzo es continua a través de la junta y la transferencia de carga se realiza mediante enclavamiento agregado y el refuerzo.

La transferencia de carga producida por el enclavamiento de los agregados es la capacidad de una grieta irregular estrecha para transferir carga de un paño al otro por contacto entre las partículas de agregado (*The Concrete Society* (2016), p. 31). Esta transferencia solo puede tener lugar en una grieta formada deliberadamente en una junta de movimiento restringido aserrada o en una grieta aleatoria estrecha.

¹⁰ En Perú, se utilizan los *dowels* lisos o corrugados redondos; sin embargo, en Europa (continente de origen de la norma utilizada) utilizan otros tipos como los cuadrados o de placa.

De acuerdo con *The Concrete Society* (2016), para propósitos de diseño en una abertura de 1,5 mm, el 15% de la capacidad se puede transferir a través de una junta. Donde las juntas o grietas se abran más ampliamente de 0.9 mm en áreas de mucho tráfico o carga, deben rellenarse (*The Concrete Society* (2016), p. 31).

Por otro lado, deberá considerarse la transferencia de carga producida por los *dowels* o barras en losas portantes, donde el número efectivo de *dowels* que contribuirán a transferir la carga se toma como aquellos dentro de una distancia de $1.8 l$ a cada lado de la línea central de la carga aplicada, donde l es el radio de rigidez relativa (*The Concrete Society* (2016), p. 32).

i) Capacidad a cortante por punzonamiento

Dado que la carga de diseño dominante para las losas industriales son las cargas puntuales de las estanterías y los montacargas, se debe considerar la cortante por punzonamiento. La capacidad de corte por punzonamiento se determina de acuerdo con el Eurocódigo, independientemente del refuerzo de la losa, el esfuerzo cortante no debe exceder el valor V_{max} (*The Concrete Society*, 2016, p. 24), donde:

$$V_{max} = 0.5k_2f_{cd}$$

Donde:

f_{cd}	:	resistencia a la compresión de diseño de concreto
f_{cd}	:	f_{ck}/γ_c
k_2	:	$0.6(1 - f_{ck}/250)$
f_{ck}	:	característica de la resistencia a la compresión

Finalmente, la capacidad de carga máxima en el punzonado $P_{p,max}$ es:

$$P_{p,max} = v_{max}u_0d$$

Donde u_0 es la longitud del perímetro del área cargada y d es la profundidad efectiva

Verificando el corte en la cara del área de contacto y en el perímetro crítico a una distancia $2.0 d$ de la cara del área de contacto, donde d es la profundidad efectiva. Ver la **Figura 25**.

Figura 25. Parámetros críticos de falla por punzonamiento para cargas internas, por *The Concrete Society*, 2016.

- j) Capacidad de soporte del terreno: Como se supone que la losa está en contacto con la subbase, se puede considerar que una proporción de la carga dentro del perímetro de punzonamiento se aplica directamente a la subrasante, reduciendo así la fuerza de diseño. A continuación, se expone un método para calcular la reacción del suelo (*The Concrete Society* (2016), p. 32). Para cargas puntuales aplicadas a través de un soporte rígido (donde $a/l < 0.2$), la reacción es:

Interna:

$$R_p = 1.4 \left(\frac{d}{l} \right)^2 P + 0.47(x + y) \frac{dP}{l^2}$$

Esquina:

$$R_p = 2.4 \left(\frac{d}{l} \right)^2 P + 0.80(2y + x) \frac{dP}{l^2}$$

Donde:

- P : punto de carga
 d : profundidad efectiva
 x e y : dimensiones efectivas de la placa de apoyo¹¹
 l : radio de rigidez efectiva

¹¹ Nota: cuando las dimensiones x e y dan como resultado un "radio equivalente del área de contacto" $a > 0.2 l$, las dimensiones efectivas de la placa base deben reducirse de modo que a no sea mayor que $0.2 l$.

- k) Cargas lineales: Se adopta el análisis elástico, el cual utiliza un factor de seguridad global de 1.5. Debido a que ya se aplica un factor de 1.5 a las propiedades del material, no se debe aplicar un factor adicional. Las ecuaciones para determinar los momentos en losas apoyadas sobre el suelo incorporan el término λ donde:

$$\lambda = \left(\frac{3k}{E_{cm}h^3} \right)^{0.25}$$

Donde:

k : módulo de reacción de la subrasante (N/mm³)
 E_{cm} : módulo de elasticidad del concreto (N/mm²)
 $1/\lambda$: longitud característica

La capacidad de carga de trabajo de la losa bajo la acción de una línea de carga por unidad de longitud, P_{lin} , se determina a partir de:

$$P_{lin} = 4\lambda M_{un}$$

Como esto se basa en una distribución elástica del momento flector, M_{un} debe tomarse como el momento de agrietamiento. No debe usarse el momento residual para el concreto reforzado con fibra o malla de acero (*The Concrete Society* (2016), p. 32).

Cuando una línea de carga se encuentra adyacente a un borde libre, la capacidad es $3\lambda M_{un}$ aumentando a $4\lambda M_{un}$ en una distancia de $3/\lambda$. Para una junta con una capacidad mínima de transferencia de carga del 15%, la capacidad aumenta a $4\lambda M_{un}$ a una distancia de $1/\lambda$ (Ver **Figura 26**) (*The Concrete Society* (2016), p. 32).

Figura 26. Parámetros críticos de falla por punzonamiento para cargas internas, por *The Concrete Society*, 2016.

- 1) Cargas uniformemente distribuidas: Se adopta el análisis elástico, el cual utiliza un factor de seguridad global de 1.5. Debido a que ya se aplica un factor de 1.5 a las propiedades del material, no se debe aplicar un factor adicional. Las ecuaciones para determinar los momentos en losas apoyadas sobre el suelo incorporan el término λ , igual que para las cargas lineales (*The Concrete Society* (2016), p. 33).

Un ejemplo común de carga distribuida uniformemente es el apilamiento de bloques. Para el caso general en el que la losa estará sujeta a un patrón aleatorio de este tipo de carga, se ha encontrado que el momento flector positivo máximo de la losa, es causado por una carga de ancho $\pi / 2\lambda$ como se muestra en la **Figura 27 (a)**.

Figura 27. (a) Patrones de carga para una carga q uniformemente distribuida que causa un momento flector positivo máximo; (b) momento flector negativo máximo, por *The Concrete Society*, 2016.

El momento negativo máximo se induce entre un par de cargas de parche, cada una de ellas de ancho π / λ espaciadas a una distancia $\pi / 2\lambda$, como se muestra en la **Figura 27 (b)**. Este espacio se conoce comúnmente como ancho crítico del pasillo.

La capacidad de carga por unidad de área, q , viene dada por:

$$q = 5.95\lambda^2 M_n \text{ (KN/m}^2\text{)}$$

donde M_n = capacidad de momento del concreto simple

Si la posición de la carga está bien definida, el momento flector positivo inducido bajo una carga de ancho $2c$ (mostrado en la **Figura 28 (a)**) viene dado por:

$$q = \frac{2}{B_{\lambda c}} \lambda^2 M_p$$

Dónde: $B_{\lambda c} = e^{-\lambda c} \sin \lambda c$
 $e = 2,7182$.

A una distancia a_1 de la cara cercana y b_1 de la cara lejana del área cargada, vea la **Figura 28 (b)**, el momento negativo inducido, M_{n1} , viene dado por:

$$M_{n1} = \frac{1}{4\lambda^2} (B_{\lambda a1} - B_{\lambda b1}) q$$

Dónde: $B_{\lambda a1} = e^{-\lambda a1} \sin \lambda a1$
 $B_{\lambda b1} = e^{-\lambda b1} \sin \lambda b1$

Si una segunda carga se ubica cerca de la primera, esto inducirá un momento flector adicional M_{n2} , nuevamente determinado a partir de la ecuación “q”, pero con valores modificados de a y b . Por tanto, q se puede determinar a partir del valor máximo de $(M_{n1} + M_{n2})$, equiparándolo a la capacidad del concreto M_n (*The Concrete Society* (2016), p. 33).

