

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**COMPARACIÓN DEL PAVIMENTO PERMEABLE CON LOS PAVIMENTOS
RÍGIDOS Y FLEXIBLES PARA LA MEJORA DEL DRENAJE EN EL
ESTACIONAMIENTO DEL AEROPUERTO DE JAUJA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Deyvi Jhonathan Artica Salazar

Josué Aldair De La Cruz Cruz

ASESOR

Guillermo José Zavala Rosell

Lima, junio de 2023


Informe de Similitud

Yo, **Guillermo José Zavala Rosell**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada **Comparación del pavimento permeable con los pavimentos rígidos y flexibles para la mejora del drenaje en el estacionamiento del aeropuerto de Jauja**, de los autores **Deyvi Jhonathan Artica Salazar y Josué Aldair De La Cruz Cruz**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 22%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15 de junio de 2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 15 de junio de 2023

Apellidos y nombres del asesor: Zavala Rosell, Guillermo José	
DNI: 07885623	Firma 
ORCID: 0000-0002-2077-5001	

Resumen

En la presente tesis de investigación, se identificó un problema medioambiental causado por el tipo de drenaje que se tiene en los pavimentos rígidos y flexibles. Como solución se propone los pavimentos permeables que son parte de la filosofía SuDS. Para poder verificar que el pavimento permeable es viable se desarrolló puntos claves de comparación con los pavimentos rígidos y flexibles en el estacionamiento del aeropuerto de Jauja.

Algunos datos tomados en consideración fueron extraídos de tesis con investigaciones similares, para así poder determinar cuál de estos tres pavimentos es el más adecuado para el lugar de estudio. Se empezó revisando los conceptos y características de cada pavimento. Una vez completados todos los conceptos, se pasó a diseñar cada tipo de pavimento basándonos en la Norma AASHTO 93 y ACI 330R - 08. Una vez realizado el diseño, se procedió a evaluar los valores obtenidos de acuerdo a los valores mínimos que nos brinda cada norma para poder tener los espesores correctos. Además, se determinaron puntos de comparación como, por ejemplo, mantenimiento, costos, reciclabilidad, resistencia a la compresión y flexión, entre otros para los tres tipos de pavimento. Estos criterios se evaluaron de acuerdo a un método de puntuación estructurado por los autores, donde se le asignan puntajes a cada pavimento. Estos criterios, a la vez, tiene un peso ponderado según su importancia. Finalmente, se logró determinar qué tipo de pavimento es el que se adecúa mejor a este estacionamiento, obteniendo al pavimento permeable como la mejor opción para dicho lugar. De esta manera se logró evaluar las hipótesis que se planteó.

Palabras Clave: Pavimento, flexible, rígido, permeable, comparación, SuDS

ÍNDICE:

1. Generalidades.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Antecedentes	2
1.4. Descripción del Lugar de Diseño.....	3
1.5. Objetivo General	3
1.6. Objetivos Específicos	3
1.7. Hipótesis.....	4
1.8. Alcance y limitaciones	4
1.9. Metodología.....	4
2. Marco Teórico.....	4
2.1. Definición de Pavimentos:.....	4
2.2. Tipos de Pavimentos:.....	4
Pavimento Flexible.....	5
Pavimento Rígido.....	7
Pavimento Permeable.....	15
2.3. Composición:.....	15
3. Metodología de Diseño	20
3.1. Consideraciones generales:.....	20
3.2. Metodologías de diseño	21
Pavimento Flexible.....	21
Pavimento Rígido.....	25
Pavimento Permeable.....	30
3.3. Diseño de Pavimentos.....	33
Diseño de Pavimento Flexible.....	33
Diseño de Pavimento Rígido.....	44
Diseño de Pavimento Permeable.....	46
4. Comparación de Resultados.....	49
4.1. Mantenimiento:.....	49
Pavimento Flexible:.....	49
Pavimento Rígido:.....	50

Pavimento Permeable:.....	51
4.2. Costo:.....	52
4.3. Resistencia a la Compresión:.....	56
Pavimento Flexible:.....	56
Pavimento Rígido:.....	56
Pavimento Permeable:.....	57
4.4. Resistencia a la flexión:.....	57
Pavimento Flexible:.....	57
Pavimento Rígido:.....	58
Pavimento Permeable:.....	58
4.5. Durabilidad:	59
Pavimento Flexible:.....	59
Pavimento Rígido:.....	59
Pavimento Permeable:.....	59
4.6. Reciclabilidad:	59
Pavimento Flexible:.....	59
Pavimento Rígido:.....	59
4.7. Diferencias generales de los tres tipos de pavimento	60
Numero de Capas:.....	60
Complejidad en la construcción de la superficie de rodadura	60
Peso Volumétrico	62
Permeabilidad	63
Puntuación final de todas las comparaciones realizadas.....	63
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:	64
6. BIBLIOGRAFÍA.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sección típica de Pavimento Flexible. Fuente: Huang H. Yang (2018).....	7
Figura 2 Esquema de comportamiento de pavimento rígido y flexible. Fuente Libro Pavimento (2018).....	8
Figura 3 Tipos de juntas de contracción. Fuente ACPA (1992)	9
Figura 4 Tipos de juntas de construcción. Fuente ACPA (1992).....	10
Figura 5 Tipos de selladores. Fuente ACPA (1992).....	12
Figura 6 Pavimento de concreto simple sin pasadores. Fuente ASOCEM (2016)...	13
Figura 7 Pavimento de concreto simple con pasadores. Fuente ASOCEM (2016)..	14
Figura 8 Pavimento de concreto reforzado. Fuente ASOCEM (2016)	14
Figura 9 Conformación del césped artificial. Fuente: Grupo Pineda. (2021).....	16
Figura 10 Celdas de plástico. Fuente EURO CYD (2021).....	17
Figura 11 Estructura de Adoquines con juntas abiertas. Fuente: Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala	18
Figura 12 Hormigón Poroso. Fuente: Constru Innova (2016).....	18
Figura 13 Sección transversal de un pavimento permeable. Fuente Woods-Ballard	20
Figura 14 Relación del coeficiente de reacción con el CBR Fuente Manual de Carreteras (2014).....	28
Figura 15 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta. Fuente: ACI 211.3	32
Figura 16 Análisis de condición del ciclo de vida. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA).....	49
Figura 17 Análisis de costo del ciclo de vida. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA).....	52
Figura 18 Capa de rodadura de Asfalto	60
Figura 19 Capa de rodadura de Concreto Simple.....	61
Figura 20 Concreto Permeable	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Índice de Serviciabilidad Inicial (PI). Fuente AASHTO 93	22
Tabla 2 Índice de Serviciabilidad Final (PT). Fuente AASHTO 93	22
Tabla 3 Modulo Resiliente de la Subrasante. Fuente Manual de carreteras	23
Tabla 4 Valor de Desviacion Estandar Normal. Fuente Manual de Carreteras (2014)	24
Tabla 5 Indice de Serviciabilidad Fuente Manual de Carreteras (2014).....	26
Tabla 6 Desviacion Estandar Normal Fuente Manual de Carreteras (2014).....	27
Tabla 7 Tiempo de saturación Fuente Manual de Carreteras (2014).....	29
Tabla 8 Coeficiente de drenaje Fuente Manual de Carreteras (2014)	29
Tabla 9 Valores efectivos de b/bo. Fuente ACI 211.3R	32
Tabla 10 Factor para el carril de diseño. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.1	34
Tabla 11 Tipo de tráfico. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.1	35
Tabla 12 Categoría de Subrasante. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.4	35
Tabla 13 Modulo Resiliente de la Subrasante. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.5	36
Tabla 14 Nivel de Confiabilidad (R). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.6	37
Tabla 15 Desviación estándar Normal (ZR). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.8	37
Tabla 16 Índice de Serviciabilidad Inicial (PI). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.10	38
Tabla 17 Indice de Serviciabilidad final (PT). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.11	38
Tabla 18 Calidad de drenaje del pavimento flexible. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.14	39
Tabla 19 Coeficiente de saturación. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.15...	39
Tabla 20 Coeficiente estructural de la capa superficial. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.13	40
Tabla 21 Coeficiente estructural de la Base granular. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.13	41
Tabla 22 Coeficiente estructural de la Subbase granular. Fuente Manual de	

Carreteras Cuadro 12.13.....	41
Tabla 23 Valores recomendado de espesores mínimos. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.17.....	42
Tabla 24 Análisis de mantenimiento del ciclo de vida del pavimento flexible. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA, 2008).....	50
Tabla 25 Análisis de mantenimiento del ciclo de vida del pavimento rígido. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA, 2008).....	51
Tabla 26 Costos Unitarios del Pavimento de Concreto. Fuente Revista Costos (2021-dic)	53
Tabla 27 Costos del Pavimento Asfáltico. Fuente Revista Costos (2021-dic).....	54
Tabla 28 Costos Unitarios del Pavimento Permeable. Fuente: Tecno Group	54
Tabla 29 Comparación de Costos por m2 de pavimento. Fuente Propia	55
Tabla 30 Tabla de resistencia a la compresión del pavimento flexible. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.13 (2014)	56
Tabla 31 Valores recomendados de Resistencia del Concreto según rango de Trafico. Fuente: Manual de Carreteras Cuadro 14.7 (2014).....	56
Tabla 32 Valores recomendados de Resistencia del Concreto según rango de Trafico. Fuente: Manual de Carreteras Cuadro 14.7	58
Tabla 33 Peso Volumétrico de los 3 tipos de Pavimento. Fuente: Propia	63
Tabla 34 Cuadro comparativo. Fuente Propia.....	63

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Diseño de pavimento flexible. Fuente: AASHTO 93	28
Ecuación 2 Numero estructural. Fuente AASHTO 93	33



1. Generalidades

1.1. Introducción

Según el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, al término del año 2020 se obtuvo un 84% de la red nacional pavimentada; sin embargo, muchos de estos pavimentos fueron diseñados con criterios tradicionales, las cuales son accesibilidad, resistencia y eficiencia económica; es decir, beneficios directos al tránsito de vehículos, pero no al medioambiente. Específicamente, el problema está relacionado con el sistema de drenaje que se tiene en los pavimentos convencionales (Flexible y Rígido), ya que sus superficies son prácticamente impermeables, interrumpiendo el ciclo hidrológico natural del agua, debido a que reduce la infiltración, generando así poco crecimiento de la vegetación. Esto resulta en un aumento de los caudales punta, mayores volúmenes de escorrentía, mayores casos de inundaciones y una disminución de los caudales base (Abellán 2015:1).

Las investigaciones mencionan que, si no se administra la escorrentía de aguas superficiales de manera más efectiva, entonces los problemas solo empeorarán. Las proyecciones de cambios climáticos ya indican que las lluvias intensas y las inundaciones serán más recurrentes. Asimismo, se menciona una mayor frecuencia en la escasez del agua, debido al incremento de demanda. Es por ello que es importante generar soluciones eficientes para captar y utilizar el agua de la lluvia.

1.2. Justificación

Frente al problema medioambiental, se propone como solución la filosofía de Sustainable Drainage Systems (SuDS); específicamente, su enfoque de pavimentos permeables, cuya característica principal es su infiltración inmediata. Con esta técnica se evitará la acumulación y contaminación de aguas pluviales, debido a que el fluido no se estancará; asimismo, no tendrá un recorrido por pesticidas, metales pesados, hidrocarburos, etc.

Algunos otros beneficios son los siguientes:

- Posibilidad de recarga de acuíferos, almacenamiento y reutilización del agua captada por la lluvia.
- Bajo costo de fabricación, ya que no hay necesidad de implementar desagües subterráneos; también, el costo de mantenimiento es menor frente a las otras técnicas SuDS.

1.3. Antecedentes

El pavimento permeable es la técnica SuDS más estudiada e investigada y la que genera mayores expectativas con respecto a la mejora en el drenaje natural de las aguas pluviales. Las primeras aplicaciones se dieron en el año 1970. Es por ello que existe una gran cantidad de información sobre recomendaciones, manuales de diseño y aplicaciones internacionales.

Estados Unidos fue el primer país que investigó y elaboró guías de diseños para superficies permeables. En los años 80, se utilizaron pavimentos permeables para aplacar la contaminación generada por los vertidos de los sistemas de saneamiento unitario en épocas de lluvia. Algunos manuales que son empleados actualmente son: “Virginia DCR Stormwater Design Specification N°7” para el estado de Virginia y “NYC Green Infrastructure Plan” para el estado de New York.

La mayor cantidad de publicaciones referidas al pavimento permeable se encuentran en el Reino Unido, siendo las Universidades de Coventry (Inglaterra) y Abertay-Dundee (Escocia) las que más destacan como referentes. Asimismo, CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), una asociación de investigación e información sin fines de lucro, ha desarrollado múltiples investigaciones que abarca las industrias de la construcción y el entorno construido. Entre sus publicaciones, una de las más destacadas es “The SuDS manual”, bastante referida en muchos países.

En Chile, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) publicó la guía “Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos” donde se redactan las técnicas SuDS incluido el pavimento permeable.

En el “Manual de Carreteras Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos - 2014”

y el “Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje - 2011”, utilizadas en Perú, no se ha encontrado información sobre técnicas SuDS; sin embargo, existen investigaciones sobre diseño en los repositorios de las universidades peruanas.

1.4. Descripción del Lugar de Diseño

El aeropuerto Francisco Carlé se encuentra en el departamento de Junín y en la ciudad de Jauja. La ubicación es cercana al ovalo Maquihuayo en la intersección de la Av. Evitamiento, Av. Francisco Carlé y la Carretera Central. Sus coordenadas son $-11^{\circ} 47' 10.0''\text{S}$ y $75^{\circ} 28' 29.1''\text{W}$ y a una altitud de 3 390 m.s.n.m.

En Jauja, el verano es corto, árido y nublado, y el invierno es corto, seco y parcialmente nublado. Durante el año, la temperatura oscila entre 4°C y 19°C ; sin embargo, en raras ocasiones disminuye de 2°C y aumenta más de 22°C .

Según un “estudio para diseñar la estructura del pavimento en la nueva Carretera Central, tramo Tanta – Canchayllo (Km 160 – 170), Jauja 2019” el tipo de suelo consta, en general, de una arena mal graduada (SP).

1.5. Objetivo General

Contribuir a mejorar el drenaje de las aguas pluviales mediante la implementación de los pavimentos permeables.

1.6. Objetivos Específicos

- Determinar los datos necesarios según el método de diseño para cada pavimento.
- Diseñar los 3 tipos de pavimentos en cuestión para el estacionamiento de Jauja.
- Comparar los 3 tipos de pavimentos flexible, rígido y permeable.
- Evaluar si la implementación del pavimento permeable en el estacionamiento es una solución viable.

1.7. Hipótesis

- El pavimento rígido es el más costoso.
- El pavimento rígido es el que puede soportar mayores cargas.
- El diseño óptimo es el del pavimento permeable.

1.8. Alcance y limitaciones

La propuesta que se realizará en esta investigación es sobre los diseños de los pavimentos flexible, rígido y permeable, lo cuales están destinados para el estacionamiento del Aeropuerto de Jauja.

1.9. Metodología

Para esta investigación se desarrolla la siguiente metodología. En primer lugar, se define los pavimentos flexibles, rígidos y permeables. En segundo lugar, se detalla la metodología de diseño para cada uno. Finalmente, se compara los 3 diseños en parámetros representativos para concluir con el diseño óptimo.

2. Marco Teórico

2.1. Definición de Pavimentos:

El pavimento es una estructura que se encuentra sobre el terreno de fundación o subrasante. Este elemento está conformado por un conjunto de capas (sub base, base y carpeta de rodadura) que otorgan resistencia a las fuerzas repetitivas que actúan en la superficie.

Para un diseño adecuado, se deben tener en cuenta factores como las características del suelo, el tránsito, el clima, la topografía, etc. Es fundamental la identificación de cada uno de ellos para poder asegurar un correcto comportamiento de la estructura.

