

# **CAPÍTULO I**

## **DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

La construcción de vías tiene gran importancia en cualquier situación geográfica, porque facilitan el traslado de los habitantes de las poblaciones y de esta manera se garantiza el desarrollo del sector, además de ofrecer un mejor acceso a las necesidades básicas.

La construcción de vías urbanas y rurales (carreteras) con pavimento rígido en Bolivia toma importancia a partir de la década de los 90, la decisión de parte del Servicio Nacional de Caminos (Administradora Boliviana de Carreteras) de licitar los proyectos de construcción de carreteras considerando dos alternativas, pavimento flexible y pavimento rígido, ha permitido que se adjudique la construcción de carreteras con pavimento rígido.

La tecnología ha evolucionado desde los primeros pavimentos de concreto simple, hasta los pavimentos de concreto pretensado, pasando por los pavimentos de refuerzo continuo, en los cuales el acero se utiliza para absorber los esfuerzos de tracción causantes de las grietas, permitiendo aumentar la separación entre juntas.

El procedimiento de diseño mediante método empírico mecanístico para pavimentos y análisis calcula las respuestas del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) y utiliza esas respuestas para calcular el incremento de daño a través del tiempo.

El procedimiento relaciona empíricamente el daño acumulado a los deterioros o fallas observadas en el pavimento.

El método empírico mecanístico representa un cambio sustancial en la forma en el que el diseño del pavimento es realizado, es un proceso iterativo, los resultados del procedimiento son los deterioros o fallas y la regularidad superficial del pavimento, no los espesores de las capas.

Primero al diseñar se considera las condiciones locales, es decir el tráfico, el clima, la subbase, la condición del pavimento existente para rehabilitación, para proponer un diseño de prueba para un nuevo pavimento o una estrategia de rehabilitación.

El software calcula los cambios en las propiedades de la capa y el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) durante la vida de diseño tomando en cuenta lo siguiente:

Examinar el resumen de los datos de entrada para asegurarse que los valores ingresados son correctos y es lo que el diseñador deseaba.

Analizar los resultados que corresponden a procesos específicos: parámetros determinados, tales como los valores climáticos, valores mensuales de eficiencia de transferencia de cargas transversales en el análisis de pavimento rígido.

Evaluar si el diseño ha cumplido con cada uno de los indicadores de desempeño para el nivel de confiabilidad de diseño elegido para el proyecto.

## 1.2 ANTECEDENTES

El Guía de diseño Mecanístico – Empírico de Pavimentos (Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide “MEPDG”), es el resultado de varios años de investigación bajo el proyecto NCHRP 1-37A de los EE.UU. En el 2002 se presentó la primera guía para su revisión por la AASTHO denominado Guía de Diseño de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados del 2002 (2002-DG), la revisión concluyó en el 2004, como producto de ellos se publicó la Guía de Diseño Mecanístico – Empírico de Pavimentos AASHTO 2004, para la cual se desarrolló la versión 1.0 del software MEPDG. Luego se publicó la Guía de Diseño Mecanístico – Empírico de Pavimentos AASHTO 2008, con la versión 1.1 del software MEPDG. En la actualidad se cuenta con la Guía de Diseño Mecanístico – Empírico de Pavimentos AASHTO 2015.

A pesar de las limitaciones países como Argentina, Chile, Costa Rica, Colombia están haciendo los esfuerzos suficientes para poder implementar esta metodología. En la Tabla 1-1 se aprecian las actividades realizadas por estos países para llevar a cabo dicho objetivo. Como se puede ver, nuestro entorno más cercano en Latinoamérica está adoptando y reuniendo experiencias sobre la presente metodología, por lo que es momento de aprender de estas experiencias y preocuparnos por la implantación de nuevas tecnologías en nuestro país, así ayuden a determinar estructuras más confiables en nuestro sistema vial.

Tabla 1- 1. Desarrollo del MEPDG en Latinoamérica.

País	Actividades para la implementación del MEPDG
Argentina	<p>Ensayos de laboratorio para la calibración del método a las condiciones del país.</p> <p>Elaboración de archivos climáticos para diferentes regiones del país.</p> <p>Calibración de modelos de deterioro MEPDG de pavimentos rígidos.</p>
Chile	<p>Calibración de los modelos de deterioro para pavimentos de hormigón.</p> <p>Desarrollo de base de datos chilena con la información requerida por el software.</p> <p>Desarrollo de base de datos de espectros para diversas vías principales.</p> <p>Medición de coeficientes de expansión térmica para hormigones de pavimentos chilenos.</p> <p>Comparación del MEPDG con el AASHTO 93.</p>
Colombia	<p>Comparaciones entre metodología de diseño de pavimentos.</p> <p>Cursos a nivel pregrado, postgrado y funcionarios de gobierno para dar a conocer el método.</p>
Costa Rica	<p>Desarrollo y calibración de ecuaciones de fatiga y deformación permanente de mezclas asfálticas en caliente.</p> <p>Cursos a nivel pregrado, postgrado y funcionarios de gobierno para dar a conocer el método.</p>
Perú	<p>Cursos a nivel pregrado, postgrado para dar a conocer el método.</p> <p>Publicación de la guía de diseño MEPDG en español.</p>