Figura 28. (a) y (b): áreas definidas de distribución uniforme carga, por *The Concrete Society*, 2016.

4 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA

4.1 Descripción del proyecto

El proyecto “*Mejoramiento de la Av. Sánchez Cerro Tramo, Av. Gullman – Av. Chulucanas*” se encuentra ubicado en la zona central de la ciudad de Piura, departamento Piura. Tiene una extensión aproximada de 3.473 km y constituye la rehabilitación y mejoramiento de la Av. Sánchez Cerro entre los tramos descritos por el nombre del proyecto (Ver **Figura 29**).

Figura 29. Ubicación del Proyecto, adaptado de Google Maps.

El mejoramiento consiste en la rehabilitación de la calzada existente y la construcción de veredas peatonales.

Para contar con una mayor precisión de los trabajos que se realizaran en el proyecto, así como una optimización de los procedimientos de rehabilitación, se ha dividido el proyecto dos tramos según sus características topográficas y geotécnicas, los cuáles son:

Tabla 23

Características de la rehabilitación en los tramos del proyecto

Tramo I	Tramo II
Av. Chulucanas – Óvalo Cáceres	Óvalo Cáceres – Av. Gullman
<ul style="list-style-type: none"> • Ampliación de calzada principal. • Construcción de veredas de concreto. • Pintado y señalización horizontal y vertical de la vía. 	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de auxiliares a lo largo del tramo. • Rehabilitación y ampliación de la calzada. • Construcción de veredas de concreto y martillos adoquinados. • Se incluye además la reubicación de postes de alumbrado público, postes de teléfono postes de media tensión y buzones de teléfono y desagüe (dichas reubicaciones serán asumidas por la entidad correspondiente). • Pintado y señalización horizontal y vertical de la vía. • Construcción de un paso a desnivel de 300 m. de luz aproximadamente.

Elaboración propia

La presente investigación está enfocada en la rehabilitación del Tamo II del proyecto, correspondiente al tramo comprendido entre el Óvalo Cáceres y la Av. Gullman, con una extensión aproximada de 1.80 km.

4.2 Clima

Piura posee un clima tropical y seco, con una temperatura promedio anual de 24°C, que en el verano supera los 35°C, pudiendo llegar hasta 40°C cuando se presenta el Fenómeno El Niño extraordinario. La época de lluvias es entre enero y marzo. En las zonas andinas el clima presenta noches frías y mañanas templadas. (Sucursal Piura del Banco Central de Reserva del Perú, 2016, p. 2)

En la región Piura, en su costa, presenta escasa presencia de lluvias; temperaturas máximas llegan a 36 °C en febrero y mínimas en 15 °C en el mes de Junio, en la costa, en general la temperatura promedio, es de 23 °C. (INGEMMET, 2011, p. 7)

Figura 30. Temperatura promedio anual de la región Piura. Adaptado de INEI – Sistema de información regional para la toma de decisiones

4.3 Geografía

La Región Piura presenta un territorio con una topografía muy variada y poco accidentada en la costa. En la Costa predominan llanuras desérticas como el desierto de Sechura ubicado al sur del Río Piura. En él se sitúa la depresión de Bayóvar, que es el área más baja del territorio peruano, con 37 m por debajo del nivel del mar. (INGEMMET, 2011, p. 6)

4.4 Geomorfología

Las formas geomorfológicas más comunes en la Costa, son las quebradas secas en las que el agua discurre en abundancia cuando las precipitaciones son intensas como las asociadas al fenómeno del “El Niño”. Sumamos a estos rasgos, las dunas en forma de media luna, los tablazos o terrazas marinas como las de Máncora, Talara y Lobitos las terrazas fluviales formadas por los ríos Chira y Piura y el antiguo relieve de Amotape. (INGEMMET, 2011, p. 6).

4.5 Evaluación de la condición actual del tramo en estudio

La Av. Sánchez Cerro está considerada como una vía de alto tránsito. El tramo en estudio (Tramo II), se desarrolla en condiciones de operación normal por tratarse de una vía urbana, las mismas que en su mayoría tienen tránsito en ambos sentidos.

En el ámbito de intervención, existe en un 90 % áreas con pavimento flexible, mientras que el 10% tiene pavimento rígido, los cuales presentan deterioro. El deterioro se presenta como fisuras longitudinales y transversales, desgaste de la superficie del pavimento, pérdida de material en el pavimento rígido, entre otros.

4.5.1 Exploración de campo

Durante la visita a la zona de estudio, se realizaron calicatas manuales para la extracción de muestras a profundidades variables de hasta 1.50 m a lo largo de la avenida de acuerdo a lo indicado en la Norma C.010 – Pavimentos Urbanos, en su última edición.

En las calicatas se realizó un perfilaje de los estratos de suelo, el cual incluyó el registro de las características de los materiales que lo conforman, la clasificación visual de los materiales encontrados de acuerdo con los procedimientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y AASHTO (Ver **Figura 31**).

Figura 31. Extracción de calicatas en el tramo en estudio.

Las muestras representativas de los suelos, debidamente protegidas e identificadas, han sido llevadas al laboratorio para su verificación y análisis, el cual reflejará los resultados de las condiciones estructurales actuales del pavimento y de la propuesta de rehabilitación en el Tramo II. En promedio, se pudo obtener el perfil del suelo característico del tramo en estudio (Ver **Figura 32**), aunque la principal restricción del proyecto es mantener el nivel actual de la vía para evitar interferencias con las instalaciones existentes (agua, luz, etc), así como la reconfiguración de los accesos a las viviendas y comercios existentes de la zona.

Figura 32. Estructura promedio del pavimento existente.

4.5.2 Condición actual del pavimento

Durante la visita al proyecto, se observó que en el Tramo II está compuesto por una vía principal y una auxiliar. La vía principal presenta un 90% de desgaste superficial del pavimento, con presencia de fisuras longitudinales y/o transversales, en algunos sectores hay presencia de oquedades y ondulaciones en el pavimento, una señal clara que la base ha fallado. Las vías auxiliares de este tramo se presentan en un 40% como trocha, el 40% restante está en mal estado desde el nivel de la base y un 20% presenta desgaste superficial.

Por otro lado, en la calzada principal no hay presencia de sardinel sumergido, y un 20% de los sardineles peraltados se encuentran en mal estado. Se realizó la identificación y evaluación de fallas del pavimento existente y estas se clasificaron en:

- a) **Fallas Estructurales:** La falla tiene característica de “bache profundo” formándose una cavidad en el pavimento. En el ámbito del estudio se incluyen en esta clasificación los baches en el pavimento, los hundimientos y el abultamiento.

b) **Agrietamiento en bloque:** Esta falla corresponde a una fractura del pavimento, lo cual produce agrietamientos que, por general, están interconectados como bloques. En el ámbito del presente estudio se incluyen en este tipo de falla a los siguientes:

- Estrías en el pavimento
- Fisura en bloque
- Fisura longitudinal
- Fisura transversal

c) **Peladuras:** Esta falla corresponde a la desintegración superficial del pavimento. Se incluyen en esta clasificación a las siguientes fallas:

- Pérdida de agregados
- Descascaramiento

Figura 33. Vista del cruce de la Av. Gullman con Av. Sánchez Cerro

Figura 34. Cruce de la Av. Gullman con la Av. Sánchez Cerro

Figura 35. Presencia de oquedades y sardineles peraltados en la calzada

Figura 36. Cruce de la Av. Sánchez Cerro con Av. Vice

4.5.3 Condición actual de las bermas

A lo largo de la Av. Sánchez Cerro se presentan separadores laterales; las cuáles son usadas para preservar las áreas verdes, así como los algarrobos de la zona, postes de alumbrado, avisos publicitarios, y, en algunos sectores, estacionamientos. Este uso produce que el espacio de circulación sea afectado, reduciendo el paso al tránsito de un solo vehículo.