2.2. Tipos de Pavimentos:

El desarrollo de esta tesis contempla 3 tipos de pavimentos (flexibles, rígidos y permeables).

Pavimento Flexible

Los pavimentos flexibles convencionales poseen un sistema estratificado de mayor a menor calidad en los materiales, debido a que la intensidad de carga es alta en la parte superior y es baja en la parte inferior. Esto permite que se pueda emplear materiales locales, pero con la condición de cumplir con las especificaciones de las Normas CE. 010 o del Manual de Carreteras y, por lo general, resulta una solución económica en comparación con el costo de los materiales regionales de alta calidad. Asimismo, disminuye la dificultad para obtener materiales de baja calidad en las localidades.

Composición:

Según el libro "Pavement Analysis and Design" (Huang, Y. 2004), la composición de un pavimento flexible convencional está dada en el siguiente orden desde la superficie: Capa de sellado, capa de superficie, capa de adherencia, capa aglutinante, capa de imprimación, capa base, capa subbase, subrasante compactada y subrasante natural. Algunas de estas capas pueden ser omitidas.

Capa de sellado (Seal coat)

Consiste en la implementación de una capa delgada de asfalto que se utiliza para impermeabilizar la superficie o para otorgar una resistencia al deslizamiento. Esta capa, dependiendo de su finalidad, puede o no estar cubierta con agregado.

Capa de superficie (Surface course)

La capa de superficie o capa de desgaste es construida, generalmente, con Hot Mix Asphalt (HMA) denso de alta graduación. Su finalidad es ser lo suficientemente resistente a la distorsión producida por la carga; asimismo, proporcionar suavidad, resistencia al deslizamiento y ser impermeable para proteger el pavimento del efecto debilitante del agua. En caso de que no se

pueda cumplir con estos requisitos se recomienda la implementación de una capa de sellado.

Capa aglutinante (Binder course)

La capa aglutinante o capa de asfalto se encuentra debajo de la capa de superficie. Su importancia se debe a dos razones. Por un lado, la capa de Hot Mix Asphalt (HMA) es demasiado gruesa para ser compactada en solo una capa. Por otro lado, reemplazar parte de la capa de superficie por la capa aglutinante produce un diseño más económico, ya que, en esta última, se utiliza agregados de mayor tamaño y de menor calidad, y requiere menor cantidad de asfalto.

Capa de adherencia (Tack coat)

La capa de adherencia consiste en la aplicación muy ligera de asfalto (usualmente la emulsión asfáltica es diluida con agua). Es usada para asegurar una adecuada unión entre el nuevo y antiguo pavimento. La capa de adherencia tiene 3 requisitos. En primer lugar, debe ser una capa delgada. En segundo lugar, tiene que cubrir toda la superficie a pavimentar de manera uniforme. Por último, se debe esperar el tiempo de curado para la aplicación del Hot Mix Asphalt (HMA).

Capa de imprimación (Prime coat)

Es aplicar asfalto a una superficie absorbente. Tiene la finalidad de unir la capa de asfalto con la base granular. Cabe mencionar que es diferente a la capa de adherencia, ya que la capa de imprimación penetra la capa inferior para tapar los huecos y generar una superficie impermeable, mientras que la capa de adherencia no requiere esta penetración.

Capa Base (Base course)

Es la capa inmediata a la capa de superficie o capa aglutinante. Los materiales que puede contener esta capa son piedra triturada, escoria triturada u algún otro material que sirva de estabilizador.

Capa Subbase (Subbase course)

En esta capa se puede utilizar un distinto agregado al de la capa base para amortiguar costos.

Subrasante compactada (Compacted subgrade)

Esta capa se encuentra debajo de la subbase. El material puede ser del mismo terreno material en que reposa o de ser necesario otro material seleccionado. Asimismo, esta se debe de compactar de acuerdo a la relación de densidad y humedad óptima.

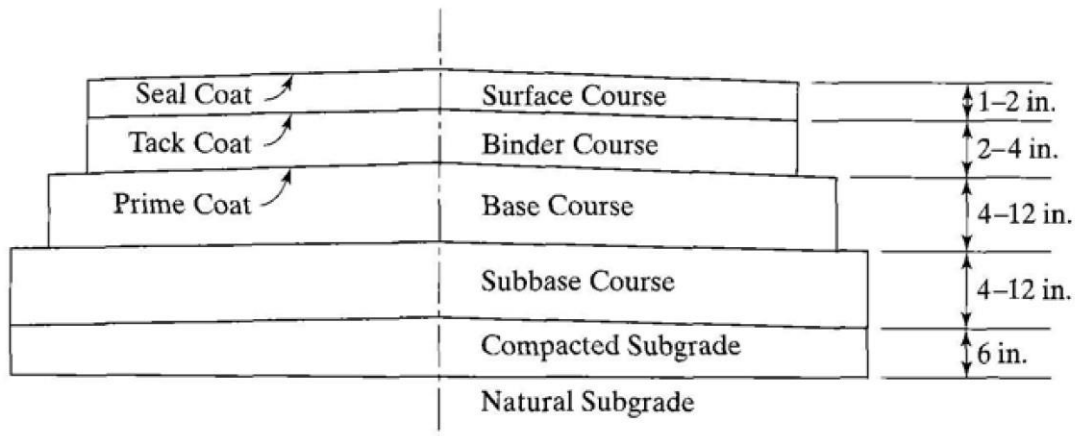


Figura 1 Sección típica de Pavimento Flexible. Fuente: Huang H. Yang (2018)

Pavimento Rígido

Este pavimento, también llamado pavimento hidráulico, está constituido con cemento Portland, agregados y agua.

El pavimento rígido presenta una menor deflexión frente al pavimento flexible, debido a que el material predominante es distinto. El Portland Cement Concrete (PCC) es mucho más rígido que el Hot Mix Asphalt (HMA).

Composición:

La composición de un pavimento rígido está dada en el siguiente orden desde la superficie capa de rodadura, base y subrasante.

Capa de rodadura

Está diseñada de concreto hidráulico, lo que ayuda a evitar la

filtración de agua y a resistir la abrasión del tránsito vehicular. Al igual que el pavimento flexible, la capa de rodadura debe resistir y redistribuir los esfuerzos.

Base (Base course)

Esta capa tiene como finalidad la de distribuir las cargas generadas y transmitirla hacia la superficie de rodadura. Puede ser de materiales granulares, agregados pétreos, grava triturada y arena en sus distintas combinaciones. Con la base se evita el bombeo y es la capa que aumenta la capacidad de soporte.

Subrasante (subgrade)

Es la capa de terreno ubicada bajo todas las demás capas de la estructura. Esta capa está compuesta por material de relleno o corte, una vez compactada es necesario indicar la sección transversal y la pendiente.

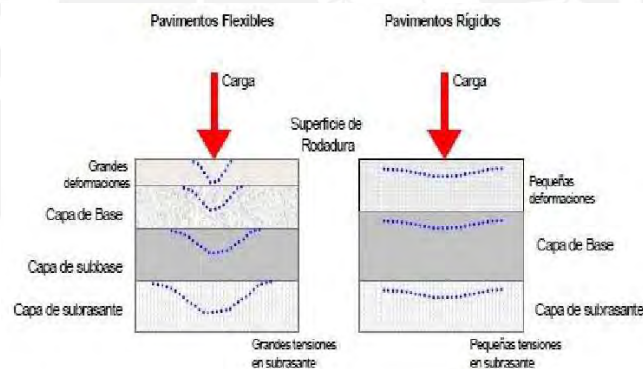


Figura 2 Esquema de comportamiento de pavimento rígido y flexible. Fuente Libro Pavimento (2018)

Juntas

Las tensiones generadas por contracción y expansión son controladas mediante las juntas dentro de los rangos admisibles para el concreto.

Las juntas poseen un gran impacto en la duración de la estructura. Es por ello que se debe identificar el material adecuado con su respectiva técnica de construcción.

Según la función que cumplen, las juntas se clasifican como juntas de

contracción, juntas de construcción y juntas de expansión o aislación.

Juntas de Contracción

Estas juntas controlan la posición de las grietas, de forma no aleatoria, producidas por las deformaciones de la retracción o del cambio de temperatura. Aunque se asume que las cargas se transfieran a través de los agregados: también, se pueden usar pasadores. Las siguientes imágenes son de un artículo publicado por la American Pavement Association (ACPA, 1992)

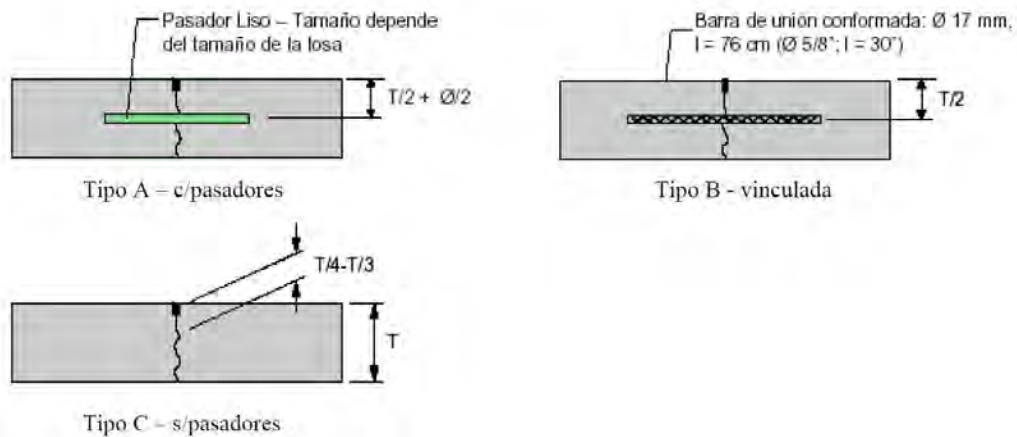


Figura 3 Tipos de juntas de contracción. Fuente ACPA (1992)

Juntas de Construcción

Estas juntas están ubicadas entre las construcciones contiguas construidas en distintos tiempos. Los pasadores transversales o longitudinales son los que se encargan de la transferencia de cargas. A continuación, se presentarán imágenes de referencia.

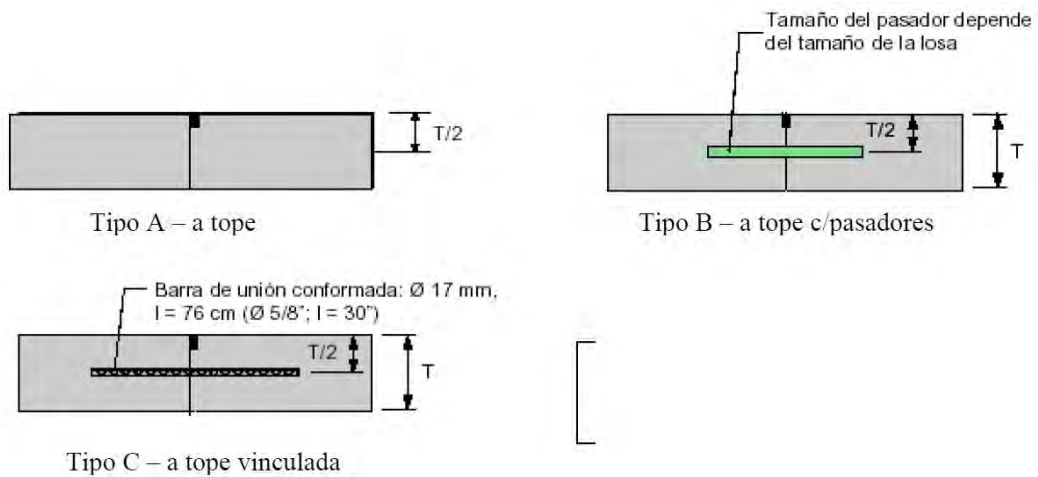


Figura 4 Tipos de juntas de construcción. Fuente ACPA (1992)

Juntas de Expansión o Aislamiento

Las juntas de expansión o aislamiento son necesarias cuando ocurre una intercepción de pavimentos. El aislamiento ayudará a disminuir los esfuerzos de compresión causados por el cambio de temperatura.

Sellos

La función del sellador es impedir la filtración del agua hacia las distintas capas del pavimento; asimismo, obstaculizar el ingreso de otros materiales en las juntas, para evitar el descascaramiento.

El tiempo de vida útil, el tipo de sello, el costo y el clima son factores que se deben de tener en cuenta al elegir un sello. Sin embargo, el tipo de junta es el más importante.

Sin importar la elección del material elegido, este tiene que cumplir con las siguientes características: impermeabilidad, deformabilidad, adherencia, estabilidad, resistencia, resiliencia y durabilidad.

Para un adecuado sellado, antes de la aplicación, se recomienda limpiar las juntas y eliminar restos de lechada de cemento, compuestos de

curado u otros materiales. Para ello se puede emplear un cepillo de alambre o agua. Finalmente, es necesario realizar un soplado de aire como último paso de limpieza.

Sellos líquidos

Este tipo de sellos pueden ser de los siguientes materiales: asfalto, elastómeros, silicona o polímeros. Todos estos materiales son aplicados en estado líquido para; posteriormente, permitirles el fraguado. Asimismo, es necesario colocar una varilla de respaldo para definir el factor forma y afinar el volumen de sello a utilizar.

El factor forma (ancho/profundidad) es un parámetro importante, ya que de no ser el correcto se generaría enormes esfuerzos que afectan la vida útil del sello.

Sellos elastoméricos preformados

Es un sello que se caracteriza por regenerar las deformaciones de compresión. Además, el material es de neopreno extruido. Los sellos elastoméricos preformados son diseñados para esfuerzos de tensión.

Los reservorios de sellado por compresión están diseñados para otorgar una compresión del 25% (en promedio) en todo momento. A continuación, se presentan los tipos de sellos elastoméricos preformados según el ACPA (1992).

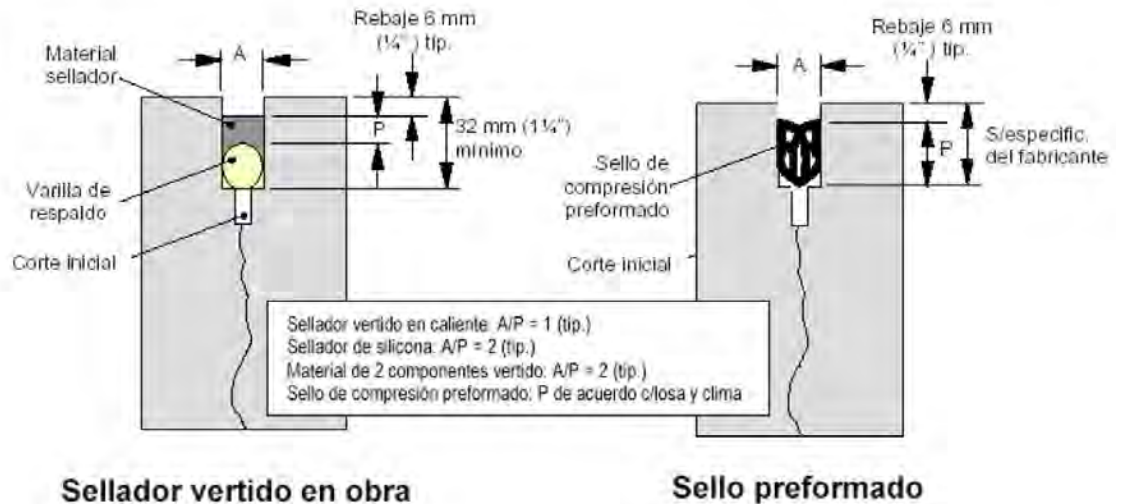


Figura 5 Tipos de selladores. Fuente ACPA (1992)

Tipos de Pavimento Rígido:

- **Pavimento de concreto simple**

Según la AASHTO, los pavimentos de concreto simple se clasifican dependiendo de si poseen o no poseen pasadores.