Fuente: Chang 2013

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Son muchos los beneficios al realizar un proyecto de pavimentación de concreto hidráulico, es un pavimento que posee mejores atributos tanto para los usuarios como

para quienes lo instalen, debe contener un bajo costo anual, proporcionar confianza, que sea de alta capacidad, contar con un diseño aprobado, que no obligue a gastos importantes, que no sea necesaria una mantención constante y se comporte de forma idónea.

El análisis de pavimentos con esta herramienta será mucho más confiable, pues los parámetros de diseño serán cuantificados exhaustivamente, reduciendo las incertidumbres en los resultados. Se evita los engorrosos cálculos manuales del proceso iterativo ahorrando tiempo valioso al diseñador.

Se ha elegido realizar el diseño mediante método empírico-mecanístico AASHTO 2015 aplicado en un software para aportar académicamente un nuevo tipo de diseño y actualizar el método de diseño utilizado en nuestro medio es METODO AASHTO 93 en varios países vecinos el que está siendo utilizado con resultados óptimos.

### **El aporte académico**

Dentro de la ingeniería de pavimentos en la actualidad es muy importante la necesidad de que los procedimientos metodológicos y software de aplicación estén actualizados, por ello dentro del campo de la ingeniería analizar el software AASHTO 2015 para su aplicación en nuestro país es muy importante además de analizar su aplicabilidad inmediata para el diseño.

## **1.4 PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.4.1 Situación problemática**

Actualmente se conoce en el país todo lo referente al diseño de pavimentos de acuerdo a la Guía para el diseño de estructuras AASHTO 1993, la cual sigue fundamentándose en los resultados del experimento vial AASHO. En esta versión el diseño estructural se realiza utilizando un nomograma o una ecuación obteniendo un espesor de la capa de rodadura de acuerdo a condiciones del lugar del proyecto. Esta metodología de diseño ha dado resultados muy buenos, sin embargo, nos encontramos en un período de optimización de recursos buscando dar seguridad, economía y comodidad de una manera más eficiente.

Las diversas ediciones de las guías de diseño de estructuras de pavimento AASHTO han

servido por mucho tiempo a nuestro país, pero sin embargo las distintas versiones han tenido algunas deficiencias para caracterizar o ponderar los casos siguientes:

Rehabilitación.

Efectos climáticos.

La subrasante.

La caracterización del tráfico.

La construcción y drenajes.

El período de vida de diseño.

La ejecución.

#### **1.4.2 Problema**

¿Es posible el análisis de un software nuevo para el diseño de pavimentos como el método Mecanístico – Empírico basado en la Guía de Diseño Mecanístico – Empírico de Pavimentos (MEPDG) de la AASHTO, establecer ventajas de ahorro en tiempo de diseño y la predicción del comportamiento de los pavimentos durante su vida útil de manera más confiable que los métodos tradicionales usados en nuestro país?

### **1.5 OBJETIVOS**

#### **1.5.1 Objetivo general**

Realizar el análisis del software AASHTO 2015 aplicado al diseño de pavimento rígido en el tramo de la comunidad Palos Blancos, de tal manera se pueda analizar la metodología de diseño aplicada en nuestro país.

#### **1.5.2 Objetivos específicos**

- ✓ Realizar un análisis previo de las características de la zona como lo es el tránsito, la ubicación, el clima. Esto con el fin de definir el nivel de datos de entrada corresponden para emplear en el software.
- ✓ Evaluar el proceso de diseño en pavimentos rígidos mediante el programa AASHTO 2015.

- ✓ Identificar ventajas de aplicar esta metodología para el tramo Palos Blancos.
- ✓ Establecer recomendaciones y conclusiones del análisis del software aplicado a pavimento rígido.

## **1.6 DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.6.1 Unidad de estudio**

Se realizará el diseño de un pavimento rígido por sus características y ventajas que tiene en carreteras de alto tráfico y peso, que hace posible la circulación de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía requeridos por el usuario y previstos en el proyecto.