Las bermas en la Av. Sánchez Cerro son de concreto, aunque en algunos tramos están conformadas por suelo compactado y en otros, han sido utilizadas como jardineras.

Figura 37. Berma lateral de la Av. Sánchez Cerro antes de la Av. Vice

4.5.4 Condición actual del sistema de drenaje

Inexistente. A pesar del riesgo existente en la zona debido a las inundaciones estacionales ocasionadas por el Fenómeno de “El Niño Costero”.

En el diseño se tomará en cuenta la existencia de drenaje y las condiciones climáticas de la zona para preservar la estructura del pavimento.

4.6 Estudio de tránsito¹²

Para el diseño del pavimento se requiere conocer previamente el efecto equivalente de las cargas del tráfico. Para ello se empleará el parámetro ESAL, el mismo que representa al número de aplicaciones equivalentes a una carga por eje simple de 18,000 libras en una pasada de un eje dado, durante 20 años como periodo de diseño.

La determinación de dicho parámetro se realiza a partir del número de vehículos de los diferentes tipos, tales como automóviles, buses, camiones que se prevén en la vía proyectada durante el periodo de diseño, y los factores de equivalencia de carga.

¹² La información presentada en este apartado fue tomada, parcialmente, del estudio realizado por el Instituto Metropolitano de planificación (2010), con proyecciones actualizadas por los autores.

El punto donde se efectuó el conteo para el tramo II, se estableció entre la Av. Cáceres hasta la Av. Gullman. En consecuencia, el IMD del tráfico asignado para el cálculo de los ejes equivalentes será el mostrado en la **Tabla 24**.

Tabla 24

Conteo vehicular de la Av. Sanchez Cerro – Tramo II

Conteo	Vehículos ligeros	Camioneta rural	Microbus	Bus	Camión	Trailer y semi t.
Unid. Veh. Diarios	8,002	521	505	150	175	44
Unid. Veh. Anuales	2'920,730	190,165	184,325	54,750	63,875	16,060

Nota: Adaptado del Instituto Metropolitano de planificación, 2010.

Con el fin de caracterizar la carga vehicular, se asumirá que, del total del conteo realizado, el 85% ocurre en la vía principal (**Tabla 25**) y el 15% restante será asignado a las vías auxiliares (**Tabla 26**), sugerido por el método de AASHTO. Adicionalmente, se incrementarán dichas cargas por un factor de seguridad igual al 20% del total.

Tabla 25

Conteo vehicular de la Av. Sanchez Cerro – Tramo II – Vía principal

Conteo	Vehículos ligeros	Camioneta rural	Microbus	Bus	Camión	Trailer y semi t.
Unid. Veh. anuales	2'482,621	161,640	156,676	46,538	54,294	13,651
Unid. Veh. An. FS 20%	2,979,145	193,968	188,012	55,845	65,153	16,381

Nota: Adaptado del Instituto Metropolitano de planificación, 2010.

Tabla 26

Conteo vehicular de la Av. Sanchez Cerro – Tramo II – Vías auxiliares

Conteo	Vehículos ligeros	Camioneta rural	Microbus	Bus	Camión	Trailer y semi t.
Unid. Veh. anuales	438,110	28,525	27,649	8,213	9,581	2,409
Unid. Veh. An. FS 20%	525,731	34,230	33,179	9,855	11,498	2,891

Nota: Adaptado del Instituto Metropolitano de planificación, 2010.

4.6.1 Cálculo de los ejes equivalentes

Para el cálculo de los ejes equivalentes de la vía en su conjunto se usó como periodo de diseño 20 años y la tasa de crecimiento se estimó conservadoramente en 2.7% para los autos, 1.8% para el transporte público y 4% para los camiones. Los factores destructivos fueron empleados del Reglamento Nacional de Vehículos del 2016.

PESOS Y MEDIDAS MÁXIMAS PERMITIDAS									
Configuración vehicular	Descripción gráfica de los vehículos	Longitud máxima (m)	Peso máximo (ton)				Peso bruto máximo (ton)	Factor Destructivo por Carga	
			Eje delantero	Conjunto de ejes posteriores					
				1°	2°	3°	4°		
C2		12.3	7	11	--	--	--	18	4.56762
C3		13.2	7	18	--	--	--	25	3.28458
C4		13.2	7	23	--	--	--	30	2.28295
T2S2		20.5	7	11	18	--	--	36	7.86987
T2S3		20.5	7	11	25	--	--	43	5.98804
T3S2		20.5	7	18	18	--	--	43	6.58683
T3S3		20.5	7	18	25	--	--	48(2)	4.70500
C2R2		23.0	7	11	11	11	--	40	11.17212
C2R3		23.0	7	11	11	18	--	47	9.88908
C3R2		23.0	7	18	11	11	--	47	9.88908
C3R3		23.0	7	18	11	18	--	48(2)	8.60604
B2		13.2	7	11	--	--	--	18	4.56762
B3-1		14.0	7	16	--	--	--	23	2.28295

Figura 38. Pesos y medidas máximas permitidas, adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2016.

Por otro lado, se ha tomado en cuenta para esta rehabilitación un horizonte de diseño de 20 años, para el cálculo de los ejes equivalentes, la cual es mostrada en la **Tabla 27**. Además, se ha tomado en consideración tasas de crecimiento de 6.90%, tanto para los vehículos exclusivos para el transporte de pasajeros como para el transporte de carga.

Tabla 27

Ejes estándar de carga equivalente para la Av. Sánchez Cerro – Tramo II

	Años	Buses		Camiones			Semitrailers				Trailers				ESAL	
		2E	> 2E	2E	3E	4E	2S1 / 2S2	2S3	3S1 / 3S2	≥ 3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	Anual	Acumulado
2010	0	953	206	841	283	58	21	50	49	129	0	0	25	1	2.319E+06	2.319E+06
2015	5	1330	288	1174	395	81	30	70	69	180	0	0	35	2	3.237E+06	5.556E+06
2020	10	1857	402	1640	552	113	41	98	96	252	0	1	49	3	4.519E+06	1.008E+07
2025	15	2592	561	2289	771	157	58	137	135	351	0	1	68	4	6.308E+06	1.638E+07
2030	20	3618	783	3195	1076	220	80	192	188	491	0	1	95	5	8.806E+06	2.519E+07

Nota: Adaptado del Instituto Metropolitano de planificación, 2010.

Finalmente, se calcularon los ESAL de diseño, tomando en cuenta el factor de carril (0.80) y el factor de berma (0.60), los cuales se muestran en la **Tabla 28**.

Tabla 28

ESALs de diseño para la Av. Sánchez Cerro – Tramo II

	ESAL original	ESAL en carril	ESAL en berma
5 años	5.556E+06	4.444E+06	2.667E+06
10 años	1.008E+07	8.059E+06	4.835E+06
15 años	1.638E+07	1.311E+06	7.863E+06
20 años	2.519E+07	2.015E+07	1.209E+07

Nota: Adaptado del Instituto Metropolitano de planificación, 2010.

5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

5.1 Ensayos de laboratorio

Se realizaron ensayos en el laboratorio, ubicado en la ciudad de Lima, a partir de las muestras de suelos obtenidas, siguiendo los procedimientos de los métodos de ensayos de la American Society for Testing Material (ASTM) y las Normas Técnicas Peruanas (NTP) vigentes. Los resultados de os ensayos efectuados se listan a continuación:

Ensayo de propiedades índice

• Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D 422
• Análisis granulométrico por sedimentación	ASTM D 422
• Límites de Atterberg	ASTM D 4318
• Contenido de Humedad	ASTM D 2216
• Clasificación Unificada de Suelos SUCS	ASTM D 2487
• Clasificación AASHTO	ASTM D 3282

Ensayos especiales en el suelo

• Gravedad específica y absorción del agregado	ASTM C127
• Proctor modificado	ASTM D 1557
• California Bearing Ratio (CBR)	ASTM D 1883

En el **Anexo 1** se presentan los resultados completos de los ensayos realizados en el laboratorio a las muestras extraídas en campo.