Por un lado, los pavimentos de concreto simple sin pasadores no poseen algún refuerzo de acero ni algún otro elemento que ayude a la transferencia de carga. Siendo la unión de agregados que permite el paso de cargas; sin embargo, para una adecuada transferencia es necesario una distancia corta entre las juntas. Según la AASHTO, de manera general, las dimensiones no tienen que sobrepasar 6m de largo o 3.5m de ancho, y el espesor depende de la siguiente categorización.

- Urbanizaciones residenciales (10 a 15 cm)
- Colectoras (15 a 17cm)
- Aeropistas y autopistas (20cm a más)

Según la AASHTO, este pavimento debe ser aplicado en una zona de tráfico ligero y un clima templado.

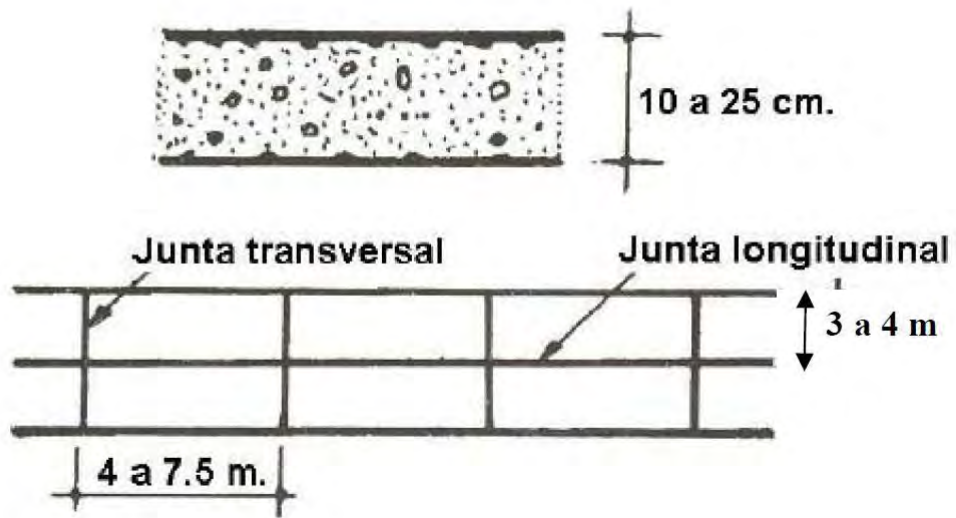


Figura 6 Pavimento de concreto simple sin pasadores. Fuente ASOCCEM (2016)

Por otro lado, los pavimentos de concreto simple con pasadores emplean barras (dowels) para la transferencia de carga. Se encuentran en las juntas de contracción. Debido a que mejora las condiciones de deformación en las juntas evita el desnivel entre las losas contiguas.

Según la PCA, es preferible emplear este pavimento para un tráfico diario que sobrepase los $9 \cdot 10^6$ lbs.

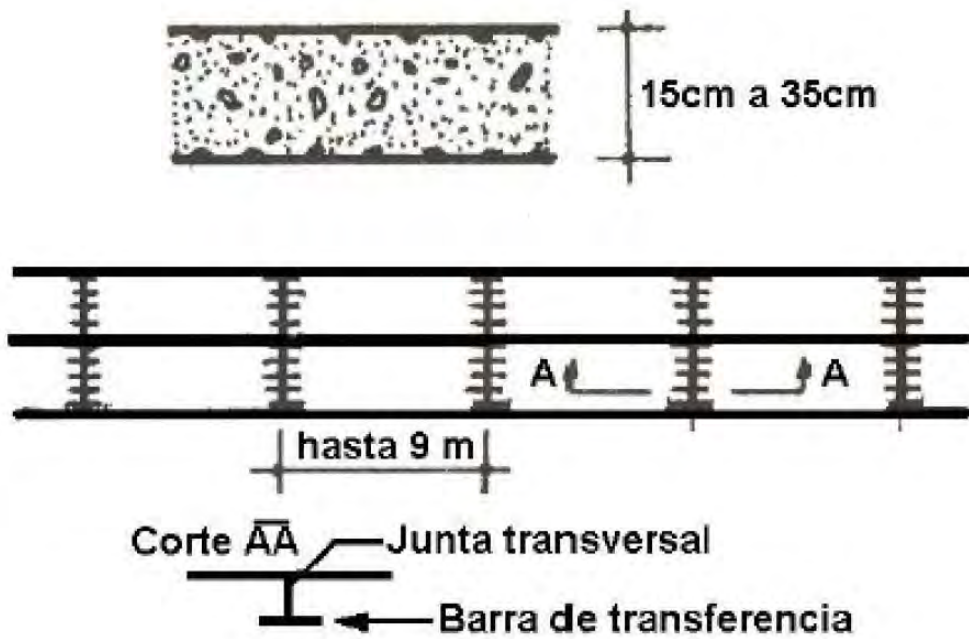


Figura 7 Pavimento de concreto simple con pasadores. Fuente ASOCEM (2016)

Pavimento de concreto reforzado con juntas

Los pavimentos reforzados poseen tanto refuerzo como pasadores para poder facilitar el paso de cargas en las juntas de contracción. El refuerzo puede ser una malla conformada por barras de acero o acero electrosoldado. Su función es mantener la unión de las grietas para asegurar un único comportamiento.

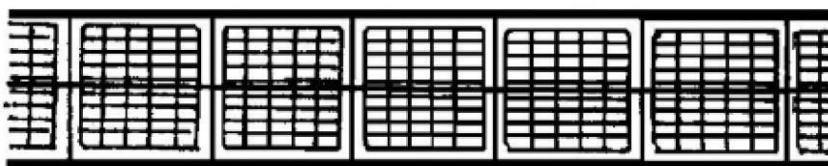
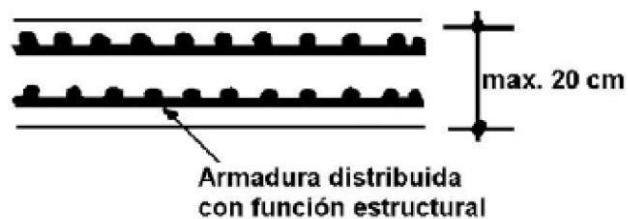


Figura 8 Pavimento de concreto con refuerzo. Fuente ASOCEM (2016)

Pavimento de concreto reforzado continuo

A comparación con los otros tipos de pavimentos, este no necesita juntas que prevengan las rajaduras, ya que las varillas soportan las deformaciones provenientes del cambio de frío a calor o viceversa. Contiene varillas longitudinales en todo el largo y las varillas transversales son opcionales.

Pavimento Permeable

Como se había explicado anteriormente, el pavimento permeable se encuentra dentro de las técnicas Sustainable Drainage Systems (SuDS). Este se encuentra conformado por varias capas permeables, pero también, de manera conjunta, ofrecen la capacidad necesaria para soportar las cargas. Asimismo, se permite configuraciones y variantes en los materiales, pero bajo la asunción de que la permeabilidad sea creciente desde la capa superior hacia la inferior.

2.3. Composición:

Los estratos que la constituyen se agrupan en la capa permeable y en las capas profundas. Dentro de las capas profundas se encuentra la base, sub base y el geotextil. El hormigón permeable es generado por la combinación de agregado grueso, cemento y agua para crear una masa que se mantenga unida por una capa delgada de pasta (Yober, 2017).

La clasificación del pavimento permeable tiene múltiples formas, el libro de Bruce K. Ferguson (Porous Pavements, 2005) nos indica cuatro tipos de pavimentos los cuales son los siguientes:

1. Césped poroso (porous turf)

Este tipo de pavimento poroso, tiene una mayor diversificación en el ámbito deportivo, específicamente en los campos de césped

artificial, y como decoración de interiores debido a que tiene grandes propiedades de absorción pluvial. La base del pavimento es de hormigón poroso, a la cual le sigue una superficie de césped artificial.



Figura 9 Conformación del césped artificial. Fuente: Grupo Pineda. (2021)

Las ventajas que tiene este tipo de pavimento poroso son las siguientes:

- Tiene un comportamiento casi perfecto para el drenaje de las aguas que recibe.
- Favorece al medio ambiente.
- Los paños colocados son perfectamente planos (al mismo nivel).
- Evita los deslizamientos, esto se debe a su acabado, el cual genera un mejor agarre superficial.
- Debido a la calidad de los materiales empleados y a la gran permeabilidad que tiene, no hay necesidad de realizar costosas inversiones para el mantenimiento.

2. Celdas de plástico (plastic geocells).

Son rejillas de plástico que se encuentran a cielo abierto y se conectan entre sí para formar una superficie uniforme. Los materiales que la componen no afectan al ambiente y son resistentes a las condiciones atmosféricas. (EURO CYD, 2021)



Figura 10 Celdas de plástico. Fuente EURO CYD (2021)

Las principales ventajas de estas celdas son las siguientes:

- Elevada resistencia a la compresión de los elementos.
- Altura de 4cm, aproximadamente, esto ayuda a una mejor protección del césped colocado.
- 85% de superficie biológicamente activa.
- Alta resistencia a temperaturas extremas

3. Adoquines con juntas abiertas (open-jointed paving blocks)

Los pavimentos de adoquín se componen de varias capas de diferentes materiales. Los materiales de cada capa se seleccionan en función de su disponibilidad y costo. El espesor de cada estrato estructural depende del nivel de tránsito que soportará durante el período de diseño, de la capacidad del suelo y de los materiales de construcción.

La estructura está conformada por una cama de arena, los adoquines y bajo esos adoquines una capa de sello de arena.

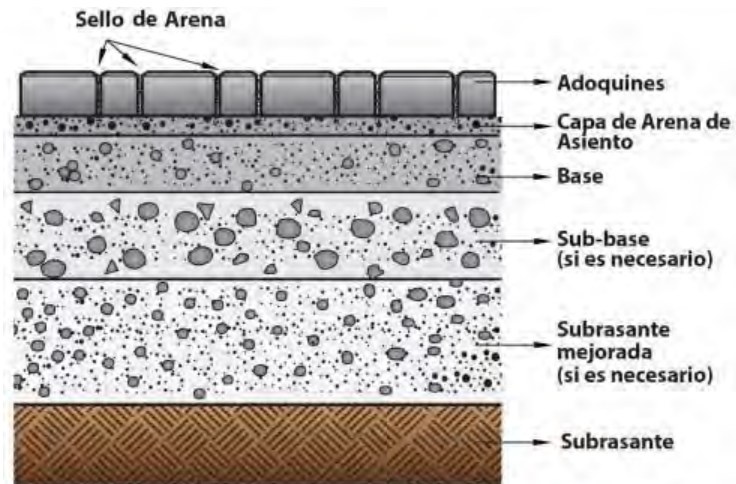


Figura 11 Estructura de Adoquines con juntas abiertas. Fuente: Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala

4. Hormigón poroso (porous concrete)

Como lo explicado anteriormente el hormigón poroso está compuesto de una mezcla bituminosa y tiene como características principales la estructura porosa, ya que depende de la dosificación y de su granulometría, además es sumamente importante el tipo de conglomerante y aditivos que se emplean, y por último el espesor de la capa permeable que se utilice.



Figura 12 Hormigón Poroso. Fuente: Constru Innova (2016)

El hormigón debe tener al menos un 15% de poros, sin exceder el 25% para evitar problemas de estabilidad.

Para mantener un correcto porcentaje de huecos y una suficiente resistencia a los esfuerzos tangenciales del tráfico,

es necesario agregar polímeros o una mayor cantidad de cemento.

Superficie permeable

La superficie permeable es una capa que permite una filtración del agua. Esta capa sirve como primer filtro y como primer soporte estructural. Actualmente, existen las siguientes tipologías: prado o grava de refuerzo, adoquines con ranuras, bloques porosos, mezcla bituminosa porosa y concreto poroso. En primer lugar, el césped o grava de refuerzo genera una estética ecológica; sin embargo, un inadecuado mantenimiento puede ocasionar impermeabilidad por parte de la tierra; asimismo, el refuerzo de hormigón sirve de soporte para una carga de tráfico ligero. En segundo lugar, los adoquines con ranuras son adoquines construidos con concreto impermeable; así que, el drenaje se produce por las ranuras; sin embargo, los adoquines poseen un proceso cuidadoso y costoso en su elaboración, por lo que se encuentra en desuso. Por último, los pavimentos se generan de las mezclas bituminosas porosas y concreto poroso. Estas son obtenidas eliminando las fracciones de finos y, por lo tanto, se incrementan los vacíos y la permeabilidad. Asimismo, para que se considere la mezcla bituminosa como porosa, esta debe de tener un porcentaje de huecos mayor al 20% y para el concreto se debe de encontrar en el rango de 15% y 25%.

Capas inferiores Base

La base está formada por material granular que actúa similar a un amortiguador para el pavimento. Además, optimiza la escorrentía mediante el filtrado.

Subbase

También se conforma de material granular. Este nivel realiza el

almacenamiento de la escorrentía en sus huecos. Al igual que la base, esta ayuda a la escorrentía mediante el filtrado. Además, otorga una resistencia necesaria para soportar las cargas.

Geotextil

Sus funciones son de filtro y de separación, por lo que es fundamental que tengan la permeabilidad adecuada. Aquellos geotextiles colocados sobre la subbase otorgan resistencia. Asimismo, son encargados de la eliminación del agua, retención; también, de la biodegradación de los contaminantes.

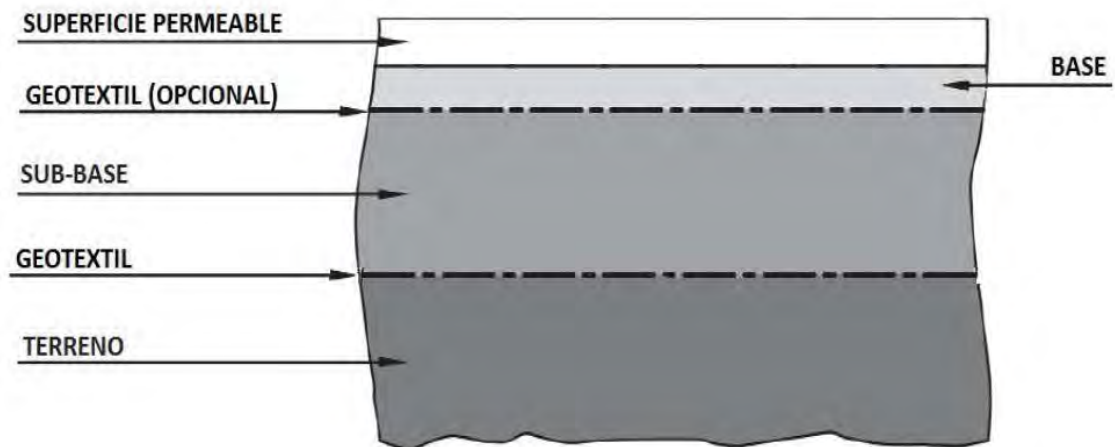


Figura 13 Sección transversal de un pavimento permeable. Fuente Woods-Ballard

3. Metodología de Diseño

3.1. Consideraciones generales:

Los pavimentos están conformados por una capa asfáltica o cemento asfáltico la cual se coloca sobre la base y subbase. Este tipo de cemento poseen una forma solida a temperatura ambiente y se diferencian por su viscosidad y consistencia. El cemento asfáltico aporta propiedades de flexibilidad, impermeabilidad y durabilidad en diferentes variaciones de agentes externos como la temperatura, el tránsito vehicular y el clima. El asfalto es un material aglomerante de

apariencia oscura que se compone de mezclas complejas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular que se originan del petróleo crudo. Se obtiene de la evaporación natural de depósitos en la superficie terrestre, conocidos como asfaltos naturales, o puede obtenerse a través de procesos de destilación industrial del bitumen. (Valenzuela, 2003).