### **1.6.2 Población**

Se realizará el diseño usando el método mecanístico – empírico mediante un Software que surgió desde el año 2002 que fue publicado por la AASHTO, donde tiene mejoramiento en el proceso de diseño y en sus resultados.

### **1.6.3 Muestra**

Para realizar el diseño estructural se usará el software de AASHTO 2015 que será aplicado en un pavimento rígido, donde se aplicará en un tramo de carretera que se dará a conocer en el muestreo.

### **1.6.4 Tamaño de muestra**

El Tramo de estudio del tramo Palos Blancos con una longitud de 900 m. se encuentra ubicada en la ciudad de Tarija.

## **1.7 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

### **1.7.1 Método inductivo**

El método inductivo es un proceso utilizado para poder sacar conclusiones generales partiendo de hechos particulares. Es el método científico más usado.

El inductivismo va de lo particular a lo general. Es un método que se basa en la observación, el estudio y la experimentación de diversos sucesos reales para poder llegar a una conclusión que involucre a todos esos casos. La acumulación de datos que reafirmen nuestra postura es lo que hace al método inductivo.

Pasos del método inductivo:

Primero, la observación y registro de los sucesos. En este primer paso vamos a tabular cada hecho en singular y a partir de ellos será que podamos avanzar.

En segundo lugar, vamos a clasificar y a estudiar todos los datos recaudados.

En tercer lugar, a partir de esos datos elaboraremos una teoría o una hipótesis con la que explicaremos ese suceso que nos dedicamos a estudiar. Siguiendo, debemos realizar una derivación inductiva a partir de los hechos que se recolectaron.

El último paso es realizar un experimento acerca de lo planteado para poder demostrar con hechos nuestra teoría.

Aplicado al tema de Diseño de Pavimento Rígido mediante el software ASHTO 2015:

Realizar un registro del tráfico y de las variaciones del clima.

Estudiar los datos recaudados los que se clasificara según el tipo de vehículos, el peso que tiene de acuerdo a los días y horas donde tenga mayor reincidencia.

Elaborar un factor en común de las clasificaciones anteriores.

Ejercer el manejo del Software con los datos recolectados.

### **1.7.2 Técnica**

Se deberá tener los datos de entrada para el software de:

Tránsito:

Se consideran circulación de camiones cargados en términos de ejes de espectro de carga. Se consideran espectros de carga para ejes simples, tandem, tridem y cuadrangulares. El enfoque de ESAL ya no es más utilizado como un dato de entrada directa en el diseño. En pocos casos, los espectros de carga serán convertidos en ESAL's internamente dentro del software como manera de hacer uso de modelos matemáticos previos que no los han convertido a una base de espectros de carga. El software usa el número de vehículos pesados como un indicador global de la magnitud de la carga del tráfico de vehículos FHWA clase 4 en adelante.

**Figura 1- 1.** Clasificación de vehículos.



Fuente: Elaboracion propia.

Nivel 1: Aproximación recomendada para altos volúmenes de vías, requieren la reunión y análisis de datos de tráfico específicos del sitio incluyendo conteos vehiculares por clase, por dirección y carril. La distribución de los espectros de carga son desarrollados para cada clase de vehículo desde los datos colectados de los pesos por eje. Los volúmenes de tráfico por clase de vehículo, son pronósticos para el período de análisis de diseño y los espectros de carga desarrollados para cada clase son usados para estimar las cargas por ejes. Podrían ser usados también los datos de entrada de la presión de contacto de las llantas o su valor por defecto, espaciamiento de las llantas y espaciamiento de ejes.

Nivel 2: Es similar al nivel 1, se requieren sitios específicos de datos de volumen y clasificación. Sin embargo, la distribución de los espectros de carga para cada clase de vehículo por estado o región podrían ser usados para estimar cargas a través del período de análisis de diseño.

Nivel 3: Proveería datos de espectros de carga por defecto para específicas clases de carreteras funcionales. El diseñador aplica estos valores por defecto para habilitar o estimar datos de volúmenes de vehículos.

Clima:

Los datos climáticos detallados son requeridos para la predicción del deterioro o fallas de pavimento MEPDG e incluyen la temperatura a cada hora, precipitación, velocidad del viento, humedad relativa y nubosidad. Estos datos se utilizan para predecir la temperatura y el contenido de humedad en cada una de las capas de pavimento, así como proporcionar algunos de los datos de entrada para el parámetro del factor local para los modelos de predicción.

Todos los datos sobre el clima requeridos por el MEPDG se encuentran disponibles de estaciones meteorológicas, el usuario debe saber también la longitud y latitud del proyecto.

Suelos de fundación y suelos subrasantes:

Se deberá tener el tipo de suelo, su contenido de humedad, densidades, profundidad de napa freática y ubicación de estratos de roca deben ser consideradas durante el proceso de diseño de pavimento.