Es importante resaltar que durante las investigaciones geotécnicas realizadas no se encontró presencia de agua como infiltración o napa freática en la profundidad investigada. Por lo cual, se procedió a obtener las propiedades de los materiales encontrados in situ y la ejecución del diseño sin la consideración de la presión ejercida por el fluido.

5.1.1 Ensayos de propiedades índice en pavimento existente

La ejecución de estos ensayos se ha realizado a partir de las muestras de suelo obtenidas en el pavimento existente durante los trabajos de campo. Si bien se ha clasificado al material según SUCS y AASHTO, se debe tener presente que no es un suelo encontrado naturalmente, sino material granular que cumple con determinadas características físicas y químicas para la conformación del pavimento (el cual, debido al transcurrir de los años, incremento en las cargas de tránsito, intemperismo, y otros factores, ha podido sufrir desgaste), por lo que cualquier descripción no será fiel a lo indicado por bibliografía y/o normativa vigente.

En la **Tabla 29** se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 29

Resumen de resultados de los ensayos de propiedades índice en muestras del pavimento existente

Descripción de la muestra	Muestra	Profundidad (m)	SUCS	AASHTO	Análisis Granulométrico			Límites de Atterberg			W (%)
					Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
BASE	M-1	0.07 – 0.18	GC-GM	A-2-6 (0)	60.45	26.40	13.15	29	18	11	6.91
SUBBASE	M-2	0.18 – 0.50	SC-SM	A-2-6 (0)	35.89	49.31	14.80	27	16	11	5.20
NATURAL	M-3	0.50 – 1.05	CL	A-4 (0)	2.40	47.32	50.28	0	NP	NP	6.29

Elaboración propia.

Donde:

W	:	Contenido de humedad
LL	:	Límite líquido
LP	:	Límite plástico
IP	:	Índice de plasticidad
SUCS	:	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

La anterior tabla muestra los resultados obtenidos para determinar las propiedades de los materiales. Como se puede apreciar, la base y la subbase del pavimento flexible existente está conformado por material granular principalmente, mientras que el suelo natural o subrasante está conformado.

5.1.2 Ensayos de propiedades especiales existente

Es importante mencionar que se realizaron los ensayos de CBR de los suelos en su estado actual, tomando como datos los obtenidos de los ensayos de compactación de Proctor modificado a un 95% de la máxima densidad seca (M.D.S.). Los resultados de los ensayos especiales se presentan en el **Tabla 30**.

Tabla 30

Resumen de resultados de los ensayos de propiedades especiales en muestras del pavimento existente

Descripción de la muestra	Muestra	Profundidad	SUCS	AASHTO	Compactación proctor modificado	
					MDS (g/cm ³)	OCH (%)
BASE	M-1	0.07 – 0.18	GC-GM	A-2-6 (0)	2.132	7.00
SUBBASE	M-2	0.18 – 0.50	SC-SM	A-2-6 (0)	2.128	8.50
NATURAL	M-3	0.50 – 1.05	CL	A-4 (0)	2.184	14.50

Elaboración propia.

De acuerdo con la normativa vigente por el MTC para el diseño de carreteras, los materiales encontrados no cumplen con la clasificación establecida para conformar una base o subbase, por lo cual se puede interpretar que estos han sufrido un desgaste con el paso de los años, posiblemente ocasionados por el aumento del tráfico, intemperismo u otros relacionados.

5.1.3 Ensayos de propiedades índice para obtención de diseño del RAP

Para la determinación del espesor óptimo de la base reciclada mecánicamente (RAP) se realizaron diversos ensayos en el laboratorio con la finalidad de obtener las propiedades índices y de resistencia a las cargas del RAP, manteniendo como espesor uniforme la carpeta asfáltica (7 cm) y mezclando la subbase del pavimento existente hasta obtener espesores de 15 cm, 20 cm y 25 cm respectivamente.

Estos ensayos servirán como control para la ejecución de ensayos posteriores a calicatas realizadas en diversos tramos de la vía con el espesor óptimo del reciclado.

Tabla 31

Resumen de los ensayos de propiedades índice en muestras de RAP

Calicata	Muestra	SUCS	AASHTO	Análisis Granulométrico			Límites de Atterberg			W (%)
				Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
RAP	15 cm	GP	A-1-a (0)	64.39	24.48	11.13	24	NP	NP	6.00
RAP	20 cm	GP	A-1-b (0)	60.32	27.74	11.94	26	NP	NP	5.86
RAP	25 cm	GP	A-1-a (0)	57.03	32.08	10.89	23	NP	NP	6.29

Elaboración propia.

Los resultados muestran que el material obtenido a partir del reciclado se encuentra dentro del rango establecido por el MTC para capas de soporte de pavimentos rígidos (suelo granular con granulometría entre A-1-a y A-1-b).

5.1.4 Ensayos de propiedades especiales para obtención de diseño del RAP

Tabla 32

Resumen de los ensayos de propiedades especiales en muestras de RAP

Calicata	Muestra	SUCS	AASHTO	Compactación proctor modificado		CBR (California Bearing Ratio)	
				MDS (g/cm ³)	OCH (%)	95% MDS	100% MDS
RAP	15 cm	GP	A-1-a (0)	2.116	8.00	7.90	9.40
RAP	20 cm	GP	A-1-b (0)	2.112	2.10	7.14	9.50
RAP	25 cm	GP	A-1-a (0)	2.042	7.80	5.57	7.80

Elaboración propia.

De acuerdo a la tabla anterior, se ha podido determinar que el espesor óptimo de diseño del RAP es de 15 cm (máximo valor del CBR a la muestra de control). Se puede observar que mientras mayor sea la cantidad de subbase mezclada, el valor de CBR disminuye, por lo cual, el valor del CBR tiende a disminuir; sin embargo, un análisis de sensibilidad para la evaluación de esos cambios no es parte del alcance de la presente investigación.

Como se indicó anteriormente, el ensayo para la determinación del espesor óptimo fue ejecutado como muestra de control. Sin embargo, se ha realizado una mayor ejecución de ensayos a muestras obtenidas en progresivas continuas para la determinación del CBR promedio de la vía. A continuación, se presentará un resumen de los resultados:

Tabla 33

Resumen de ensayos de adicionales en muestras de RAP

Calicata (Progresiva)	Muestra	SUCS	AASHTO	Compactación proctor modificado		CBR (California Bearing Ratio)	
				MDS (g/cm ³)	OCH (%)	95% MDS	100% MDS
01+690	15 cm	GP	A-1-a (0)	2.229	12.4	31.60	37.6
01+910	15 cm	GP	A-1-b (0)	2.197	11.8	10.9	13.0
02+130	15 cm	GP	A-1-a (0)	2.224	12.1	26.3	31.3
02+350	15 cm	GP	A-1-a (0)	2.146	9.7	7.50	8.90
02+570	15 cm	GP	A-1-b (0)	2.132	6.5	3.30	3.90
02+790	15 cm	GP	A-1-a (0)	2.182	9.8	8.38	10.0
03+010	15 cm	GP	A-1-b (0)	2.192	10.3	9.90	11.8

Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en las distintas progresivas de la vía, se podrá realizar la configuración de los tramos para el diseño del pavimento rígido.

5.2 Especificaciones técnicas de las fibras

Las características de las fibras utilizadas y sus propiedades se muestran en la **Tabla 34**.

Tabla 34

Especificaciones técnicas de las fibras de acero utilizadas para el diseño

FIBRA WIRAND FF3		
Dimensiones	Diámetro D	0.75 mm
	Largo L	50 mm
	Relación de Esbeltez L/D	67
Características mecánicas	Tensión de ruptura por tracción de alambre	> 1200 MPa
	Elongación a la ruptura	< 4%

Nota: Adaptado de Maccaferri, 2018.