En el caso del pavimento permeable el concreto que se utiliza es el concreto permeable es una combinación de agregado grueso, agua, cemento y aditivos. La característica principal de esta mezcla es la reducción casi o total del agregado fino, lo que genera que el concreto se comporte de manera permeable.

3.2. Metodologías de diseño

A lo largo de la historia, la ingeniería de pavimentos ha ido incrementando las formas o métodos de diseño, estos métodos van desde los más simples, los cuales emplean normas básicas y prácticas que permiten determinar los espesores de sus capas, hasta métodos más sofisticados con cálculos y normas más avanzadas.

Pavimento Flexible

El pavimento flexible se diseñará bajo el método AASHTO- 1993. Consiste en plantear una ecuación para obtener el parámetro número estructural (por sus siglas en inglés "SN"). El cual es necesario para la calcular los espesores de las niveles de la capa asfáltica, la capa de base y la capa de subbase.

Ecuación 1 Diseño de pavimento flexible. Fuente: AASHTO 93

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

A continuación, se explicará cada término utilizado en la fórmula anterior con base en lo que dice la Norma AASHTO 93:

- **Tránsito (ESALs):**

W18 = Factor equivalente de todos los ejes vehiculares que son aplicados al pavimento durante el tiempo de vida.

- **Diferencial de serviciabilidad (ΔPSI)**

ΔPSI = Resta de los índices de servicio inicial y terminal estos datos se hallarán con las tablas siguientes, bridadas por la Norma.

Tabla 1 Índice de Serviciabilidad Inicial (PI). Fuente AASHTO 93

TIPO DE CAMINOS	TRAFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (PI)
Caminos de Bajos Volumen de Tránsito	TP1	150,001	300,000	3.80
	TP2	300,001	500,000	3.80
	TP3	500,001	750,000	3.80
	TP4	750,001	1,000,000	3.80

Tabla 2 Índice de Serviciabilidad Final (PT). Fuente AASHTO 93

$$\Delta PSI = p_o - p_t$$

p_o : Índice de serviciabilidad inicial

p_t : Índice de serviciabilidad final

- **Módulo de rotura (MR)**

Mr = módulo de rotura de la subrasante (libras/pg²)

El módulo de resiliencia (MR) se usa para representar el suelo natural en el diseño de estructuras y este factor determina el tipo de pavimento que se colocará en la vía. El módulo de resiliencia no es un número invariable, debido a que puede cambiar por factores climáticos.

Para la subrasante con $CBR \leq 7.2\%$

$$Mr = 1500 \times CBR$$

Para la subrasante con $CBR > 7.2\%$ pero $\leq 20\%$

$$Mr = 3000 \times CBR^{0.65}$$

Se presenta la tabla propuesta por el Manual de Carreteras (2018)

Tabla 3 Modulo Resiliente de la Subrasante. Fuente Manual de carreteras

CBR% SUBRASANTE	MODULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (PSI)	MODULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (MPA)
19	16,819.00	115.96
20	17,380.00	119.83
21	17,931.00	123.63
22	18,473.00	127.37
23	19,006.00	131.04
24	19,531.00	134.66
25	20,048.00	138.23
26	20,558.00	141.74
27	21,060.00	145.20
28	21,556.00	148.62
29	22,046.00	152.00
30	22,529.00	155.33

- **Confiability (R), la desviación estándar normal (ZR) y la desviación estándar (So)**

So = desviación estándar total de la distribución normal que considera

los errores relacionados con las inexactitudes de los parámetros.

Para los pavimentos flexible se considera un rango entre 0.40 - 0.50

0.45 (Construcción nueva)

0.50 (Sobre capas)

ZR = Valor estadístico relacionado con distribuciones normales de datos, que considera la probabilidad de que el índice de servicio del pavimento supere la serviciabilidad final durante el periodo de vida.

Esta variable debe de considerar la confiabilidad (R), que es la probabilidad que tiene una estructura de pavimento para soportar las cargas.

Tabla 4 Valor de Desviacion Estandar Normal. Fuente Manual de Carreteras (2014)

CONFIABILIDAD (R)	VALOR DE ZR
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

• **SN** = número estructural

Una vez que se determina el número estructural requerido, se busca una combinación de espesores que acompañados con los coeficientes estructurales y de drenaje genere un resultado mayor o igual al requerido.

Ecuación 2 Numero estructural. Fuente AASHTO 93

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3$$

Donde:

- a_1, a_2, a_3 : Coeficientes de todas las capas estructurales (in).
- D_1, D_2, D_3 : Espesores de todas las capas estructurales (in).
- m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje para la base y subbase.

En la etapa constructiva, es necesario que el cemento asfáltico se encuentre licuado, esto ayudará a que dicho asfalto, luego de ser colocado, pueda recuperar sus propiedades cementantes e impermeables, con esto el pavimento será más estable y duradero.

Pavimento Rígido

El diseño del pavimento rígido se efectuará mediante el método AASHTO del año 1993. Se optó por este método, ya que se considera el parámetro de servicio a diferencia de otros métodos.

Asimismo, se considera el tráfico, clima, características del suelo, drenaje, confiabilidad, etc. Factores necesarios para asegurar un correcto comportamiento de la estructura durante su vida útil. Todos estos parámetros se relacionan mediante la siguiente ecuación.

$$\log W18 = ZRS_o + 7.35 \log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}} + 1} + (4.22 - 0.32Pt) \log\left(\frac{MrCd(0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51J(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{(\frac{Ec}{K})^{0.25}})}\right)$$

Siendo los parámetros los siguientes valores:

- **Tránsito (ESALs)**

El método AASHTO considera los pesos vehiculares a las que estarán sometidas durante su tiempo de diseño. Evidentemente, existen una gran variedad en el peso y número de ejes que tienen los vehículos. Esto produce una variedad de tensiones, esfuerzos y deformaciones en el pavimento. Es por ello que se intenta representar todas las cargas mediante un eje simple de 18 kips o el Equivalent Single Axle Load (ESAL).

- **Diferencial de serviciabilidad (ΔPSI)**

Es el resultado de la resta del nivel de servicio inicial (P_o) y el nivel de servicio terminal (P_t).

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

El nivel de servicio inicial (P_o) se establece inmediatamente después de la construcción o rehabilitación. En caso de no tener la suficiente información, AASHTO propone un valor de 4.5. El nivel de servicio final (P_t) es el nivel donde la superficie ya no cumple con las expectativas iniciales de comodidad y seguridad. AASHTO recomienda valores según la importancia de la vía

El Manual de carreteras nos indica el diferencial de serviciabilidad en el cuadro 14.4.

Tabla 5 Índice de Serviciabilidad Fuente Manual de Carreteras (2014)

TIPOS DE CAMINOS	TRAFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (PI)	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL O TERMINAL (PT)	DIFERENCIAL DE SERVICIABILIDAD (Δ PSI)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP1	150,001	300,000	4.10	2.00	2.10
	TP2	300,001	500,000	4.10	2.00	2.10
	TP3	500,001	750,000	4.10	2.00	2.10
	TP4	750,001	1,000,000	4.10	2.00	2.10
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	4.30	2.50	1.80
	TP6	1,500,001	3,000,000	4.30	2.50	1.80
	TP7	3,000,001	5,000,000	4.30	2.50	1.80
	TP8	5,000,001	7,500,000	4.30	2.50	1.80
	TP9	7,500,001	10'000,000	4.30	2.50	1.80
	TP10	10'000,001	12'500,000	4.30	2.50	1.80
	TP11	12'500,001	15'000,000	4.30	2.50	1.80
	TP12	15'000,001	20'000,000	4.50	3.00	1.50
	TP13	20'000,001	25'000,000	4.50	3.00	1.50
	TP14	25'000,001	30'000,000	4.50	3.00	1.50
	TP15	>30'000,000		4.50	3.00	1.50

- **Confiabilidad (R), la desviación estándar normal (ZR) y la desviación estándar (So)**

La confiabilidad incluye la variabilidad de los materiales. En el cuadro 14.5, el Manual de Carreteras indica los valores con respecto al nivel de tráfico.

Tabla 6 Desviacion Estandar Normal Fuente Manual de Carreteras (2014)

TIPO DE CAMINOS	TRAFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	DESVIACION ESTANDAR NORMAL (ZR)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP1	150,001	300,000	65%	-0.385
	TP2	300,001	500,000	70%	-0.524
	TP3	500,001	750,000	75%	-0.674
	TP4	750,001	1,000,000	80%	-0.842
Resto de Caminos	TP5	1,000,001	1,500,000	80%	-0.842
	TP6	1,500,001	3,000,000	85%	-1.036
	TP7	3,000,001	5,000,000	85%	-1.036
	TP8	5,000,001	7,500,000	85%	-1.282
	TP9	7,500,001	10'000,000	90%	-1.282
	TP10	10'000,001	12'500,000	90%	-1.282
	TP11	12'500,001	15'000,000	90%	-1.282

TP12	15'000,001	20'000,000	90%	-1.282
TP13	20'000,001	25'000,000	90%	-1.282
TP14	25'000,001	30'000,000	90%	-1.282
TP15	>30'000,000		95%	-1.645

- **Módulo de reacción de la subrasante (K_o)**

El coeficiente de balasto relaciona el asentamiento de la subrasante con el esfuerzo de compresión.

La estimación del coeficiente de balasto mediante la prueba de carga sobre una placa es bastante costosa. Es por ello que es determinado por correlación con el ensayo de California Bearing Ratio (CBR). A pesar de que el valor no es exacto, esto no es importante, ya que según AASHTO las variaciones de este valor asumido no afectarán de manera significativa a los requerimientos de espesores.

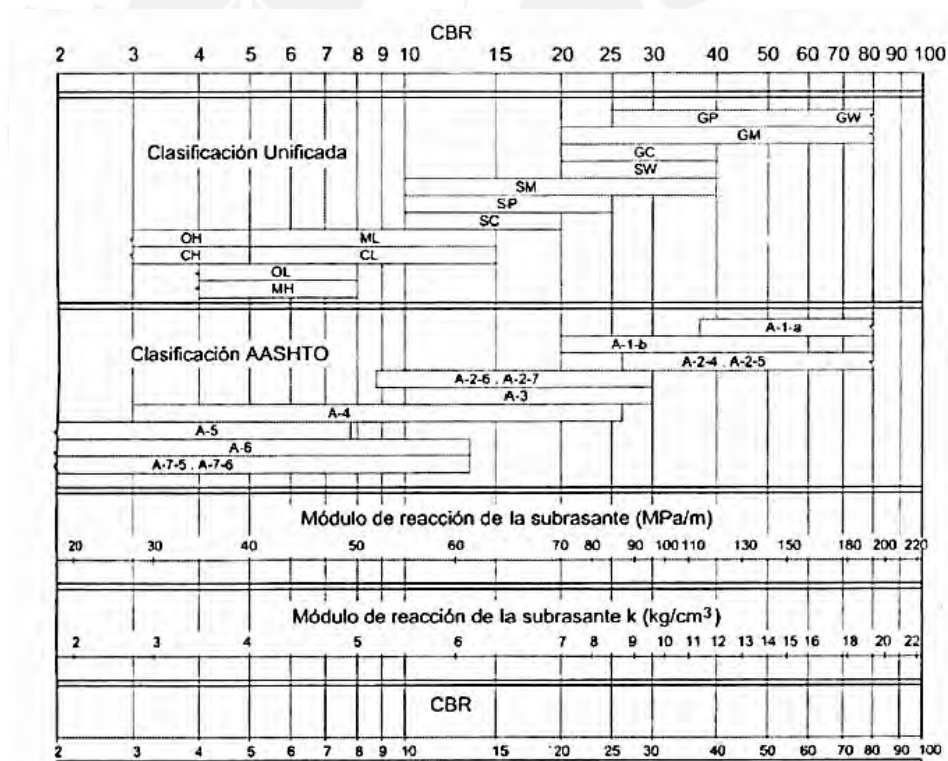


Figura 14 Relación del coeficiente de reacción con el CBR Fuente Manual de Carreteras (2014)

- **Coefficiente de reacción combinado (K_c)**

El coeficiente de reacción combinado contempla la mejora en las condiciones de apoyo y es obtenida a través de la siguiente ecuación.

$$Kc = \left(1 + \left(\frac{h}{38} \right)^2 * \left(\frac{K1}{K0} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{0.5} * K0 \left(\frac{MPa}{m} \right)$$

- **Módulo de rotura (MR)**

El módulo de rotura es el parámetro que considera el efecto de flexión. Para su cálculo el Manual de carreteras en la página 231 plantea la siguiente ecuación.

$$Mr = a\sqrt{fc} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Los valores de “a” son desde 1.99 hasta 3.18.

- **Modulo elástico del concreto (E)**

Es un valor que relaciona las deflexiones, curvaturas y tensiones. Para un concreto típico, el American Concrete Institute (ACI) propuso la siguiente relación.

- $Ec = 57000(fc)^{0.5} \text{ (Mpa)}$

- **Drenaje (Cd)**

El coeficiente de drenaje es un parámetro importante, ya que el agua es el principal causante de un deterioro prematuro del pavimento. El Manual de Carreteras contempla las siguientes tablas según la calidad de drenaje para obtener el coeficiente.

Tabla 7 Tiempo de saturación Fuente Manual de Carreteras (2014)

CALIDAD DE DRENAJE	50% DE SATURACIÓN EN:	85% DE SATURACIÓN EN:
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	más de 10 horas
Muy Pobre	El agua no drena	mucho más de 10 horas

Tabla 8 Coeficiente de drenaje Fuente Manual de Carreteras (2014)

CALIDAD DE DRENAJE	

	% del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1%	1 a 5%	5 a 25%	> 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
Regular	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy Pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

- **Transferencia de carga (J)**

Es importante una adecuada transferencia de cargas entre las capas para controlar la magnitud de las deformaciones en las juntas, ya que las excesivas deflexiones causan un bombeo del material de la sub base que en el futuro, debido a la ausencia de un soporte, se producirán fisuras en el concreto.

Según el Manual de Carreteras se recomienda un valor de 3.2, según los tests empíricos de AASHTO.

Pavimento Permeable

Según el ACI 522R - 26, para el diseño de pavimentos permeables se debe de considerar la parte estructural y la parte hidráulica.

Según el ACI 330R – 08, para la obtención del tamaño de capa se puede aplicar la metodología de AASHTO o PCA. El método elegido es AASHTO, debido a que los espesores calculados son más conservadores. El desarrollo de la metodología será igual al del pavimento rígido.

Para el diseño de la mezcla se tienen las siguientes consideraciones:

- **Granulometría del agregado:**

Se recomienda que el agregado sea graduado para alcanzar la mayor resistencia posible, ya que cuando el agregado es uniforme se obtiene un menor valor; asimismo, a mayor diámetro del agregado disminuye la capacidad de compresión.

En adición, el agregado elegido debe cumplir con la norma ASTM C33-07 y ASTM D488-07.

- **Relación entre el agregado fino y agregado grueso:**

Se recomienda, que la relación entre el agregado fino y el agregado grueso se encuentre en el rango de 0.03 – 0.05. Por un lado, una relación inferior puede generar una menor cantidad de enlaces, produciendo una disminución de la resistencia; además, existe el riesgo de ataques químicos hacia el conglomerante. Por otro lado, una relación superior puede producir que el mortero descienda y al cementarse produzca una disminución en la permeabilidad, aunque este problema; también, dependerá de la relación de agua y cemento (w/c)

- **Relación entre el agua y cemento:**

La recomendación de agua y cemento depende del método de compactación. Por un lado, si se realiza una compactación por vibración, entonces esta se debe encontrar entre 0.5 a 0.7; además, el valor elegido debe considerar la relación entre agregado fino y grueso. Por otro lado, si se realiza una compactación por apisonado, entonces la relación se debe de encontrar entre 0.35 a 0.5. A diferencia del anterior caso, el valor elegido es independiente de la relación entre agregado fino y grueso.