### **1.8 ALCANCE DEL ESTUDIO DE APLICACIÓN**

En esta investigación se pretende realizar el análisis del método de diseño de estructuras de pavimentos rígidos basados en la versión AASHTO 2015 con el fin de presentar una guía de diseño, la cual utiliza principios de tecnología empírica-mecanicista que comprende procesos de selección de espesores, drenaje de la superficie, estrategias de mejoramiento de la fundación y otras características de diseño.

Este proceso de diseño podría ser usado para el desarrollo alterno de estructuras utilizando una variedad de materiales y procesos constructivos de acuerdo a la región de ejecución del proyecto. El objetivo que se deja con la nueva guía de diseño AASHTO 2015 el cual se fundamenta de los resultados del programa LTPP, es establecer una fuerte aceleración en la búsqueda de innovación en las carreteras: “Incrementar la vida del pavimento bajo la investigación de la realización a largo plazo de varios diseños de estructuras de pavimentos y la rehabilitación de estructuras de pavimento usando diferentes materiales y bajo diferentes cargas, ambientes, suelos de subrasantes y prácticas de mantenimiento”.

## **CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **2.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO**

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas. Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza y por consecuencia resultan los más económicos.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no sólo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

### **2.2 TIPOS DE PAVIMENTO**

Pavimentos asfálticos o flexibles

Pavimentos de concreto o rígidos

### **2.3 PAVIMENTO FLEXIBLE**

En general, están constituidos por una capa delgada de mezcla asfáltica construida sobre una capa de base y una capa de sub-base las que usualmente son de material granular. Estas capas descansan en una capa de suelo compactado, llamada subrasante.

**Figura 2- 1.** Corte transversal del pavimento flexible.



Fuente: Giordani,C.(2018).Libro de pavimentos.

La capa de rodadura de un pavimento flexible puede construirse con un hormigón bituminoso, mezclas de arena y betún, o mediante tratamientos superficiales con riegos bituminosos.

Está sometida a los esfuerzos máximos y condiciones más severas impuestas por el clima y el tráfico.

La capa de base se compone generalmente de áridos, que han sido tratados o no con cemento portland, cal, asfalto u otros agentes estabilizantes. Esta capa tiene como principal función, la de soportar las cargas aplicadas y distribuir estas cargas a la sub-base o al terreno.

La capa de sub-base se compone de materiales menor calidad y costo que los empleados en la capa de base. Se componen de materiales estabilizados o no, o de terreno estabilizado.

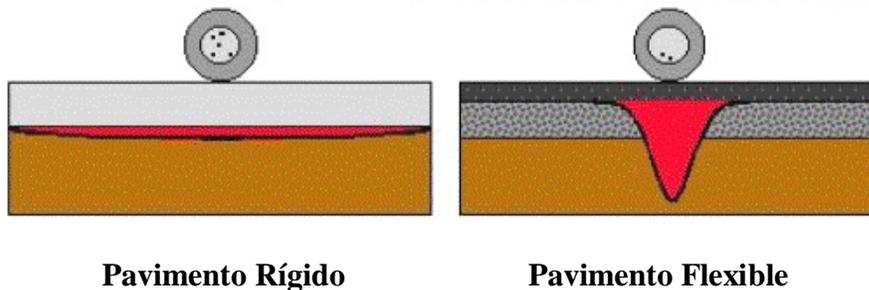
La sub-base transmite cargas al terreno y en algunos casos pueden actuar de colaborador del drenaje de las aguas del subsuelo y para prevenir la acción destructiva de las heladas.

## 2.4 PAVIMENTO RÍGIDO

Se define como pavimento de hormigón el constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales; el hormigón se pone en obra con una consistencia tal, que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación y maquinaria específica para su extensión y acabado superficial.

El pavimento rígido tiene como elemento estructural fundamental una losa de concreto, ésta se apoya sobre una capa de material seleccionado, a la que se le da el nombre de subbase; cuando la subrasante del pavimento tenga una calidad suficiente buena, la losa de concreto puede colocarse directamente sobre ella, prescindiéndose así de una subbase especial; de lo que se trata es de que la losa de concreto tenga un apoyo suficientemente uniforme y estable. Debido a que el módulo de elasticidad del concreto es mucho mayor que el correspondiente a los materiales que le sirven de apoyo, la mayor parte de la capacidad de carga del pavimento procede de la propia losa, efecto que es conocido como acción de viga. Las losas de concreto hidráulico deben resistir, además de los esfuerzos provocados por el tránsito, los producidos por cambios de temperatura y humedad, así como por cambios volumétricos de los materiales que les sirven de apoyo.