5.3 Criterios de diseño

A partir de los valores más conservadores de las variables de análisis se han obtenido los criterios de diseño para el cálculo de las cargas actuantes sobre el piso, los cambios de temperatura, y los esfuerzos de retracción que están presentes en el concreto para su ingreso a los programas de diseño.

Tabla 35

Criterios de diseño de acuerdo a la metodología utilizada

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR		
		AASHTO	PCA	TR34/3
Criterios generales				
Periodo de diseño	años	20	20	20
Confiabilidad (R)	%	90	-	-
Desviación Estándar Normal (Zr)	-	-1.282	-	-
Desviación Estándar (So)	-	0.35	-	-
ESAL	-	2.00 E+07	-	-
Tasa de crecimiento	%	6.90	6.90	6.90
Factor de proyección	-	1.80	1.80	1.80
Número de carriles por sentido	und	2.00	2.00	2.00
Factor de sentido	-	0.50	0.50	-
Coeficiente de drenaje	-	1.00	-	-
Coeficiente de transferencia de carga	-	3.20	-	-
Serviciabilidad Inicial (Po)	-	4.50	-	-
Serviciabilidad Final (Pt)	-	2.50	-	-
Datos del suelo				
Espesor base reciclada	mm	150	150	150
Kcombinado – Tramo IIa	pci	820	820	820
Kcombinado – Tramo IIb	pci	490	490	490
Datos del concreto				
Resistencia a la compresión (f'c)	Kg/cm2	350	350	C 35/45
Coeficiente de Poisson	-	0.20	0.20	0.20
Coeficiente de fricción	-	1.30	1.30	
Módulo de Young o elasticidad (Ec)	Kg/cm²	280,624.30 (27,519.9 MPa)		
Módulo de rotura (s'c)	Kg/cm²	46.60 (4.60 MPa)		
Coef. de temperatura (α)	1/k	0.000012		
Gradiente de temperatura (ΔT)	°C	7.00		

Elaboración propia.

6 DISEÑO DE PAVIMENTOS

6.1 Método de las diferencias acumuladas

Cuando existen distintos valores de CBR, la AASHTO (1993) propuso un método para evaluar y diseñar los pavimentos por tramos divididos por el promedio de los CBR obtenidos bajo dicha metodología, siendo calculados en la siguiente tabla para la determinación del número de tramos y el CBR de diseño de los mismos.

Tabla 36

Determinación de los tramos de diseño del proyecto por el método de las diferencias acumuladas

Calicata	Prog.	CBR 95%	Dist. Entre intervalo	Dist. Acum.	Intervalo prom.	Área del intervalo	Área acum.	Zx	CBR prom (%)
1	01+690	31.6	220	220	31.60	6952	6952	3535	
2	01+910	10.9	220	440	21.25	4675	11627	4793	22.93
3	02+130	26.3	220	660	18.60	4092	15719	5467	
4	02+350	7.5	220	880	16.90	3718	19437	5768	
5	02+570	3.3	220	1100	5.40	1188	20625	3539	7.27
6	02+790	8.38	220	1320	5.84	1285	21910	1406	
7	03+010	9.9	220	1540	9.14	2011	23921	0	

Elaboración propia.

Los valores antes obtenidos se grafican y se evalúa la tendencia de los mismos.

Figura 39. Gráfico del método de las diferencias acumuladas para el tramo II

6.2 Determinación del coeficiente de balasto combinado

Para el diseño del pavimento rígido, se requiere obtener el coeficiente de balasto combinado ($k_{\text{combinado}}$) de los materiales en los cuales se apoyará la losa de concreto. Este será determinado a partir del ábaco de la AASHTO con los parámetros obtenidos previamente en el laboratorio y por el método de las diferencias acumuladas, tanto para los suelos que conformarán la subrasante y la subbase reciclada.

El módulo elástico de la subbase ha sido obtenido de las recomendaciones de (McCarthy, 2014) para un suelo de arena y grava media (A-1-a y A-1-b) con un $E = 145000$ KPa.

Figura 40. Determinación del coeficiente de balasto para el tramo IIa

Del ábaco anterior, se ha determinado que el coeficiente de balasto ($K_{\text{combinado}}$) para el tramo IIa es 820 pci, equivalente a 0.223 N/mm³ o 223 MPA/m.

Como se puede apreciar en la **Figura 42**, el espesor óptimo de la losa para el Tramo IIa es de 0.251 m, mientras que para el tramo IIb es de 0.263 m. Sin embargo, teniendo en consideración el proceso constructivo, se debe considerar 0.30 m para ambos tramos¹³.

Concrete Pavement Design/Analysis Inputs (Tramo IIa)			Concrete Pavement Design/Analysis Inputs (Tramo IIb)		
Concrete Thickness	251.05	mm	Concrete Thickness	262.34	mm
Total Rigid ESALs	20,000,000		Total Rigid ESALs	20,000,000	
Reliability	90.00	%	Reliability	90.00	%
Overall Standard Deviation	0.35		Overall Standard Deviation	0.35	
Flexural Strength	4.6	MPa	Flexural Strength	4.6	MPa
Modulus of Elasticity	27,519.9	MPa	Modulus of Elasticity	27,519.9	MPa
Load Transfer Coefficient	3.20		Load Transfer Coefficient	3.20	
Modulus of Subgrade Reaction	223.0	MPa/m	Modulus of Subgrade Reaction	133.0	MPa/m
Drainage Coefficient	1.00		Drainage Coefficient	1.00	
Initial Serviceability	4.50		Initial Serviceability	4.50	
Terminal Serviceability	2.50		Terminal Serviceability	2.50	

Figura 42. Determinación del espesor de la losa por el método AASHTO para el tramo IIa (izquierda) y IIb (derecha) utilizando el software de diseño WinPas

De igual manera, el espesor óptimo de la losa para el Tramo IIb es de 0.263 m, de acuerdo con la metodología AASHTO 1993.

6.3.2 Método de la PCA

PCA-Cálculo es un programa encargado del diseño de la losa de pavimentos rígidos por la metodología del PCA (1984), desarrollado en la Universidad del Valle por el Ing. Jefferson Castro Mesa y el Ing. Armando Orobio. El Software utiliza los parámetros del suelo, concreto y acero para el diseño de la losa y el refuerzo.

Para el cálculo de los espesores del pavimento por el método del PCA, se utilizó los valores de la **Tabla 35**, según la cantidad y características de los tramos obtenidos por el método de las diferencias acumuladas.

¹³ El proceso constructivo utiliza múltiplos de 5, por lo cual se debe considerar un valor superior al calculado, debido a que al considerar uno menor, se estaría sub dimensionando la losa para las cargas aplicadas.

Datos generales	Tránsito	Análisis																												
Proyecto: <input type="text" value="Propuesta de diseño estructural del pavimento"/> Descripción: <input type="text" value="Tramo Ila"/>	Factor de seguridad: <input type="text" value="1.2"/> Tipo de Ejes: <input type="text" value="Ejes Simples"/>	<div>Calcular</div> <div> Espesor de losa : 235 mm Módulo de rotura : 4.60 kPa K del conjunto : 231 MPa/m Período de diseño : 20 años Porcentaje de fatiga 65.12 Porcentaje de erosión 13.05 Recomendación para barras de anclaje: Longitud: 65 cm Separación entre barras: 70 cm Recomendación para pasadores (fy=60 ksi): Longitud: 45 cm Separación entre barras: 30 cm Diámetro de barras: 3.18 cm </div> <div>Análisis de sensibilidad</div> <div> <div>Guardar</div> <div>Abrir</div> <div>TXT</div> <div>Salir</div> </div>																												
Período de diseño : 20 años Espesor de la losa : 235 mm Módulo de rotura : 4.60 MPa Dovelos: ☒ Si ☐ No Bermas : ☐ Si ☒ No	Ejes Simples kN <table border="1"> <thead> <tr> <th>Carga</th> <th>Repeticiones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>214</td><td>1825</td></tr> <tr><td>160</td><td>35624</td></tr> <tr><td>152</td><td>49030</td></tr> <tr><td>75</td><td>50575</td></tr> <tr><td>45</td><td>138510</td></tr> <tr><td>20</td><td>6616715</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>		Carga	Repeticiones	214	1825	160	35624	152	49030	75	50575	45	138510	20	6616715	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga	Repeticiones																													
214	1825																													
160	35624																													
152	49030																													
75	50575																													
45	138510																													
20	6616715																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
Módulo de reacción de la subrasante (K) Subrasante ☒ Ingreso directo K = 223 MPa/m ☐ Correlación con CBR CBR =	Barras de anclaje Diámetro de barra: <input type="text" value="3/8"/> in Acero (fy): <input type="text" value="420"/> MPa Ancho de carril: <input type="text" value="3.05"/> m																													
☒ Subbase Espesor : 150 mm ☒ Sin tratar ☐ Tratada con cemento																														