Para el diseño, es necesario saber las propiedades que tiene el agregado a utilizar, donde se deberá evaluar su granulometría (ASTM C-136), densidad relativa, densidad de masa (ASTM C-29) y absorción de agregado (ASTM C-29).

Luego es necesario obtener la relación agua/cemento (a/c), porcentaje de absorción, el tamaño del agregado y su peso correspondiente. Para el peso se debe usar la tabla mostrada en el ACI 211.3R, donde se especifica el porcentaje de agregado fino.

Tabla 9 Valores efectivos de b/bo. Fuente ACI 211.3R

PORCENTAJE DE AGREGADO FINO (%)	b/bo	
	N° 8 (3/8")	N° 67 (3/4")
1	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

Wa: Peso del agregado

$$W_a = b/bo \times W \text{ unitario agregado}$$

W_{ssa}: Peso saturado superficialmente seco del agregado

$$W_{ssa} = W_a \times (1 - \% \text{ absorción}/100)$$

Para determinar el volumen de pasta, el ACI 211.3 propone el siguiente gráfico.

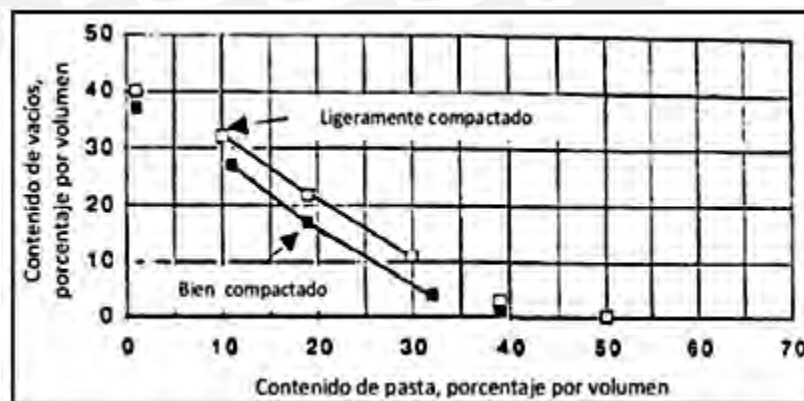


Figura 15 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta. Fuente: ACI 211.3

Con tal valor, es posible determinar el volumen del agregado, cemento y agua mediante las siguientes relaciones.

$$\text{Volumen de pasta } (V_p) = \text{Vol. Cemento} + \text{Vol. Agua}$$

$$V_p = (c / \text{PesoEsp.Cemento}) + (a / \text{PesoEsp.Agua})$$

$$\text{PesoEsp.Cemento} = 3.10 - 3.25 \text{ gr/cm}^3$$

Elegiremos en promedio 3.15 gr/cm^3

$$\text{PesoEsp.Agua} = 1 \text{ Ton/m}^3$$

$$V_p = (c / (3.15 \cdot 1000)) + (a / 1000)$$

$$\text{Volumen del agregado} = P. \text{ agregado} / P. \text{ esp. (seco)}$$

$$\text{Volumen del cemento} = P. \text{ cemento} / P. \text{ esp. cemento}$$

$$\text{Volumen de Agua} = \text{Agua} / P. \text{ esp. Agua}$$

Una vez que se halla el volumen de pasta se tienen que respetar las consideraciones dadas por el ACI 211, la cual dice que se debe disminuir un 2% del volumen de pasta en cada 10% de agregado fino.

3.3. Diseño de Pavimentos

Diseño de Pavimento Flexible

- **Tránsito (ESALs)**

Para hacer el cálculo de ESAL, se tuvieron en consideraciones ciertos requisitos de diseño. Los cuales son los siguientes:

Numero de calzadas: 1

Numero de sentidos: 2

Carriles por sentido: 1

Para estos cálculos, al no contar con un dato exacto de la cantidad de vehículos que ingresan a dicho estacionamiento, se tomara en cuenta la lista de personas que ingresaron y salieron del aeropuerto durante todo el año 2019.

Según la página del CORPAC en Jauja ingresaron y salieron un total de 228 423 personas al año.

Según la Norma se debe obtener el Índice Medio Diario.

$$\text{IMD} = 228\,423 / 365 = 626 \text{ vehículos/día}$$

Factor de Autos Liviano = 0.001

Según el Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI), Junín tuvo un factor de crecimiento vehicular (r) del 8.2% y el periodo de análisis a desarrollar será de 20 años.

$$\text{Factor Fca} = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Fca = 46.79

Tabla 10 Factor para el carril de diseño. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.1

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional (Fd)	Factor Carril (Fc)	Factor Ponderado Fd x Fc para carril de diseño
1 calzada (para IMDa total de la calzada)	1 sentido	1	1.00	1.00	1.00
	1 sentido	2	1.00	0.80	0.80
	1 sentido	3	1.00	0.60	0.60
	1 sentido	4	1.00	0.50	0.50
	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
2 calzadas con separados central (para IMDa total de las dos calzadas)	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
	2 sentidos	3	0.50	0.60	0.30
	2 sentidos	4	0.50	0.50	0.25

Con esta tabla se obtiene un Factor ponderado de 0.50, utilizando los datos, inicialmente bridados.

Con el factor ponderado y el IMD se puede hallar el número de vehículos por carril.

$$\text{Vehículos / Carril} = (626 \text{ veh/día}) * (365 \text{ días/año}) * 0.50 = 114\ 245 \text{ veh / año}$$

$$\text{ESAL} = \text{Fca} * \text{Factor Auto Liviano} * \text{Vehículo/Carril}$$

$$\text{ESAL} = 46.79 * 0.001 * 228\ 423 = 5345.52$$

Con este ESAL obtenido se tomará en cuenta, según las tablas que indica la Norma, el tipo de tráfico que se utilizará para el diseño.

Esta expresión, en la Norma AASHTO 93, se conoce como ESALs de 8.2 t.

Tabla 11 Tipo de tráfico. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.1

TIPOS TRÁFICO PESADO EXPRESADO EN EE	RANGOS DE TRÁFICO PESADO EXPRESADO EN EE
T_{P0}	> 75,000 EE ≤ 150,000 EE
T_{P1}	> 150,000 EE ≤ 300,000 EE
T_{P2}	> 300,000 EE ≤ 500,000 EE
T_{P3}	> 500,000 EE ≤ 750,000 EE
T_{P4}	> 750,000 EE ≤ 1'000,000 EE

Para esta tesis se obtuvieron datos de la cantidad de pasajeros que salieron e ingresaron al aeropuerto de Jauja, donde se obtuvo un ESAL muy pequeño, calculado anteriormente, con este dato tenemos un tipo de tráfico “ T_{P0} ”

El valor de CBR promedio de la subrasante es de 26.09% según el “Estudio Geotécnico para Diseñar la Estructura del Pavimento en la Nueva Carretera Central, tramo tanta – Canchayllo”.

Tabla 12 Categoría de Subrasante. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.4

CATEGORIAS DE SUBRASANTE	CBR
So: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S5: Subrasante Extraordinaria	De CBR ≥ 30%

Con esta tabla obtenemos una subrasante muy buena, por lo tanto, no

se necesitará estabilizar el suelo.

El CBR nos va a indicar también el módulo resiliente de la subrasante (Mr4), que en este caso sería 20 558 PSI.

Para el módulo de resiliencia de la base y subbase, según lo que indica la Norma AASHTO 93, utilizaremos los valores de 29 000 y 17 000 respectivamente.

- **Módulo resiliente (MR)**

Tabla 13 Módulo Resiliente de la Subrasante. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.5

CBR% SUBRASANTE	MÓDULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (PSI)	MÓDULO RESILIENTE SUBRASANTE (MR) (MPA)
19	16,819.00	115.96
20	17,380.00	119.83
21	17,931.00	123.63
22	18,473.00	127.37
23	19,006.00	131.04
24	19,531.00	134.86
25	20,048.00	138.23
26	20,558.00	141.74
27	21,060.00	145.20
28	21,556.00	148.62
29	22,046.00	152.00
30	22,529.00	155.33

- **Confiabilidad (R), la desviación estándar normal (ZR) y la desviación estándar (So)**

Para poder diseñar el pavimento flexible hay necesidad de saber el porcentaje de confiabilidad (R) para un diseño de una sola etapa de diseño de 20 años que tiene la zona, esto depende del tráfico hallado anteriormente (T_{P0}). Con esto se tiene un R de 65%

Tabla 14 Nivel de Confiabilidad (R). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.6

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)
CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	T _{p0}	100,000	150,000	65%
	T _{p1}	150,001	300,000	70%
	T _{p2}	300,001	500,000	75%
	T _{p3}	500,001	750,000	80%
	T _{p4}	750,001	1,000.000	80%
RESTO DE CAMINOS	T _{p5}	1,000.001	1,500.000	85%
	T _{p6}	1,500.001	3,000.000	85%
	T _{p7}	3,000.001	5,000.000	85%
	T _{p8}	5,000.001	7,500.000	90%
	T _{p9}	7,500.001	10'000.000	90%
	T _{p10}	10'000.001	12'500.000	90%
	T _{p11}	12'500.001	15'000.000	90%
	T _{p12}	15'000.001	20'000.000	95%
	T _{p13}	20'000.001	25'000.000	95%
	T _{p14}	25'000.001	30'000,000	95%
	T _{p15}		> 30'000,000	95%

Para hallar la desviación estándar normal (Zr) se debe tomar en cuenta el CBR o el tráfico T_{p0}, con la tabla de la Norma ASSHTO 93 se obtiene un Zr de -0.385.

Tabla 15 Desviación estándar Normal (Zr). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.8

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Zr)
CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	T _{p0}	100,000	150,000	-0.385
	T _{p1}	150,001	300,000	-0.524
	T _{p2}	300,001	500,000	-0.674
	T _{p3}	500,001	750,000	-0.842
	T _{p4}	750,001	1,000.000	-0.842

La Norma AASHTO 93 recomienda usar una desviación estándar combinada (So) de 0.45 para pavimentos flexibles.

- **Diferencial de serviciabilidad (Δ PSI)**

“El índice de Serviciabilidad Presente varía de 0 a 5, siendo 5 la mejor puntuación con respecto a comodidad y 0 el puntaje más bajo” (Norma

AASHTO 93).

Tabla 16 Índice de Serviciabilidad Inicial (PI). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.10

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)
CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	T _{p0}	100,000	150,000	3.8
	T _{p1}	150,001	300,000	3.8
	T _{p2}	300,001	500,000	3.8
	T _{p3}	500,001	750,000	3.8
	T _{p4}	750,001	1,000.000	3.8

Con el tipo de tráfico hallado inicialmente se obtiene un índice de serviciabilidad inicial (P_i) de 3.80.

Tabla 17 Índice de Serviciabilidad final (P_T). Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.11

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)
CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	T _{p0}	100,000	150,000	2
	T _{p1}	150,001	300,000	2
	T _{p2}	300,001	500,000	2
	T _{p3}	500,001	750,000	2
	T _{p4}	750,001	1,000.000	2

El valor del índice de serviciabilidad final (P_T) es de 2.00

La variación de serviciabilidad (Δ PSI) es la resta entre P_i y P_T

$$\Delta \text{ PSI} = 3.80 - 2.00 = 1.80$$

Sabemos estadísticamente, según el plan de desarrollo de la Municipalidad Provincial de Jauja, que el flujo de lluvias en la ciudad de Jauja es de 31 días al año y la temperatura del aire es, en promedio, 11.25°C.

$$\% \text{ Lluvia} = \frac{31}{365} * 100 = 8.5 \%$$

Tabla 18 Calidad de drenaje del pavimento flexible. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.14

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

- **Calidad de Drenaje:**

Tabla 19 Coeficiente de saturación. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.15

CALIDAD DE DRENAJE	P=% DEL TIEMPO EN QUE EL PAVIMENTO ESTA EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD CERCANO A LA SATURACIÓN			
	Menos que 1%	1% - 5%	5% - 25%	Mayor que 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Mediano	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Malo	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy malo	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

La tabla mostrada nos permite hallar el coeficiente de saturación mediante el porcentaje de saturación a la que estará sometida el pavimento.

Sin embargo, el Manual de Carreteras recomienda usar el valor de 1 para la base y subbase en el caso de los pavimentos flexibles.

Con la siguiente tabla de la Norma AASHTO 93 se puede hallar los coeficientes estructurales de las capas del pavimento a_1 , a_2 y a_3 , siendo estos los de la capa superficial, la capa base y la subbase, respetivamente.

Tabla 20 Coeficiente estructural de la capa superficial. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.13

COMPONENTE DEL PAVIMENTO	COEFICIENTE	VALOR COEFICIENTE ESTRUCTURAL (a ₁)	OBSERVACIÓN
CAPA SUPERFICIAL			
Carpeta Asfáltica en Caliente, módulo 2.965 MPa (430,000 PSI) a 20°C (68° F).	a ₁	0.170/cm	Capa Superficial recomendado para todos los tipos de tráfico.
Carpeta Asfáltica en Frío, mezcla asfáltica con emulsión.	a ₁	0.125/cm	Capa Superficial recomendado para Tráfico ≤ 1'000.000 EE
Micropavimento 25mm	a ₁	0.130/cm	Capa Superficial recomendado para Tráfico ≤ 1'000.000 EE
Tratamiento Superficial Bicapa	a ₁	0.250/cm	Capa Superficial recomendado para Tráfico ≤ 500.000 EE No aplica en tramos con pendientes mayor a 8%; y, en vías en curvas pronunciadas, curvas de volteo, curvas y contracurvas, y en tramos que obliguen el frenado de vehículos.
Lechada Asfáltica (slurry seal) de 12mm	a ₁	0.150/cm	Capa Superficial recomendado para Tráfico ≤ 500.000 EE No aplica en tramos con pendientes mayor a 8% y en tramos que obliguen el frenado de vehículos
(*) Valor Global (no considera el espesor)			

Para los pavimentos en estacionamiento no va haber necesidad de frenado fuerte de los vehículos y, en nuestro caso, se tiene un tránsito menor a 500 000 EE. Por lo que se utilizara un tratamiento superficial bicapa con un a₁ de 0.250 /cm o 0.635 / pulg.

Tabla 21 Coeficiente estructural de la Base granular. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.13

BASE			
Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS	a ₂	0.052/cm	Capa de base recomendada para Tráfico ≤ 5'000.000 EE
Base Granular CBR 100%, compactada al 100% de la MDS	a ₂	0.054/cm	Capa de base recomendada para Tráfico ≤ 5'000.000 EE
Base Granular tratada con Asfalto (Estabilidad Marshall = 1500lb)	a ₂	0.115/cm	Capa de base recomendada para todos los tipos de tráfico.
Base Granular tratada con Cemento (resistencia a la compresión 7 días = 35kg/cm ²)	a ₂	0.070/cm	Capa de base recomendada para todos los tipos de tráfico.
Base Granular tratada con Cal (resistencia a la compresión 7 días = 12kg/cm ²)	a ₂	0.080/cm	Capa de base recomendada para todos los tipos de tráfico.

El coeficiente estructural utilizado para la base será de base granular tratada con asfalto, por lo que se obtendrá un a₂ de 0.115 /cm o 0.292 / pulg

Tabla 22 Coeficiente estructural de la Subbase granular. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.13

SUB BASE			
Sub Base Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS	a ₃	0.047/cm	Capa de sub base recomendada para Tráfico ≤ 15'000.000 EE
Sub Base Granular CBR 60%, compactada al 100% de la MDS	a ₃	0.050/cm	Capa de sub base recomendada para Tráfico ≤ 15'000.000 EE

En la subbase granular un a₃ de 0.047 /cm o 0.114 / pulg, ya que la norma nos recomienda ese valor para un tráfico menor de 15 000 000 EE.