**Figura 2- 2.** Características estructurales de los pavimentos



Fuente: Giordani,C.(2018).Libro de pavimentos

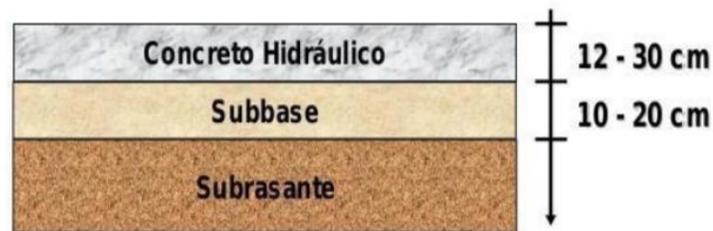
En el pavimento rígido, el hormigón absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento, mientras que en el pavimento flexible este esfuerzo es transmitido hacia las capas inferiores.

En términos generales, puede decirse que las características estructurales de las losas dependen fundamentalmente de su espesor y de la calidad del concreto empleado, interviniendo en esta última y en forma primordial la resistencia a la tensión, sin olvidar que la resistencia al desgaste superficial juega un papel muy importante. Un factor que merece atención son las juntas que dividen las losas, ya que de su apropiado diseño y construcción depende no sólo la adecuada transmisión de cargas entre las losas sino también, y de una manera fundamental, la calidad de rodamiento y su desempeño futuro.

### 2.4.1 Componentes del pavimento rígido

El pavimento rígido tiene como elemento estructural fundamental una losa de hormigón, ésta se apoya sobre una capa de material seleccionado, a la que se le da el nombre de subbase y posteriormente ésta se apoya a una capa de suelo natural llamada subrasante; en ocasiones cuando la subrasante del pavimento tenga una calidad suficiente buena, se descarta el uso de la subbase de acuerdo a criterios constructivos.

Figura 2- 3. Corte transversal del pavimento rígido



Fuente: Giordani,C.(2018).Libro de pavimentos

#### 2.4.1.1 Capa subrasante

Es el terreno de fundación del pavimento, constituye la capa superior de la terracería y por lo consiguiente la capa de apoyo de los pavimentos; la cual puede estar formada por el propio terreno natural, perfilado y compactado adecuadamente. Sin embargo, cuando el material local no tiene las características para cumplir tal función, por presentar problemas de expansión, bajo valor relativo de soporte, etc., se recurre a la utilización de materiales seleccionados de mejor calidad procedente de un banco de material. Por lo anteriormente dicho constituye el elemento de apoyo del pavimento, ya que debe resistir adecuadamente los esfuerzos que le son transmitidos, aun en condiciones severas de humedad.

#### 2.4.1.2 Capa subbase

Se define como subbase para pavimentos rígidos la capa de material que se ubica antes de la losa de concreto. Se trata de un elemento importante para garantizar la uniformidad del soporte de las losas y se construye por lo general con materiales granulares, los cuales cuando el tránsito llega a ser muy pesado e intenso, se hace necesario estabilizar este material; para evitar que bajo su acción sufran erosiones indeseables se recurre a subbases de grava-cemento. Por otra parte, cuando el tránsito es ligero el material de la capa subrasante es de buena calidad, se suprime la subbase. Debe mencionarse que

eventualmente a esta capa se la denomina base, por su posición inmediata bajo la losa. Sin embargo, se le designa como subbase debido a que en general los requerimientos de calidad de los materiales no son tan estrictos como los de una base en un pavimento flexible, teniendo en cuenta que la losa de concreto reduce los esfuerzos impuestos a esta capa por las cargas aplicadas por los vehículos.

Las principales funciones de la subbase de un pavimento rígido son las siguientes:

Prevención del bombeo de suelos finos.

Protección contra el congelamiento de la subrasante, para reducir la posible expansión diferencial.

Para proporcionar una capa drenante.

Prevención contra cambios volumétricos de la subrasante.

Incremento de la capacidad portante de los suelos de apoyo, respecto a lo que es aun en las terracerías y capa subrasante.

Sirve como superficie de tránsito durante la construcción.

#### **2.4.1.3 Losa (superficie de rodadura)**

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

Un pavimento rígido se halla constituido por un elemento estructural fundamental una losa de concreto; debido a la rigidez que presenta esta losa, esta clase de pavimentos no requieren, al menos desde un punto de vista teórico, apoyarse sobre una explanada o capa de elevada capacidad de soporte.