Figura 43. Determinación del espesor de la losa por el método de la PCA para el tramo Ila, utilizando el software de diseño PCA-Cálculo

La Figura 43 muestra los resultados obtenidos para una losa de 200 mm, en el tramo Ila, en el cual se aprecia la fatiga y erosión de acuerdo con los parámetros ingresados. Por otro lado, la Figura 44 muestra el análisis para el tramo Iib, bajo las mismas condiciones.

Datos generales	Tránsito	Análisis																												
Proyecto: <input type="text" value="Propuesta de diseño estructural del pavimento"/> Descripción: <input type="text" value="Tramo Ila"/>	Factor de seguridad: <input type="text" value="1.2"/> Tipo de Ejes: <input type="text" value="Ejes Simples"/>	<div>Calcular</div> <div> Espesor de losa : 255 mm Módulo de rotura : 4.60 kPa K del conjunto : 141 MPa/m Período de diseño : 20 años Porcentaje de fatiga 40.60 Porcentaje de erosión 7.31 Recomendación para barras de anclaje: Longitud: 65 cm Separación entre barras: 60 cm Recomendación para pasadores (fy=60 ksi): Longitud: 45 cm Separación entre barras: 30 cm Diámetro de barras: 3.49 cm </div> <div>Análisis de sensibilidad</div> <div> <div>Guardar</div> <div>Abrir</div> <div>TXT</div> <div>Salir</div> </div>																												
Período de diseño : 20 años Espesor de la losa : 255 mm Módulo de rotura : 4.60 MPa Dovelos: ☒ Si ☐ No Bermas : ☐ Si ☒ No	Ejes Simples kN <table border="1"> <thead> <tr> <th>Carga</th> <th>Repeticiones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>214</td><td>1825</td></tr> <tr><td>160</td><td>35624</td></tr> <tr><td>152</td><td>49030</td></tr> <tr><td>75</td><td>50575</td></tr> <tr><td>45</td><td>138510</td></tr> <tr><td>20</td><td>6616715</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>		Carga	Repeticiones	214	1825	160	35624	152	49030	75	50575	45	138510	20	6616715	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga	Repeticiones																													
214	1825																													
160	35624																													
152	49030																													
75	50575																													
45	138510																													
20	6616715																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
0	0																													
Módulo de reacción de la subrasante (K) Subrasante ☒ Ingreso directo K = 133 MPa/m ☐ Correlación con CBR CBR =	Barras de anclaje Diámetro de barra: <input type="text" value="3/8"/> in Acero (fy): <input type="text" value="420"/> MPa Ancho de carril: <input type="text" value="3.05"/> m																													
☒ Subbase Espesor : 150 mm ☒ Sin tratar ☐ Tratada con cemento																														

Figura 44. Determinación del espesor de la losa por el método de la PCA para el tramo Iib, utilizando el software de diseño PCA-Cálculo

De acuerdo con lo establecido por la metodología del PCA para el diseño de pavimentos rígidos, tanto el porcentaje de fatiga como de erosión, deben ser menores al 100% para determinar un espesor óptimo. En la **Tabla 37** se muestran los resultados obtenidos para distintos espesores de losa:

Tabla 37

Determinación del espesor óptimo del pavimento según el método de la PCA

Tramo	K _{combinado} (MPa/m)	Espesor de la losa (mm)	Coef. De seguridad	Porcentaje de fatiga	Porcentaje de erosión
IIa	223	200	1.20	6375.37%	51.73%
IIa	223	220	1.20	386.80%	22.99%
IIa	223	230	1.20	116.54%	15.71%
IIa	223	235	1.20	65.12%	13.05%
IIa	223	240	1.20	36.55%	10.87%
IIb	133	220	1.20	2594.53%	26.25%
IIb	133	230	1.20	696.10%	17.93%
IIb	133	240	1.20	213.42%	12.42%
IIb	133	250	1.20	70.20%	8.70%
IIb	133	255	1.20	40.60%	7.31%

Elaboración propia.

Los resultados establecen que el espesor óptimo, de acuerdo al método de la PCA, es de 235 mm para el tramo IIa y 250 mm para el tramo IIb.

6.3.3 Método de la “Yield Line Theory” basado en el TR N° 34

El software PAVE 2008 se encarga de la verificación del diseño de losas fibroreforzadas, generalmente de talleres, sin embargo, utilizada la teoría descrita en el TR N° 34. El software verifica los estados límites de servicio, último y de punzonamiento. Algunos datos adicionales para el diseño de la losa reforzada con fibras han sido los siguientes:

- Espesor de losa (h): 0.20 m
- F'c del concreto: 350 kg/cm²
- Factor de resistencia residual: 55%
- Tipo de fibra: Wirand FF3
- Dosificación de fibras: 20 kg/m³
- Espaciamiento entre juntas Lx: 6.00 m
- Espaciamiento entre juntas Ly: 6.00 m

El espesor se calcula mediante iteraciones que aseguren las condiciones establecidas en la **Tabla 35**, variando el espesor de la losa y la dosificación de las fibras utilizadas (Ver **Figura 45**), para asegurar la resistencia a la flexión y al punzonamiento de la losa. Analizando el factor de seguridad en los tres puntos críticos de aplicación de las cargas para losas (interno, borde y esquina) (Ver **Figura 46**). Los resultados y el espesor de diseño obtenido se muestran en la **Tabla 38**.

Información del Proyecto

Datos de Entrada

Informaciones del Sistema

Condiciones de la subrasante

Cargas

Espeor de la Losa h 150 mm Módulo de sección W_c 3750 mm³/mm

Clase del Concreto C 35/45 Módulo de Young E_c 34077 MPa f_{ck} 35 MPa

Módulo de Rotura $f_{ctk,d}$ 4.50 MPa f_{cu} 45 MPa

Coefficiente de Poisson ν 0.20 Factor de Encogimiento ϵ_{sh} 0.02 ‰

Espaciamiento entre juntas L_x 6.00 m Área del Paño 36 m²

Espaciamiento entre juntas L_y 6.00 m

Gradiente de Temperatura ΔT 7.00 °C Coef. de Temperatura α_T 0.000012 1/K

Coeficiente de Fricción μ 1.3 Base granular

Construcción ☐ Sin juntas ☒ Con juntas de control

Fibra de Acero Wirand® FF3 Dosificación 20 kg/m³ Re,3 55.0 %

Fibra de PP Fibromac® 0 Dosificación 0 g/m³

C 35/45

FF3

20 kg/m³

$h = 150$ mm

$k = 0.223$ N/mm³

Con juntas de control

Código: EC 2 / TR34/3

Figura 45. Valores de diseño para la determinación del espesor de la losa reforzada con fibras, utilizando el software de diseño PAVE 2008

Información del Proyecto

Datos de Entrada

Informaciones del Sistema

Condiciones de la subrasante

Cargas

Verificación ELU

Verificación ELS

Capacidad a flexión

Capacidad al punzonado

Cargas

Cargas	Posición	Juntas	Resultados
Simple/doble carga puntual	Interior	---	P_{act} kN
Sistema de Estanterías	Interior	---	P_{act} kN
Montacarga	Interior	---	P_{act} kN
Camión	Esquina	Libre + Pasajunta	P_{act} 113.60 kN
Combinación	Posición	Junta	Resultado
Camión	Esquina	Libre + Pasajunta	P_{Des} 113.60 kN

Verificación en la cara de la carga

Capacidad última al punzonado P_{uV} 788.86 kN

Factor de seguridad global. Cara de Carga P_{uV}/P_{Des} 6.94

Verificación en el perímetro crítico

Capacidad última al punzonado P_{uV} 189.74 kN

Factor de seguridad. Perímetro Crítico P_{uV}/P_{Des} 1.67

C 35/45

FF3

20 kg/m³

$h = 200$ mm

$k = 0.074$ N/mm³

Con juntas de control

Código: EC 2 / TR34/3

Figura 46. Verificación de la resistencia a la flexión y al punzonamiento de la losa con los valores previamente establecidos, utilizando el software de diseño PAVE 2008

El *software* calcula la capacidad de soporte última ante las cargas actuantes, las cuales pueden ser puntuales, múltiples o distribuidas; adoptando la situación más crítica para obtener el momento máximo negativo.