Con el ESAL obtenido, inicialmente, se podrá apreciar que se tiene un espesor de capa asfáltica mucho menor al mínimo recomendado por la Norma.

Tabla 23 Valores recomendado de espesores mínimos. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.17

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		CAPA SUPERFICIAL	CAPA GRANULAR
CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	T _{p1}	150,001	300,000	TSB, o Lechada Asfáltica (Slurry Seal): 12mm, o Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en frío: 60mm Carpeta Asfáltica en caliente: 50mm	150 mm
	T _{p2}	300,001	500,000	TSB, o Lechada Asfáltica (Slurry Seal): 12mm, o Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en frío: 60mm Carpeta Asfáltica en caliente: 60mm	150 mm
	T _{p3}	500,001	750,000	Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en frío: 60mm Carpeta Asfáltica en caliente: 70mm	150 mm
	T _{p4}	750,001	1,000.000	Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en frío: 70mm Carpeta Asfáltica en caliente: 80mm	200 mm

$$\text{Log}(w18) = Z_r * S_o + 9,36\text{Log}(SN1 + 1) - 0,2 + \left(\frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta\text{PSI}}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \left(\frac{1094}{(SN1 + 1)^{5,19}}\right)} \right) + 2,32\text{Log}(Mri) - 8,07$$

Capa asfáltica

$$\text{Log}(5345.52) = -0.385 * 0.45 + 9,36 * \text{Log}(SN1 + 1) - 0,2 + \left(\frac{\text{Log}\left(\frac{1.8}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \left(\frac{1094}{(SN1 + 1)^{5,19}}\right)} \right) + 2,32 * \text{Log}(20558) - 8,07$$

Despejando el valor de SN1

$$SN1 = 0.704$$

$$H1 = SN1 / a1 = 0.704 / 0.432 = 1.63 \text{ pulg}$$

$$H1 \text{ red} = 4.14 \text{ cm}$$

H min (Norma CE.010) = 5 cm

Capa Base

$$\begin{aligned} \log(5345.52) = & -0.385 * 0.45 + 9,36 * \log(SN1 + 1) - 0,2 + \left(\left(\frac{\log\left(\frac{1.8}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \left(\frac{1094}{(SN1 + 1)^{5,19}}\right)} \right) \right) \\ & + 2,32 * \log(17000) - 8,07 \end{aligned}$$

Despejando el valor de SN2

$$SN2 = 0.783$$

$$H2 = SN2 / a2 = 0.783 / 0.292 = 2.68 \text{ pulg}$$

$$H2 \text{ red} = 6.81 \text{ cm}$$

Según la Norma para un 30% > CBR > 20% y Tpo el espesor de a Base es la siguiente:

H = 10 cm

Capa Subbase

$$\begin{aligned} \log(10687.91) = & -0.385 * 0.45 + 9,36 * \log(SN1 + 1) - 0,2 + \left(\left(\frac{\log\left(\frac{1.8}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \left(\frac{1094}{(SN1 + 1)^{5,19}}\right)} \right) \right) \\ & + 2,32 * \log(20558) - 8,07 \end{aligned}$$

Despejando el valor de SN1

$$SN3 = 0.705$$

$$H3 = SN3 / a3 = 0.705 / 0.119 = 5.92 \text{ pulg}$$

$$H3 \text{ red} = 15.04 \text{ cm}$$

H = 15 cm

Diseño de Pavimento Rígido

- **Tránsito (ESALs)**

Se tiene que el valor de ESALs es de 10687.91, según el cuadro 14.5 del “Manual de carreteras”, para esa cantidad de ejes equivalentes corresponde un tipo de tráfico igual Tp_0 .

- **Diferencial de serviciabilidad (ΔPSI)**

Según el cuadro 14.4 del “Manual de carreteras”, para un nivel de tráfico igual a Tp_0 corresponde los siguientes valores de índice de serviciabilidad:

- Índice de serviciabilidad inicial (P_i) : 4.10
- Índice de serviciabilidad final (P_t) : 2.00
- Diferencial de serviciabilidad (ΔPSI) : 2.10

- **Confiabilidad (R), la desviación estándar normal (ZR) y la desviación estándar (So)**

Según el cuadro 14.5 del “Manual de carreteras”, para un nivel de tráfico igual a Tp_0 corresponde los siguientes valores para la confiabilidad y desviación estándar:

- Confiabilidad (R) : 65%
- Desviación Estándar Normal (ZR): -0.385

Asimismo, para la desviación estándar se recomienda un valor de 0.35 en la pág. 228 del Manual de Carreteras.

- Desviación estándar (So) : 0.35

- **Módulo de reacción de la subrasante (K_o)**

El valor de CBR promedio de la subrasante es de 26.09%, la cual es obtenida en el “Estudio Geotécnico para Diseñar la Estructura del Pavimento en la Nueva Carretera Central, tramo tanta – Canchayllo”. El estudio realizado en un tramo de 10Km se encuentra cerca del estacionamiento del aeropuerto de Jauja.

Según la figura 14.1 del “Manual de carreteras”, para un CBR de 26.09%

corresponde un K_c de 8.6Kg/cm³ o 84.3MPa/m.

- **Coefficiente de reacción combinado (K_c)**

Según el cuadro 14.6 del “Manual de carreteras”, el CBR mínimo en la subbase, para un tráfico menor de $15 \cdot 10^6$, es de 40%. Según el cuadro 14.1, le corresponde un K_1 de 12Kg/cm³ o 117.72Mpa/m.

En el inciso 14.0 del Manual de carreteras pág. 233, se recomienda un espesor de 15cm para la subbase de material granular.

$$K_c = \left(1 + \left(\frac{15}{38} \right)^2 * \left(\frac{117.72}{84.3} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{0.5} * 84.3 = 92.14 \text{ kg/cm}^3$$

- **Módulo de rotura (MR)**

Según el cuadro 14.7 del “Manual de carreteras”, para un nivel de tráfico Tp_0 se recomienda una resistencia mínima de 280Kg/cm².

Considerando un valor promedio de “a” se tiene 2.59 se tiene un valor de MR de 43.339Kg/cm².

$$MR = 2.59 * \sqrt{280} = 43.339 \text{ kg/cm}^2$$

- **Modulo elástico del concreto (E)**

Según las recomendaciones el ACI se tiene que:

$$E = 57000 * (f_c)^{0.5} = 57000 * (3982.54)^{0.5} = 3597120,023 \text{ psi}$$

- **Drenaje (C_d)**

Según el “Estudio Geotécnico para Diseñar la Estructura del Pavimento en la Nueva Carretera Central, tramo tanta – Canchayllo”, el suelo es granular y por lo tanto se puede asumir un valor de 1 como coeficiente de drenaje según el Manual de Carreteras.

- **Transferencia de carga (J)**

Según el Manual de Carreteras pag223, se recomienda un coeficiente de transferencia de carga igual a 3.2.

Finalmente reemplazando todos los valores se tiene:

$$\log W18 = ZRS_o + 7.35 \log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}} + 1}$$

$$+ (4.22 - 0.32Pt) \log\left(\frac{MrCd(0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51J(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{\left(\frac{Ec}{K}\right)^{0.25}})}\right)$$

$$\log(10687.91) = -0.385 * 0.35 + 7.35 \log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log\left(\frac{2.10}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}} + 1}$$

$$+ (4.22 - 0.32 * 2) \log\left(\frac{4.242 * 1(0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 * 3.2(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{\left(\frac{24801,23}{92.141}\right)^{0.25}})}\right)$$

Dmín según el CE.0.10 = 15cm.

Diseño de Pavimento Permeable

- **Tránsito (ESALs)**

Se tiene que el valor de ESALs es de 10687.91, según el cuadro 14.5 del "Manual de carreteras", para esa cantidad de ejes equivalentes corresponde un tipo de tráfico igual Tp0.

- **Diferencial de serviciabilidad (ΔPSI)**

Según el cuadro 14.4 del "Manual de carreteras", para un nivel de tráfico igual a Tp0. corresponde los siguientes valores de índice de serviciabilidad:

- Índice de serviciabilidad inicial (Pi) : 4.10
- Índice de serviciabilidad final (Pt) : 2.00
- Diferencial de serviciabilidad (ΔPSI) : 2.10

- **Confiabilidad (R), la desviación estándar normal (ZR) y la desviación estándar (So)**

Según el cuadro 14.5 del "Manual de carreteras", para un nivel de tráfico

igual a Tp0. corresponde los siguientes valores para la confiabilidad y desviación estándar:

- Confiabilidad (R) : 65%
- Desviación Estándar Normal (ZR): -0.385

Asimismo, para la desviación estándar se recomienda un valor de 0.35 en la pág. 228 del Manual de Carreteras.

- Desviación estándar (So) : 0.35

- **Módulo de reacción de la subrasante (K_o)**

El valor de CBR promedio de la subrasante es de 26.09%, la cual es obtenida en el “Estudio Geotécnico para Diseñar la Estructura del Pavimento en la Nueva Carretera Central, tramo tanta – Canchayllo”. El estudio realizado en un tramo de 10Km se encuentra cerca del estacionamiento del aeropuerto de Jauja.

Según el cuadro 14.1 del “Manual de carreteras”, para un CBR de 26.09% corresponde un K_c de 8.6Kg/cm³ o 84.3MPa/m.

- **Coefficiente de reacción combinado (K_c)**

Según el cuadro 14.6 del “Manual de carreteras”, el CBR mínimo en la subbase, para un tráfico menor de 15*10⁶, es de 40%. Según el cuadro 14.1, le corresponde un K₁ de 12Kg/cm³ o 117.72Mpa/m.

Según el ACI 522R-26, se recomienda un espesor de 20cm para la base.

$$K_c = \left(1 + \left(\frac{20}{38} \right)^2 * \left(\frac{117.72}{84.3} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{0.5} * 84.3 = 97.81 \text{ Mpa}$$

- **Módulo de rotura (MR)**

Según los ensayos realizados en la “Propuesta de un pavimento permeable para estacionamientos en zonas urbanas, que evite el estancamiento de aguas pluviales” se obtiene en promedio una resistencia de 9.83 Mpa como resistencia a la compresión.

Considerando un valor promedio de “a” se tiene 2.59 se tiene un valor de MR de 43.339Kg/cm².

$$MR = 2.59 * \sqrt{100.23} = 25.93 \text{ kg/cm}^2$$

- **Modulo elástico del concreto (E)**

Según las recomendaciones el ACI se tiene que:

$$E = 57000 * (f_c)^{0.5} = 57000 * (1425.61)^{0.5} = 2152163.30 \text{ psi}$$

- **Drenaje (Cd)**

Según el “Estudio Geotécnico para Diseñar la Estructura del Pavimento en la Nueva Carretera Central, tramo tanta – Canchayllo”, el suelo es granular y por lo tanto se puede asumir un valor de 1 como coeficiente de drenaje según el Manual de Carreteras.

- **Transferencia de carga (J)**

Según lo que indica el Manual de Carreteras, se recomienda un coeficiente de transferencia de carga igual a 3.2.

Finalmente reemplazando todos los valores se tiene:

$$\begin{aligned} \log W18 = ZRS_o + 7.35 \log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}} + 1} \\ + (4.22 - 0.32Pt) \log\left(\frac{MrCd(0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51J(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{(\frac{Ec}{K})^{0.25}})}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log (1068.76) = -0.385 * 0.35 + 7.35 \log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log\left(\frac{2.10}{4.5 - 1.5}\right)}{\frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}} + 1} \\ + (4.22 - 0.32 * 2) \log\left(\frac{2.543 * 1(0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 * 3.2(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{(\frac{14838.60}{97.81})^{0.25}})}\right) \end{aligned}$$

Dmín según el ACI 330R es de 10cm.

4. Comparación de Resultados

4.1. Mantenimiento:

La siguiente gráfica es una comparativa entre las condiciones del pavimento flexible y rígido según lo que indica la Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA), donde podemos apreciar cómo se degrada las condiciones con las que inicia la vida del pavimento.

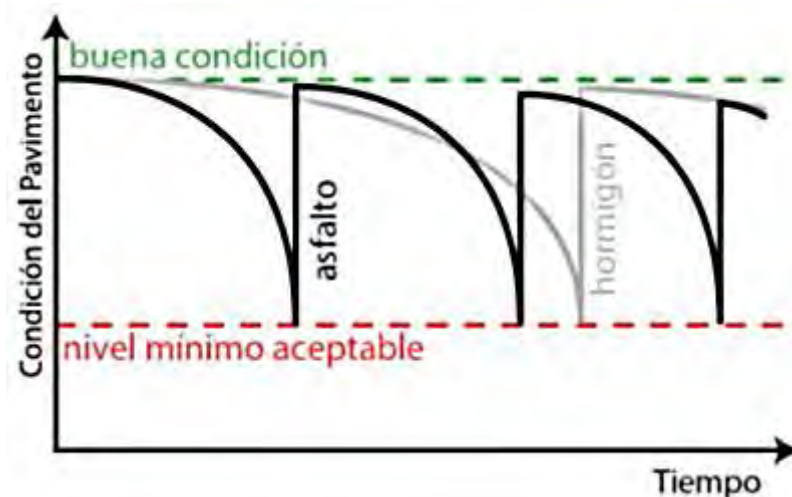


Figura 16 Análisis de condición del ciclo de vida. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA, 2008)

Para realizar esta gráfica el ACPA hizo una supervisión durante los 90 años de vida útil de los pavimentos rígidos y flexibles lo cual ayudó a determinar los tiempos que requería cada tipo de pavimento para su mantenimiento correspondiente. Como se puede apreciar el pavimento flexible tiende a deteriorarse en menos tiempo, haciendo necesaria la reparación del mismo cada cierto tiempo. El pavimento rígido tiene un tiempo de vida, con sus condiciones iniciales buenas, más largo que el flexible. Por ende, sus reparaciones son después de un tiempo más prolongado. Este factor influye mucho al momento de decidir entre que pavimento se emplea, ya que el costo de mantenimiento crece como se indica a continuación.

Pavimento Flexible:

Para este tipo de pavimento es necesario un mantenimiento constante, este mantenimiento consiste, primero, en la limpieza de la zona, luego se aplica material bituminoso y para cubrir este material se coloca encima una capa de arena, por último, limpiar todo el material suelto en la zona reparada. Otro método que se tiene en consideración es el del bacheo superficial manual, el

cual consiste en limpiar la zona a reparar, colocar el imprimante y por último realizar una comprobación de la temperatura que tiene la capa asfáltica para poder terminar nivelando todo el terreno.

Tabla 24 Análisis de mantenimiento del ciclo de vida del pavimento flexible. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA, 2008)

Año	Tipo de Trabajo	Descripción del trabajo
3	Mantenimiento	Sellado grietas
7	Mantenimiento	Sellado grietas
15	Conservación	Rego de sello
15	Mantenimiento	Sellado grietas
22	Mantenimiento	Sellado grietas
30	Reconstrucción	Retiro pavimento
30	Reconstrucción	Reemplazo pavimento
33	Mantenimiento	Sellado grietas
37	Mantenimiento	Sellado grietas
45	Conservación	Riego de sello
45	Mantenimiento	Sellado grietas
52	Mantenimiento	Sellado grietas
60	Reconstrucción	Retiro pavimento
60	Reconstrucción	Reemplazo pavimento

En la tabla 25 se acota con mayor detalle de mantenimiento en un pavimento flexible a comparación de la figura 16.

Pavimento Rígido:

No tiene la necesidad de realizarle mantenimientos constantes, como se muestra en la imagen, presentada inicialmente. Sin embargo, el proceso que se realiza para su mantenimiento, consiste en llenar y sellar las juntas y grietas que se generaran en el transcurso de su vida útil. Como segundo método de mantenimiento, se tiene el llenado de áreas fragmentadas y descascaradas.