Normalmente el espesor de la losa puede partir de unos 12 cm. para tránsito muy ligero, hasta llegar a ser del orden de 30 cm. en el caso de autopistas y carreteras con alto nivel

de tránsito pesado, requiriendo además concretos homogéneos y de alta calidad, con resistencias a la tensión no inferiores a 3.5 MPa, y muy comúnmente de 4 Mpa. o más.

El hormigón de tipo vibrado utilizado para trabajos de pavimentación debe satisfacer ciertas características muy particulares, que marcan diferencias con respecto a los hormigones utilizados en otro tipo de obras, por lo que puede clasificarse como un hormigón de alto comportamiento. A continuación, se indican las características que son fundamentales para la correcta elaboración de la mezcla, que su finalidad es satisfacer los requerimientos indispensables para la elaboración de la losa de hormigón.

#### **2.4.2 Esfuerzos en pavimentos rígidos**

El pavimento de hormigón como consecuencia de su rigidez y elevado módulo de elasticidad, tiene considerable resistencia a la flexión denominada también de viga y alta capacidad para distribuir las cargas sobre un área de suelo relativamente amplia.

Las presiones sobre el suelo o material debajo del pavimento, son muy pequeñas por la distribución de las cargas sobre una amplia superficie. Por ello la resistencia a la flexión es el factor más importante en la determinación del espesor necesario de la losa y se deduce en consecuencia que los pavimentos de hormigón no requieren subrasantes resistentes.

Los pavimentos de concreto hidráulico están sujetos a los esfuerzos siguientes:

Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.

Esfuerzos directos de compresión y cortamiento causados por las cargas de las ruedas.

Esfuerzos de compresión y tensión, que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.

Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.

Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

Las tensiones producidas por el tráfico y por el gradiente de temperatura son de mayor importancia que las restantes.

La acción de estos esfuerzos ya sea aislada o conjunta es la que origina un estado de tensiones en la losa. Para disminuir las producidas por las variaciones de temperatura,

humedad y retracción del fraguado, el pavimento se divide en losas, por juntas debidamente dispuestas para que las tensiones producidas sean admisibles en la práctica.

Cuando no se toman en cuenta los esfuerzos de tensión generados en la base de la losa se puede generar el agrietamiento de las losas como resultado de la resistencia por fricción que se genera en la interfase losa-capa de apoyo.

Los esfuerzos en pavimentos rígidos se analizan en la losa de concreto y provienen de varios efectos.

## **2.5 DISEÑO MEDIANTE MÉTODO MECÁNICO-EMPÍRICO AASHTO 2015 PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS**

### **2.5.1 Diseño empírico**

Está basado en resultados de experimentos o experiencias. Requiere muchas observaciones para establecer conexiones entre variables de diseño y su funcionamiento.

No es necesario establecer bases científicas de conexiones observadas en los experimentos.

### **2.5.2 Diseño mecanística**

Es una aproximación puramente científica.

Confía en el comportamiento estructural mecánico al efectuar la carga de la estructura. Se deben conocer las características fundamentales de los materiales.

También se necesitan conocer exactamente las características geométricas de la estructura.

### **2.5.3 Diseño mecanístico – empírico**

Combina aspectos mecanicistas y empíricos.

Involucra componentes mecanicistas para determinar la respuesta del pavimento debido a cargas a través de modelos matemáticos.

Los componentes empíricos relacionan las respuestas del pavimento con su funcionamiento.

Cada tipo de deterioro se asocia a una respuesta crítica del pavimento.

#### **2.5.4 Importancia del MEPDG (Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide “MEPDG”)**

El método MEDDG representa un cambio sustancial en la manera como el diseño de pavimentos es realizado. El termino mecanistico se refiere a la aplicación de los principios de la ingeniera mecánica, lo que conduce a un proceso racional de diseño que tiene tres elementos básicos:

La teoría utilizada para predecir las respuestas críticas del pavimento (deformaciones, esfuerzos, deflexiones, etc.), como una función del tránsito y la carga climática (la parte mecanistica).

Procedimientos de caracterización de los materiales que le dan soporte y son consistentes con la teoría seleccionada.

Las relaciones definidas entre los parámetros críticos de las respuestas del pavimento y las fallas observadas en el campo (la parte empírica).

El MEPDG proporciona un conjunto uniforme y completo de procedimientos para el análisis y diseño de pavimentos flexibles y rígidos, nuevos y rehabilitados. El MEPDG emplea parámetros comunes de diseño para el tránsito, los materiales, la subrasante, el clima y la confiabilidad para todos los tipos de pavimento, y puede ser utilizado para desarrollar diseños alternativos empleando una variedad de materiales y procedimientos de construcción.