Los resultados de la verificación por flexión en el *software* muestran las cargas ingresadas como un factor de seguridad para el sistema analizado. Además, el programa asume como carga de diseño P_{des} a la carga con menor valor de factor de seguridad.

Por último, realiza la verificación por punzonamiento que si bien no es crítica cuando la carga se ubica en la zona interna, eso no ocurre cuando se encuentra al borde o en la esquina de la losa, por lo que el factor de seguridad relacionado con la capacidad de soporte del suelo y la situación de carga más crítica debe ser mayor a 1.2.

Es importante recalcar que la dosificación de fibras utilizada ha variado entre 20 y 50 kg/m³ para la ejecución del diseño en el tramo de estudio (Tramo II), teniendo en consideración los valores recomendados por el *Technical Report N° 34*, se ha verificado el cumplimiento de los factores de seguridad global del sistema, así como la resistencia ante la flexión y el punzonamiento. El análisis realizado para el cálculo del espesor óptimo de la losa es mostrado en la **Tabla 39**.

6.3.4 Resultados de diseño de acuerdo a la metodología

En la **Tabla 38**, se puede apreciar un resumen de los espesores óptimos de diseño según la metodología aplicada en la presente investigación

Tabla 38

Resumen del diseño de la losa de concreto según la metodología

Metodología empleada	Espesor de la base reciclada (mm)	Tramo	$K_{combinado}$ (MPa/m)	Óptimo espesor de la losa (mm)
AASHTO	150	IIa	223	252
1993	150	IIb	133	262
PCA	150	IIa	223	235
1984	150	IIb	133	250
TR34/3	150	IIa	223	200
	150	IIb	133	200

Elaboración propia.

Tabla 39

Determinación del espesor óptimo del pavimento según el método de la “Yield Line Theory”

Tramo	Condición de diseño	Peso Bruto Máx (ton)	Posición de la carga	f'c del concreto	Espesor de la losa (mm)	Coef. De seguridad	Kcombinado (N/mm3)	Tipo de fibra	Dosificación de Fibras (kg/m3)	Factores de seguridad	
										Flexión	Punzonamiento (Per. Crítico)
IIA	Camión C4 - Eje Tridem + Ruedas Dobles (T3S3)	48	Interior	350	150	1.60	0.223	FF3	20	1.94	1.94
		48	Borde	350	150	1.60	0.223	FF3	30	1.70	1.88
		48	Esquina	350	150	1.60	0.223	FF3	50	1.15	1.56
		48	Interior	350	180	1.60	0.223	FF3	20	2.74	2.57
		48	Borde	350	180	1.60	0.223	FF3	20	1.99	1.97
		48	Esquina	350	180	1.60	0.223	FF3	50	1.59	2.04
		48	Interior	350	200	1.60	0.223	FF3	20	3.39	3.03
		48	Borde	350	200	1.60	0.223	FF3	20	2.41	2.31
		48	Esquina	350	200	1.60	0.223	FF3	30	1.73	2.08
		48	Interior	350	150	1.60	0.133	FF3	20	1.91	1.94
IIB	Camión C4 - Eje Tridem + Ruedas Dobles (T3S3)	48	Borde	350	150	1.60	0.133	FF3	50	1.27	1.73
		48	Esquina	350	150	1.60	0.133	FF3	50	1.11	1.56
		48	Interior	350	180	1.60	0.133	FF3	20	2.70	2.57
		48	Borde	350	180	1.60	0.133	FF3	30	1.61	1.96
		48	Esquina	350	180	1.60	0.133	FF3	20	1.54	2.04
		48	Interior	350	200	1.60	0.133	FF3	20	3.34	3.03
		48	Borde	350	200	1.60	0.133	FF3	20	1.70	1.83
		48	Esquina	350	200	1.60	0.133	FF3	30	1.68	2.08

Elaboración propia.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo contiene las conclusiones de la investigación, así como lo sobre la comparación de los resultados obtenidos por las distintas metodologías aplicadas para el diseño del pavimento rígido, procurando obtener el menor espesor que solucione los problemas de nivel generados por la rehabilitación del pavimento existente, el cual debe ser menor a 22 cm.

7.1 Conclusiones

Las condiciones actuales del pavimento existente en el tramo del proyecto presentan distintas fallas que han evolucionado con el paso de los años, presentando una tipología variada que puede ser clasificada en: falla superficial y falla estructural. Estas fallas están presentes a lo largo de la vía principal y vías auxiliares, presentando hasta un 90% de desgaste superficial en el primer caso, mientras que, en las vías auxiliares, el 40% está conformado por trocha carrozable en malas condiciones y el 60% no cuenta con mínimos niveles de serviciabilidad.

Ante esta situación, se realizó el diseño del pavimento que permita rehabilitar y reforzar el sistema ante las nuevas solicitudes de carga producidas por el incremento del tránsito vehicular, realizando una base reciclada que permita reducir los tiempos de ejecución del proyecto, reduciendo el impacto ambiental generado por la explotación y disposición de material pétreo y evitando las interferencias ocasionadas por los servicios públicos. Concluyendo que el espesor óptimo del RAP es de 20 cm, como se muestra en la **Tabla 32**.

Es importante destacar que el material de la subbase existente presenta mayor porcentaje de arena fina, con lo cual es posible una disminución en el valor de la resistencia del CBR. Existen investigaciones que presentan casos distintos a los obtenidos. Sin embargo, el análisis de este comportamiento no es alcance de la presente investigación.

Por otro lado, la **Tabla 38** muestra un resumen de los espesores de la losa de concreto obtenidos por las distintas metodologías aplicadas en el estudio, siendo el diseño de losa reforzada con fibras el que presenta un menor espesor de diseño y que cumple con las condiciones requeridas del presente estudio, solucionar los problemas de nivel generados por la rehabilitación del pavimento, la cual debe ser menor a 22 cm.

De igual manera, es importante recalcar que aún con valores de coeficiente de balasto menores en el tramo IIb, el espesor de la losa de concreto reforzado con fibras se ha mantenido, por lo cual se recomienda realizar un análisis de sensibilidad a la metodología del *Technical Report N° 34* en futuras investigaciones.

En resumen, para determinar si el diseño del espesor de la losa es competente para el proyecto se deben tomar en cuenta los niveles existentes de la vía y valor económico que este representa. Teniendo en consideración que se ha reciclado solo 20 cm del pavimento existente, es importante tomar en cuenta que el uso de una losa de menor espesor (200 mm) es la solución técnica y económicamente viable para el proyecto, ya que al reducir un 25% del volumen de concreto de una losa de 262 mm, se tendría un ahorro de costos significativo tomando en cuenta el costo implicado en la compra de las fibras metálicas.