En la siguiente tabla, obtenida de la Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA), se puede ver el tipo de mantenimiento según la vida útil que lleva teniendo el pavimento rígido; sin embargo, podemos apreciar que estos

ensayos fueron realizados para una vida útil de hasta 60 años, la cual es mayor a la vida útil promedio de dicho pavimento.

Tabla 25 Análisis de mantenimiento del ciclo de vida del pavimento rígido. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA, 2008)

Año	Tipo de Trabajo	Descripción del trabajo
15	Mantenimiento	Sellado Juntas (15%)
30	Mantenimiento	Sellado Juntas (15%)
30	Conservación	Reparación profundidad total (paneles 2% c/1.83m reparados)
30	Conservación	Reparación profunda parcial (juntas reparadas 3%)
45	Mantenimiento	Sellado juntas (30%)
60	Mantenimiento	Sellado juntas (30%)
60	Conservación	Reparación profundidad total (paneles 4% c/1.83m reparados)

En comparación con el diseño que presenta la tesis, la cual es un diseño para 20 años, podemos darnos cuenta que el pavimento flexible, hasta esa cantidad de años, necesitaría un proceso de mantenimiento que consta de realizar el sellado de grietas por lo menos cuatro veces y un proceso de conservación a la mitad de su tiempo de vida.

Para los pavimentos rígidos, que también se diseñó para 20 años, solamente será necesario un sellado de juntas.

Pavimento Permeable:

Según lo que nos indica la norma ACI 522 para el pavimento permeable “existen dos tipos de mantenimiento que son utilizados normalmente, los cuales son el lavado a presión y la aspiración a potencia.” (Norma ACI 522). Para el caso de la presión, se debe tener la potencia con la que se le aplica, ya

que, si se genera demasiada presión, esta podría llegar a dañar la capa asfáltica permeable, de la misma manera la aspiración a potencia.

Un estudio realizado por la Asociación de Concretos y Productos de Florida en 1990, según como indican en la Norma ACI 522, indica que, luego de cinco estudios realizados, se llegó a la conclusión de que “la infiltración se encontraba entre un 0.16 a 3.4% del volumen total de vacíos una vez transcurridos 8 años de vida útil. Además, el mantenimiento de la superficie logró restaurar más del 50% de la permeabilidad del pavimento dañado” (Norma ACI 522)

4.2. Costo:

La siguiente gráfica, sacada de la Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA), indica la diferencia de costos en el mantenimiento entre un pavimento flexible y rígido a lo largo de su vida útil.

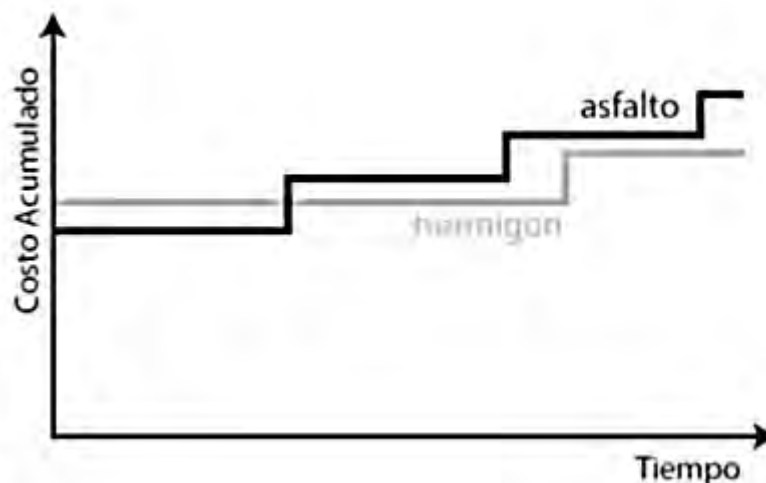


Figura 17 Análisis de costo del ciclo de vida. Fuente: Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA, 2008)

Según lo podemos apreciar en la gráfica anterior, el costo entre el pavimento flexible y rígido varían dependiendo de la etapa en la que se encuentre la obra, ya que, según estudios realizados por la Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA) el pavimento rígido empieza teniendo un mayor costo en comparación con el pavimento flexible, sin embargo, al momento en el que se va incrementando el tiempo de uso, el costo del pavimento flexible toma mayor protagonismo debido al tipo de mantenimiento que explicamos en la parte superior.

Según el estudio realizado en la tesis de Morales (2017), a diferencia de ambos pavimentos, el pavimento permeable tiene un menor costo al inicio de obra, sin embargo, su costo se ve incrementado durante el tiempo de vida útil debido al tipo de mantenimiento que requiere para que cumpla, adecuadamente, con su tiempo de vida y mantenga sus propiedades de porosidad. Adicionalmente se genera un ahorro del presupuesto al no tener la necesidad de construir un “área de almacenamiento, lo que generará una disminución en los costos empleados para la construcción de pozos de almacenamiento, la instalación de bombas, los tubos de drenaje, y su mantenimiento o solo necesitar un sistema de alcantarillado mucho menor” (“*Concreto Permeable (Ecocreto)*”, 2016).

Costo de Construcción:

Para lograr obtener un aproximado de los costos de construcción en los tres tipos de pavimentos presentados, se basó en datos brindados por la revista costos (edición 2021-diciembre) y TECNO GROUP, página web de consultoría de precios unitarios de construcción en el país de México. Para el ultimo se tuvo que realizar un cambio de moneda de pesos mexicanos a nuevos soles.

Pavimento Rígido

Tabla 26 Costos Unitarios del Pavimento de Concreto. Fuente Revista Costos (2021-dic)

Clave	Descripción del Análisis de Precio Unitario				Unidad
	Pavimento de concreto $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$ de 15.0 cm.				m ²
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
	Material				
HU 2.2.2	Base granular $E=0.15M$ (Afirmado producido con equipo)	m ²	1	27.44	27.44
OE.2.3.4	Concreto premezclado $f_c=280\text{kg/cm}^2$ – losa ($e=0.15M$)	m ²	1	42.68	42.68
	Costo Directo (S/.)				70.12

Pavimento Flexible

Tabla 27 Costos del Pavimento Asfáltico. Fuente Revista Costos (2021-dic)

Clave	Descripción del Análisis de Precio Unitario				Unidad
	Pavimento de concreto asfáltico de 5.0 cm				m2
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
	Material				
HU 2.2.1	Subbase granular E=0.10M	m2	1	11.74	11.74
HU 2.2.2	Base granular E=0.10M	m2	1	18.88	18.88
HU.2.4.2	Carpeta Asfáltica en caliente E=2"	m2	1	30.36	30.36
	Costo Directo (S/.)				60.98

Pavimento Permeable.

Tabla 28 Costos Unitarios del Pavimento Permeable. Fuente: Tecno Group

Clave	Descripción del Análisis de Precio Unitario				Unidad
G800125-2054	Pavimento permeable de 10 cm de espesor para vialidad tráfico ligero, incluye excavación de pozo de absorción de 1x1x1 m relleno de balastro de 3" de diámetro (uno cada 100 m2), una subbase de 15 cm de espesor con balastro de 1 1/2" hasta 3" d				m2
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Importe
	Material				
700101-1014	Sistema de pavimento permeable hidrocreto de f'c=250 kg/cm2 de 10 cm de espesor	m2	1.000000	54.35	54.35
103200-1060	Grava de 3/4"	m3	0.060000	62.43	1.95
103200-1165	Balastro de 1/2" a 3" de diámetro	m3	0.180000	41.56	7.48
103247-1075	Plástico de uso rudo.	m2	1.000000	0.55	0.55
	Suma de Material				64.33

	Mano de Obra				
A100105-1505	Cuadrilla de peones. Incluye: 3 peones, cabo y herramienta.	Jor	0.025000	223.66	5.59
	Suma de Mano de Obra				5.59
	Equipo				
C990120-5025	Moto conformadora mca.	h	0.100000	119.88	11.99
C990122-1030	Compactador vibratorio de rodillo liso	hr	0.200000	57.95	11.59
	Suma de Equipo				23.58
	Concepto				
G800124-1070	Corte con cortadora de disco abrasivo en pavimento de concreto	m	0.400000	1.22	0.49
	Suma de Concepto				0.49
	Base granular E=0.20M	m2	1	36.54	36.54
	Costo Directo (S/.)				130.53

Tabla 29 Comparación de Costos por m2 de pavimento. Fuente Propia

Comparación de Costos Unitarios	
Pavimento	Costo Unitario S/.
Flexible	60.98
Rígido	70.12
Permeable	130.53

Finalmente se puede concluir que el costo de construcción mayor la tiene el pavimento permeable y el menor costo es del flexible.

Esto va de acorde con el costo general, durante el tiempo de vida del

pavimento, ya que se puede observar que el pavimento flexible es el menos costoso y los pavimentos de concreto los más costosos

4.3. Resistencia a la Compresión:

Pavimento Flexible:

La norma AASHTO 93 indica que el pavimento flexible tratado con cemento tiene una resistencia a la compresión en 7 días de 35 kg/cm², esto equivale a 3.43 MPa. Ese tipo de pavimento fue el que usamos para el diseño realizado anteriormente.

Tabla 30 Tabla de resistencia a la compresión del pavimento flexible. Fuente Manual de Carreteras Cuadro 12.13 (2014)

BASE			
Base Granular CBR 80% compactada al 100% de la MDS	a2	0.052 / cm	Capa de Base recomendada para Trafico ≤ 10'000,000 EE
Base Granular CBR 100% compactada al 100% de la MDS	a2	0.054 / cm	Capa de Base recomendada para Trafico > 10'000,000 EE
Base Granular Tratada con Asfalto (Estabilidad Marshal = 1500 lb)	a2a	0.115 / cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cemento (resistencia a la compresión 7 días = 35 kg/cm ²)	a2b	0.070 cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cal (resistencia a la compresión 7 días = 12 kg/cm ²)	a2c	0.080 cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico

Pavimento Rígido:

Según lo que indica el siguiente cuadro, para un rango de tráfico menor a 5 000 000 EE se requerirá una resistencia a la compresión de 280 kg/cm², realizando la conversión a Mega Pascales, seria 27.46 MPa

Tabla 31 Valores recomendados de Resistencia del Concreto según rango de Trafico. Fuente: Manual de Carreteras Cuadro 14.7 (2014)

RANGOS DE TRÁFICO PESADO EXPRESADO EN EE	RESISTENCIA MÍNIMA A LA FLEXOTRACCIÓN DEL CONCRETO (MR)	RESISTENCIA MÍNIMA EQUIVALENTE A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (F'c)
≤ 5'000,000 EE	40 kg/cm ²	280 kg/cm ²
> 5'000,000 EE ≤ 15'000,000 EE	42 kg/cm ²	300 kg/cm ²

> 15'000,000 EE	45 kg/cm ²	350 kg/cm ²
-----------------	-----------------------	------------------------

Pavimento Permeable:

Como se puede ver en la siguiente gráfica, obtenida de la Norma ACI 522, a mayor porcentaje de vacíos, se reduce la resistencia a la compresión. Por lo tanto, podemos deducir que el concreto permeable, también permite obtener una compresión, relativamente, alta.

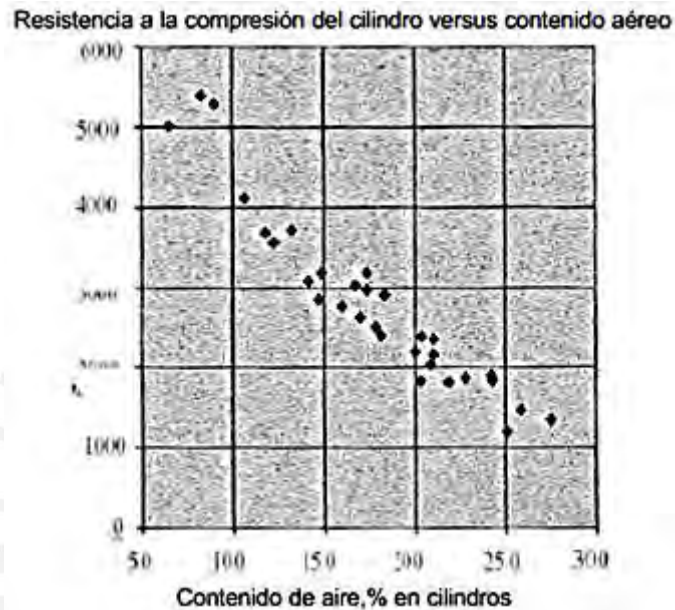


Figura 18 Resistencia a la compresión del cilindro vs contenido aéreo. Fuente Manual de Carreteras (2014)

La compresión utilizada para nuestro diseño de pavimento fue un promedio de los ensayos realizados en la “Propuesta de un pavimento permeable para estacionamientos en zonas urbanas que evita el estancamiento de aguas pluviales” realizado por Guamán (2009).

Resistencia a la compresión = 9.83 MPa

Para poder hallar el porcentaje de vacíos de debe cambiar las unidades de la resistencia a PSI por lo tanto se tendría, aproximadamente, un valor de 1500 PSI. Utilizando la tabla superior se obtiene el porcentaje de vacíos aproximado, para nuestro caso será 25%.

4.4. Resistencia a la flexión:

Pavimento Flexible:

Este pavimento se caracteriza por redistribuir las cargas a la subrasante, ya que esta actúa como una lámina flexible, la cual resiste menos flexión que un

pavimento rígido.

Pavimento Rígido:

Para el pavimento rígido según la siguiente tabla, que nos brinda la Norma AASHTO 93, la resistencia a la flexión es de 40 kg/cm² que equivale a 3.92 MPa

Tabla 32 Valores recomendados de Resistencia del Concreto según rango de Trafico. Fuente: Manual de Carreteras Cuadro 14.7

RANGOS DE TRÁFICO PESADO EXPRESADO EN EE	RESISTENCIA MÍNIMA A LA FLEXOTRACCIÓN DEL CONCRETO (MR)	RESISTENCIA MÍNIMA EQUIVALENTE A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (F'c)
≤ 5'000,000 EE	40 kg/cm ²	280 kg/cm ²
> 5'000,000 EE ≤ 15'000,000 EE	42 kg/cm ²	300 kg/cm ²
> 15'000,000 EE	45 kg/cm ²	350 kg/cm ²

Pavimento Permeable:

La siguiente gráfica nos muestra la resistencia a la flexión vs la resistencia a la compresión, con la compresión obtenida en el punto anterior y convertida a PSI, se obtiene la resistencia a la flexión, la cual sería un valor aproximado de 280 PSI, lo cual equivale a 1.93 MPa

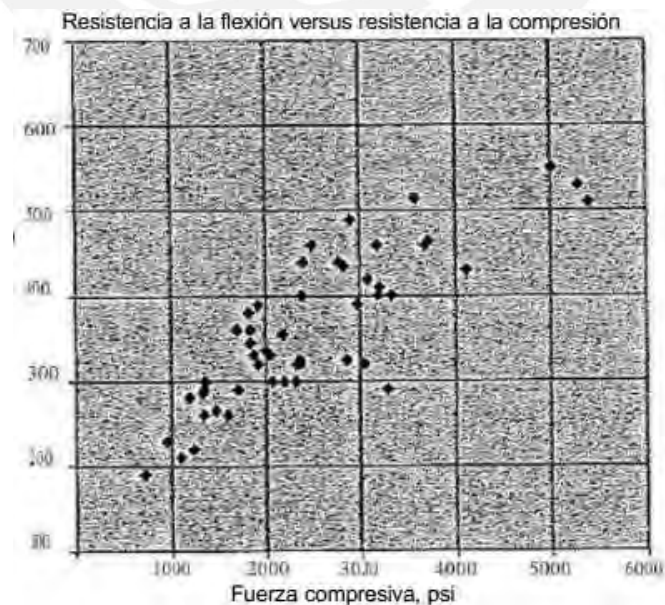


Figura 19 Resistencia a la flexión vs resistencia a la compresión. Fuente Manual de Carreteras (2014)

4.5. Durabilidad:

Pavimento Flexible:

El pavimento flexible tiene un promedio de vida útil, según lo indicado en la Norma AASHTO 93, de 10 a 15 años.