El resultado del MEPDG es predecir las fallas y el IRI (regularidad superficial) al nivel de confiabilidad seleccionada. Por lo tanto, no es un procedimiento directo de diseño de espesores, sino más bien una herramienta de análisis para que el diseñador lo use de manera iterativa. Específicamente el MEPDG se utiliza para evaluar un diseño de prueba (combinación de tipos de capas, espesor de la capa y características de diseño) para un determinado conjunto de condiciones locales y los criterios de fallas de un determinado nivel de confiabilidad.

#### **2.5.5 Enfoque general del diseño del MEPDG**

El enfoque del diseño provisto por el MEPDG consta de tres etapas sustanciales y múltiples pasos:

La Etapa 1: consiste en la determinación de valores de los datos de entrada para el diseño de pruebas, durante esta etapa las estrategias son identificadas para su consideración en la etapa de diseño.

Un paso fundamental de este proceso es el análisis del terreno de fundación, para pavimentos nuevos, el análisis del terreno de fundación o investigación local, consiste en la determinación del módulo resiliente y una evaluación del potencial de expansión-contracción de suelos de alta plasticidad, debilitamiento potencial por el hinchamiento debido al congelamiento y descongelamiento de los suelos vulnerables a las heladas y los problemas de drenaje.

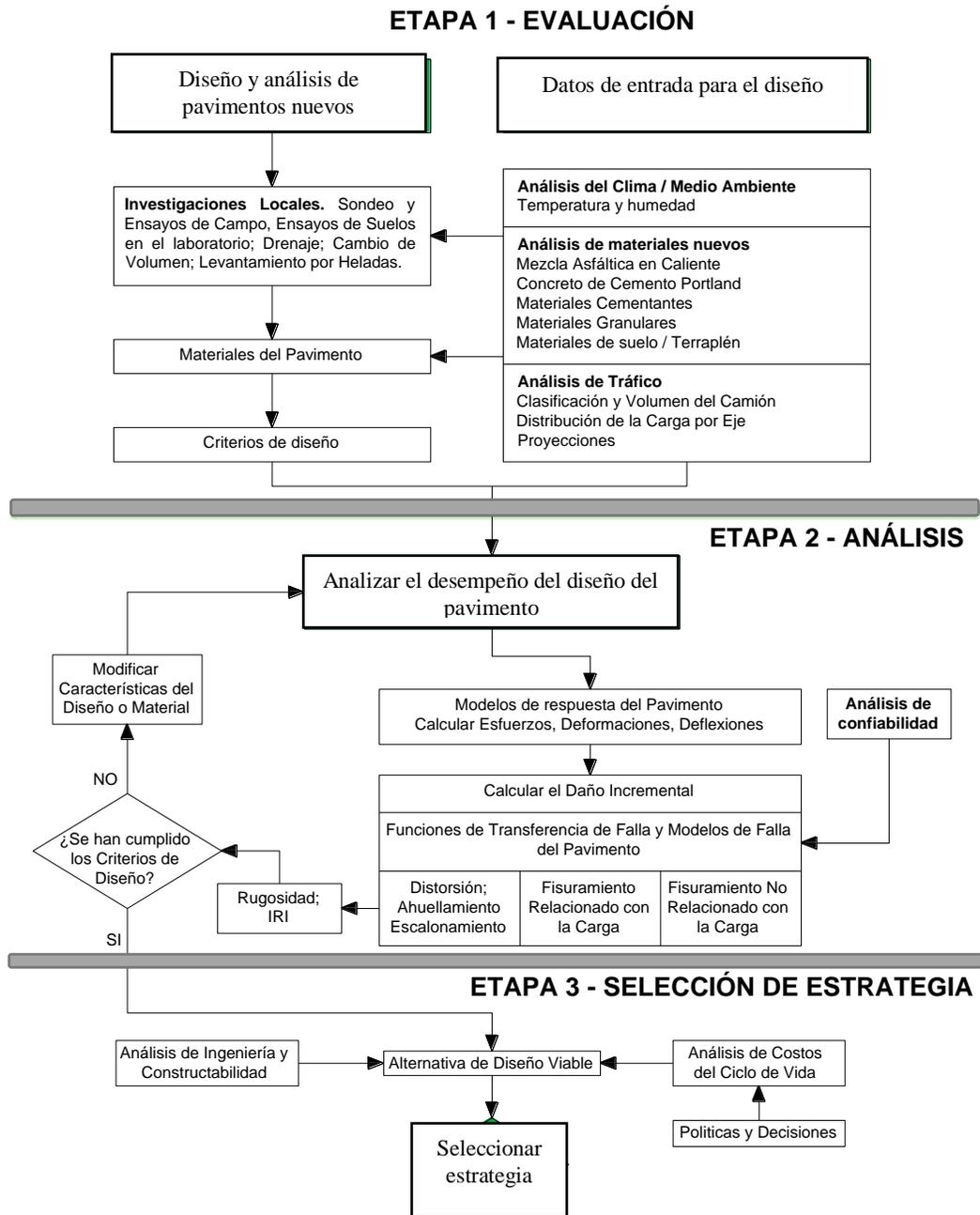
Los procedimientos de caracterización del clima, los materiales y el tránsito también están incluidos en la primera etapa de la metodología de diseño. La caracterización de los materiales es una parte importante en este procedimiento de diseño y el módulo es la propiedad fundamental de la capa, requerido para todas las capas en la estructura del pavimento, el módulo resiliente es requerido para todas las capas no ligadas del pavimento y el terreno de fundación, mientras que el módulo dinámico es requerido para todas las capas de HMA y el módulo elástico para todas las capas PCC