7.2 Recomendaciones

Durante la etapa de ejecución del proyecto se recomienda que se realicen controles de calidad para asegurar el valor del CBR de diseño de la base reciclada con la finalidad de garantizar el buen desempeño del pavimento. De igual manera, se deberá colocar una pendiente del 2% para la evacuación de las aguas pluviales que permita asegurar el drenaje superficial en periodos prolongados de lluvia, hacia el terreno natural o cunetas proyectadas en el proyecto.

Por otro lado, se recomienda profundizar el alcance de la presente investigación mediante un análisis de sensibilidad, que permita determinar la aplicabilidad de cada metodología según las condiciones a las que se encuentra expuesto el pavimento o, utilizar factores que permitan obtener parámetros de diseño adaptados a la realidad nacional.

|

8 REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) [Estados Unidos]. (2000). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. (Trad. Á. Espinoza)
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). *Guide Design for Pavement Structures* (Vol. I). (Trad. A. Espinoza) Washington DC, USA: AASHTO.
- American Concrete Institute (ACI). (1988). *ACI 544.4R-88. Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. (Trad. Á. Espinoza) Recuperado de http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/5444r_88.pdf (Consulta: 24 de Julio del 2019)
- American Concrete Institute (ACI). (2018). *ACI 544.4R-18. Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete*. (Trad. Á. Espinoza) Recuperado de https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/544.4R-18_preview.pdf (Consulta: 24 de Julio del 2019)
- American Concrete Pavement Association (ACPA). (2003). *Fiber Reinforced Concrete Pavement*. (Trad. Á. Espinoza) Recuperado de <http://1204075.sites.myregisteredsite.com/downloads/RT/RT4.10.pdf> (Consulta: 24 de Julio del 2019)
- ASTM International. (2006). *ASTM A 820/A 820M - 06: Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*. (Trad. Á. Espinoza) Recuperado de <http://www.fiberconfiber.com/pdf/Shotcrete%20Catalog.pdf> (Consulta: 24 de Julio del 2019)
- Céspedes, J. (2002). *Los pavimentos en las vías terrestres: calles, carreteras y aeropistas*. Cajamarca, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Céspedes, J. (2002). *Los pavimentos en las vías terrestres: calles, carreteras y aeropistas*. (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería Civil, Cajamarca, Perú).
- Construcción metálica. (28 de Abril de 2014). Recuperado de ISSUU: https://issuu.com/legissa/docs/metallica18_baja (Consulta: 8 de marzo de 2020)
- Corredor, G. (s.f.). *Experimento vial de la AASHO y las guías de diseño AASHTO*. (Trad. Á. Espinoza) Recuperado de <https://1library.co/document/dy42rw0q-experimento-vial-de-la-aasho-y-las-guias-de-diseno-aashto-y.html> (Consulta: 8 de marzo de 2020)

- Federal Highway Administration (FHWA) [Estados Unidos]. (1997). *FHWA-SA-98-042. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. (Trad. Á. Espinoza) Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/98042.pdf> (Consulta: 27 de Junio de 2018)
- Federal Highway Administration (FHWA) [Estados Unidos]. (2016). *Continuously reinforced concrete pavement manual: Guidelines for Design, Construction, Maintenance, and Rehabilitation*. (Trad. Á. Espinoza) Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16026.pdf> (Consulta: 27 de Junio de 2018)
- Fernández, F. (16 de octubre de 2015). Piura: Sistema vial de la ciudad de Piura es un desastre. *Diario Correo*. Recuperado de <https://diariocorreo.pe/edicion/piura/piura-sistema-vial-de-la-ciudad-de-piura-es-un-desastre-625727/> (Consulta: 15 de octubre de 2018)
- García, A. (2016). *Diseño de pavimento rígido método AASHTO 93*. Recuperado de https://es.slideshare.net/RibBrian/0600-diseo-de-pavimentos-rigidos-aashto-93?from_action=save (Consulta: 16 de Julio de 2018)
- Instituto Bolivariano del Cemento y Hormigón (IBCH). (2015). *Pavimentos rígidos - Ventajas comparativas*. Recuperado de http://www.ibch.com/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=13 (Consulta: 15 de Octubre de 2017)
- Instituto Peruano de Economía (IPE). (Junio de 2017). ¿Hacia donde va la infraestructura de Transportes en el Perú?: Brecha en infraestructura de transporte. *Costos*, 22-26. Recuperado de <http://www.ipe.org.pe/portal/wp-content/uploads/2018/02/2017-06-Infraestructura-de-transportes-Revista-Costos.pdf> (Consulta: 15 de Octubre de 2017)
- Maccaferri. (2010). *Technical Data Sheet - Wirand Fiber FF1*. Recuperado de http://www.rahyaabsanatco.com/userfiles/files/products/Steel_fibres/TDS%20WIRAND%20FF1.pdf (Consulta: 15 de Octubre de 2017)
- Maccaferri América Latina. (2007). *Manual Técnico: Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón*. Brasilia, Brasil.
- McCarthy, D. (2014). *Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics*. Harlow, England: Pearson Education Limited.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (27 de Julio de 2011). Aprobación de la actualización del Clasificador de Rutal del Sistema Nacional de Carreteras -

- SINAC [Decreto Supremo N° 036-2011-MTC]. Lima, Perú. Recuperado de <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/documentos/D.S.%20036-2011-MTC.pdf> (Consulta: 20 de Octubre de 2018)
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2013). *Manual de Carreteras. Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos* (3era ed.). Lima: Fondo Editorial ICG.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2015). *Manual de Carreteras. Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos* (4ta ed.). Lima: Fondo Editorial ICG.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2009). *Norma E.060: Concreto Armado*. Recuperado de <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=190> (Consulta: 20 de Octubre de 2018)
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras* (2da ed.). Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Portland Cement Association (PCA) [Estados Unidos]. (1995). Diseño de espesores para pavimentos de concreto para carreteras y calles (Versión 1984). (Trad. E. Fernández) Lima, Perú. Recuperado de http://www.mediafire.com/file/oo9d2sdye5d4dl2/_PCA-Dise%25C3%25B1o_de_Espesores_de_Pavimentos_de_Concreto_para_Calles_y_Carreteras-Curso_en_URP-1985.pdf/file (Consulta: 27 de Abril de 2018)
- Salazar, P. (2010). *Hormigones con fibras de acero características mecánicas*. Madrid.
- The Concrete Society [Reino Unido]. (2016). *Technical Report 34: Concrete Industrial Ground Floors - A guide to design and construction*. Recuperado de <http://freeit.free.fr/Pour%20Pierre/TR34%20-%20Concrete%20Industrial%20Group%20-%20Concrete%20Society%20Working%20Party.pdf> (Consulta: 27 de Abril de 2018)
- Thenoux, G., & García, G. (Julio - Diciembre de 1999). Estudio de técnicas de reciclado en frío: primera parte. *Revista Ingeniería de Construcción*(20), 5-14. Recuperado de <https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/391/329> (Consulta: 27 de Abril de 2018)
- Torres, R. (2007). *Análisis comparativo de costos entre el pavimento flexible y el pavimento rígido*. (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Civil, Guatemala, Guatemala).

- Vásquez, A., & Bendezú, L. (2008). Ensayos sobre el rol de la infraestructura vial en el crecimiento económico del Perú. Lima, Perú: consorcio de Investigación Económica y Social (CIES) y Banco Central de Reserva del Perú (BCRP).
- Vasquez, L. (2017). *Procedimiento de diseño de pavimentos nuevos o reconstrucción*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Venkateswaran, K., MacClune, K., & Enríquez, M. F. (Octubre de 2017). El Niño Costero: Las inundaciones de 2017 en el Perú. Boulder, EE.UU.: Zurich Flood Resilience Alliance. Recuperado de <http://repo.floodalliance.net/jspui/bitstream/44111/2594/4/Libro-PERC-nino-costero.pdf> (Consulta: 27 de Abril de 2018)
- Vivar, G. (1995). *Diseño y construcción de pavimentos. Programa de Actualización 1994 - 1995. Libro N° 6* (2da ed., Vol. 6). Lima, Perú: Colegio de Ingenieros del Perú.

7. ANEXOS