Pavimento Rígido:

El pavimento rígido tiene un promedio de vida útil, según lo indicado en la Norma AASHTO 93, de 20 a 40 años.

Pavimento Permeable:

Según estudios realizados por la Norma ACI-522 se ha determinado un promedio de vida de este material de 20 años.

Según el diseño que se realizó en la tesis, los tres tipos de pavimentos fueron realizados para un tiempo de vida de 20 años, por lo tanto, se puede comprobar que el pavimento flexible necesita mayor mantenimiento, ya que la norma indica que tiene un tiempo de vida promedio de 10 a 15 años, mientras que los pavimentos rígidos y permeables requerirá un pequeño mantenimiento o simplemente no lo requerirán.

4.6. Reciclabilidad:

Pavimento Flexible:

A lo largo del tiempo se ha logrado reutilizar con éxito el asfalto una vez que culminó su tiempo de vida útil. Gracias a las tecnologías actuales se logra reutilizar este asfalto en superficies de rodamiento, capas base o como una parte de la base granular, siendo esta una mezcla en caliente, tibias o en frío.

Pavimento Rígido:

El concreto que se usa en los pavimentos rígidos, alcanza una resistencia muy alta, la cual dificulta su reutilización, una vez que esta cumplió su tiempo de vida, sin embargo, en la actualidad, existen métodos que ayudan a hacer un proceso más sencillo la trituración del concreto. Una de las técnicas que se emplea mayormente es el Rubblizing, la cual consiste en la pulverización de la losa de pavimento rígido en partículas pequeñas de hasta 5cm como máximo.

4.7. Diferencias generales de los tres tipos de pavimento

Numero de Capas:

Según el diseño realizado podemos ver que el pavimento rígido está compuesto solo de 3 capas entre la capa de rodadura, base y subbase, el pavimento flexible tiene una mayor cantidad de capas entre las que están la capa de sellado, superficie, aglutinante, adherencia, imprimación, base y subbase, y el pavimento permeable tiene el hormigón poroso, geotextil, subbase, geotextil bajo la subbase y la subrasante.

Complejidad en la construcción de la superficie de rodadura

Asfalto: Esta conformado por una capa de agregado fino o grava triturada, que es unida con betún, el cual es un material que se deriva del petróleo. El proceso de construcción se basa en el apisonamiento de esta mezcla en caliente, para que pueda lograr compactarse y para finalizar se necesita enfriar al aire libre para que así quede lista para resistir las cargas proporcionadas.



Figura 18 Capa de rodadura de Asfalto. Fuente Cueva del Ingeniero Civil 2018

Primero se realiza la limpieza del terreno de manera manual, luego se necesita regar todo el terreno natural para hacer que no se levante el polvo y pueda afectar la mezcla colocada. Se procede a colocar la imprimación asfáltica mediante un camión imprimador. Para finalizar se realiza el vaciado de la carpeta asfáltica y se verifica que se cumpla el espesor de diseño.

Para todo este proceso es importante tener en cuenta la seguridad individual y colectiva, y adicionalmente la señalización, ya que se trabajará con material en caliente.

Concreto: Esta conformado por agregado fino y grueso, a comparación del asfalto el aglutinante que une estos materiales es el cemento, lo que genera que el pavimento sea más rígido y por ende más propenso a agrietarse.



Figura 19 Capa de rodadura de Concreto Simple. Fuente Cueva del Ingeniero Civil 2015

Para empezar, se necesita realizar una limpieza de la base donde será colocada, luego se procede a colocar la malla de acero, se humedece la base y se realiza el vaciado del concreto. Finalmente se alisa la superficie y, una vez seca, se corta las juntas.

Concreto Permeable: Esta conformado casi de la misma manera que el concreto normal, con agua, cemento y agregados finos, lo que diferencia al concreto permeable es el uso de aditivos ecológicos, que ayuda a generar un pavimento permeable y con buena resistencia a la compresión y flexión.



Figura 20 Concreto Permeable. Fuente Blog "Pavimento Permeable (Ecocreto)" 2016

El proceso constructivo del pavimento permeable es el más complicado, ya que, para comprobar que la aplicación sea la correcta, primero se debe verificar que el suelo no contenga material orgánico ni basura, luego se procede a realizar un pequeño vaciado de prueba, para luego realizar el vaciado completo. Al momento de realizar esta acción, se necesita tener en cuenta el clima al que estará expuesto, debido a que esto afecta el concreto permeable que se aplicará. El tiempo de aplicación del concreto debe ser de un máximo de 20 minutos.

Otro punto que lo hace tedioso, es que el concreto no puede ser bombeado, por eso se debe realizar la aplicación en tramos pequeños. Este pavimento no debe ser curado con agua para ese proceso es necesario colocar el plástico de curado de espesor mínimo de 0.15 mm, se debe dejar este plástico un promedio de 7 días.

Peso Volumétrico

Según el Laboratorio e información de Ingeniería civil, y utilizando como consulta la Norma AASTHO-T43 "El peso específico del cemento asfáltico como subproducto de la destilación artificial del petróleo, rara vez excede de 1.04: el del alquitrán llega a 1.30 y los asfaltos naturales de los yacimientos lacustres de 1.20 a 1.40" (Lab. De Asfalto, 2013).

El concreto usado en pavimentos, según lo que indica la Norma AASTHO 93 tiene un peso específico que oscila entre 2200 a 2400 kg/m³

Tabla 33 Peso Volumétrico de los 3 tipos de Pavimento. Fuente: Propia

PESO VOLUMÉTRICO		
ASFALTO	CONCRETO	CONCRETO PERMEABLE
1400 kg/m ³	2400 kg/m ³	1750 kg/m ³

Permeabilidad

De los tres tipos de pavimentos mencionados, el pavimento permeable es el único que permite la permeabilidad a diferencia de los otros dos pavimentos convencionales. Es por esa razón que se está empezando a utilizar este tipo de suelo en estacionamientos, caminos y carreteras de poco tránsito. “Debido a la creciente preocupación por las inundaciones en las zonas urbanas y a los requisitos para controlar la escorrentía de las aguas pluviales” (Universidad de Washington, 2018)

Puntuación final de todas las comparaciones realizadas

Tabla 34 Cuadro comparativo. Fuente Propia

Criterios Comparativos	Pavimentos			Puntuación ponderada ¹
	Flexible	Rígido	Permeable	
Mantenimiento	1	3	2	3
Costos Totales	3	2	1	3
Drenaje sostenible	1	1	3	3
Resistencia a la compresión ²	3	3	3	1
Resistencia a la flexión ²	3	3	3	1
Durabilidad	1	3	2	2
Constructibilidad	2	3	1	2
Permeabilidad	0	0	3	3
Peso Volumétrico	3	1	2	1

Reciclabilidad	3	1	2	2
Suma de puntajes normales	20	20	22	
Suma de puntajes ponderados	36	39	45	

Los puntajes en cada criterio están distribuidos desde 1 hasta 3, siendo 1 el menos favorable y 3 el más favorable para la implementación de estos pavimentos, específicamente, en el estacionamiento del aeropuerto de Jauja.

¹ para la puntuación ponderada se tomó en cuenta la importancia de cada criterio, colocándole mayor peso a los puntos de comparación más importantes, como por ejemplo la permeabilidad, durabilidad, entre otros.

² si bien sabemos que la resistencia a la compresión y flexión del pavimento rígido pueden alcanzar valores mayores que la del permeable, no se ha colocado un puntaje sobresaliente a ningún tipo pavimento, debido a que los pavimentos cumplen con la resistencia requerida por el estacionamiento.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

CONCLUSIONES:

- El problema central del drenaje en los pavimentos rígidos y flexibles, es la interrupción del ciclo hidrológico. Este gran problema medioambiental es solucionado mediante el tipo de drenaje directo que tienen los pavimentos permeables, el cual otorga una infiltración inmediata que permite la continuación del ciclo y, por lo tanto, evita los impactos negativos medioambientales.
- La cantidad de ejes equivalentes (ESAL) es de 10687.91 por eje de 8.2ton, siendo una cantidad pequeña, por lo que se empleó los mínimos espesores indicados por el "CE.010" y por el ACI 522R-16.
- El pavimento que puede llegar a alcanzar una mayor resistencia a la compresión es el pavimento rígido; sin embargo, como la carga en un

estacionamiento es pequeño, este parámetro no es tan relevante, produciendo que todos los pavimentos puedan soportar las cargas impuestas.

- Es el pavimento flexible quien necesita mayor mantenimiento a comparación de los otros pavimentos, siendo el periodo de diseño de 20 años para los 3 pavimentos en cuestión.
- Actualmente, es más sencillo reciclar el asfalto que el concreto. Por lo tanto, en términos de reciclabilidad es el pavimento flexible quien predomina en este parámetro.
- A la fecha (1/12/21) no se tiene registro alguno de la implementación de un pavimento permeable en nuestro país. Ello genera una complicación durante la construcción, ya que sería necesario una mano de obra seleccionada y una supervisión rigurosa para poder lograr una adecuada implementación.
- En el aspecto de costos, se puede concluir que, para la etapa constructiva, el pavimento permeable tiene el mayor costo, esto es debido al monto elevado de mano de obra, materiales y equipos necesarios para su ejecución, el segundo vendría a ser el pavimento rígido, ya que tiene un costo de materiales altos y, finalmente, el pavimento flexible, el cual tiene costos bajos en materiales.
- De acuerdo con nuestra hipótesis, el pavimento permeable es el más favorable para este estacionamiento, esto se pudo confirmar, finalmente, con el cuadro comparativo realizado en la tesis.

RECOMENDACIONES:

- Se recomienda el uso de los pavimentos permeables, en zonas donde se tengan altas precipitaciones para poseer un sistema de drenaje sostenible.
- Se recomienda aplicar el pavimento permeable en lugares de zonas de tránsito ligero y en zonas donde halla gran aporte de sedimentos.

- Las pendientes generadas en un pavimento permeable deben ser menor al 5% para facilitar la infiltración.
- En caso de almacenar agua es necesario un sistema seguro que permita mantener el agua en un estado no contaminado, ya que de lo contrario puede afectar el uso a la que estará dispuesta; por ejemplo, contaminar los sistemas acuáticos durante su recarga.
- El proceso constructivo de un pavimento permeable es largo y complicado. Por ello es necesario una supervisión constante.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, A. (2015). Los impactos de urbanización en el ciclo del agua pluvial. SuD Sostenible. <http://sudsostenible.com/los-impactos-de-urbanizacion-en-el-ciclo-del-agua-pluvial/>.
- ACI Committee 330. (2008). Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots.
- American Concrete Institute (2006) Hormigón permeable reportado por el comité ACI 522.
- American Concrete Pavement Association ACPA (2006) Design of Concrete Pavement for Streets and Roads.
- AASHTO (1993) Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos.
- Asociación de productores de cemento ASOCEM (2016) Boletín técnico N° 81.
- Atencio J. & Morales H. (2019) Estudio Geotécnico para diseñar la estructura del pavimento en la nueva carretera central, tramo tanta – Canchayllo KM 160-170. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho. Facultad de Ingeniería Civil. p. 58-60.
- Becerra M. (2013). COMPARACIÓN TÉCNICOECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN FLEXIBLE Y RÍGIDA A NIVEL DE COSTO DE INVERSIÓN. Universidad de Piura.
- Burgos B. (2014) Análisis Comparativo Entre un Pavimento Rígido y un Pavimento Flexible para la Ruta S/R: Santa Elvira - El Arenal, en la Comuna de Valdivia. Universidad Austral de Chile.
- Cárdenas, E. Albiter, A. & Jaimes, J. (2016) Pavimentos permeables: una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. Universidad Autónoma del Estado de México, 173. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Ciria (2016). The SuDS Manual. Version 5.

- Concreto Permeable (Ecocreto) (15 de junio de 2016). Blogger. <https://concretopermeablestalinguaita.blogspot.com/2016/06/concreto-permeableecocreto.html>
- CORPAC.S.A (s.f.) Movimiento General Aeroportuario (2019). <http://www.corpac.gob.pe/Main.asp?T=5551>.
- Corredor G. & Corros M. (2010). Maestría en Vías Terrestres Módulo III. Diseño de Pavimentos I. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Tecnología de Construcción. p. 120-130
- ¿Cuál es la diferencia entre asfalto y concreto? (23 de noviembre de 2020). Be Able. <https://agencebeable2.com/es/cual-es-la-diferencia-entre-asfalto-y-concreto/>.
- De la Cruz, Y. (2017) Pavimentos permeables como alternativa de drenaje en las principales calles de la ciudad de Ayacucho, Perú. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- De Solminihac H. & Castro J. (2002). "Pavimentos porosos de hormigón: una opción para mitigar los efectos de las aguas lluvias". Revista BIT, junio. <http://repositorio.conicyt.cl/handle/10533/197205>
- EURO CyD (2021). Construcción Prefabricada: Celdas Transitables. <https://www.eurocyd.com/suelos-y-pavimentos/30-celdas-transitables.html>
- Ferguson, B. (2005). Porous Pavement. CRC Press.
- Garay O. & Ochoa A. (2010). Primera aproximación para la identificación de los diferentes tipos de suelo agrícola en el valle del río Mantaro. Instituto Geofísico del Perú. p. 21-25.
- García E. (2011) Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos. Universidad politécnica de Valencia. p. 69-100.
- Guamán M. (2019) Propuesta de un pavimento de concreto permeable para estacionamientos en zonas urbanas, que evite el estancamiento de aguas pluviales. Universidad Técnica de Machala. Unidad Académica de Ingeniería

Civil. p. 25-36

- Grupo Pineda. (2021). Construcción césped artificial para campos de fútbol en Madrid. <https://grupopineda.eu/construccion-cesped-artificial-campo-futbol/>
- Hein D. & Schaus L. (2013) PERMEABLE PAVEMENT DESIGN AND CONSTRUCTION WHAT HAVE WE LEARNED RECENTLY? GREEN STREETS, HIGHWAYS, AND DEVELOPMENT 2013. p. 33-41
- Huang, Y. (2004) pavement analysis and design. University of Kentucky. Second edition. p. 8-18.
- INEI. (2019). Circulación de vehículos a nivel nacional aumento 4.7%. <https://www.inei.gov.pe/prensa/noticias/circulacion-de-vehiculos-a-nivel-nacional-aumento-47-11727/>.
- Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala (2014). Guía de instalación de Adoquines de Concreto. p. 8-11.
- Laboratorio de Asfalto DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECIFICO DEL PRODUCTO ASFALTICO (18 de noviembre de 2013). Blogger. <https://www.ingenieracivil.com/2013/11/laboratorio-de-asfalto-determinacion.html>
- Manual de Carreteras (2014) Sección suelos y pavimentos. p. 128 – 254.
- Ovidio C. (12 de marzo de 2019). Pavimentos Rígidos vs. Pavimentos Flexibles. Conferencia de la Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA)
- Revista Costos (2021). Suplemento Técnico de diciembre 2021.
- Senamhi (2020) Climas del Perú - Mapa de Clasificación Climática Nacional. Primera edición. p. 66-68.
- Serment V. (2012). XIX REUNIÓN NACIONAL DE INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES “MOVILIDAD, FACTOR DETONANTE PARA EL PROGRESO DE MÉXICO”. Pavimentos Rígidos y Flexibles, Ventajas y Desventajas. p. 7-10.

- TECNO GROUP (s.f.) ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE CONSTRUCCIÓN 2021. <https:// analisisdepreciosunitarios.com/>