La caracterización del tránsito consiste en calcular las distribuciones de carga por eje aplicadas a la estructura del pavimento

La Etapa 2: del proceso de diseño es el análisis estructural y las predicciones de los indicadores de desempeño seleccionados y la regularidad superficial, el enfoque del análisis es iterativo puesto que comienza con la selección de un diseño inicial de prueba. Los diseños de prueba inicial pueden ser creados por el diseñador, obtenidos a partir de un procedimiento de diseño existente o de un catálogo general.

La Etapa 3: del proceso incluye aquellas actividades requeridas para evaluar las alternativas estructuralmente viables.

Figura 2- 4. Diagrama de flujo conceptual del proceso de análisis de diseño de pavimentos



Fuente: Adaptado de guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, manual práctico, ICG, 2015

### **2.5.6 Estrategias de diseño de pavimento rígidos**

El MEPDG se puede utilizar para analizar el desempeño esperado de los pavimentos de superficie PCC nuevos y reconstruidos, así también como los recapados de PCC y restauración de concreto RCP.

Los tipos de pavimentos de superficie PCC incluyen los siguientes:

**JPCP:** En este tipo de pavimento PCC, las juntas transversales están relativamente cerca para minimizar el fisuramiento transversal por gradiente térmico y gradiente de esfuerzos de retracción por secado.

Este pavimento no contiene acero distribuido para controlar el fisuramiento aleatorio y puede o no contener dispositivos de transferencia de carga en la junta transversal. El JPCP puede tener juntas longitudinales unidas o no unidas. Sin embargo, la mayoría de las secciones de prueba incluidas en el proceso de calibración global tenían juntas longitudinales unidas. El efecto de las juntas longitudinales unidas o no, tendría que ser definido y considerado a lo largo del proceso de calibración local. La base y la capa de subbase pueden consistir de una amplia variedad de agregados no ligados, estabilización con asfalto, estabilización con cemento, concreto de baja resistencia, concreto triturado, estabilización con cal.

**CRCP:** en este tipo de pavimento, el refuerzo longitudinal está ubicado a la mitad de la losa por encima y es diseñado para mantener las fisuras de retracción bien cerradas. Las juntas transversales sólo existen por razones constructivas y para separar al pavimento de otras estructuras. Puede o no existir el refuerzo transversal. Existen juntas longitudinales similares a otros tipos de pavimento de concreto. La base y la capa subbase pueden consistir de una variedad amplia de agregados no ligados, estabilización con asfalto, estabilización con cemento, concreto de baja resistencia, concreto triturado, estabilización con cal. Las capas de base pueden ser capas de granulometría densa o capas permeables de drenaje.

**Recapados JPCP:** Son colocados sobre pavimentos rígidos existentes, pavimentos compuestos y pavimentos flexibles. Los pavimentos compuestos consisten de HMA colocados sobre el PCC, el concreto de baja resistencia, o una base de cemento estabilizado.

Recapados CRCP: Son colocados sobre los pavimentos rígidos existentes, los pavimentos compuestos.

### 2.5.7 Indicadores de desempeño por el MEPDG

**Tabla 2- 1.** Indicadores de desempeño.

<b>Pavimentos Rígidos de PCC</b>	
<b>Pavimento de Concreto con Juntas Simples</b>	Escalonamiento promedio de la junta
	Eficiencia de transferencia de carga en la junta
	Fisuramiento transversal de la losa
	Descamado de juntas (integrado en el modelo de predicción IRI)
	Regularidad superficial (IRI)
<b>Pavimento de Concreto Reforzado</b>	Espaciamiento de la fisura y ancho de fisura
	LTE Punzonamiento
	Regularidad superficial (IRI)

Fuente: Elaboración propia

### 2.5.8 Niveles jerárquicos de datos de entrada

El nivel jerárquico en el ingreso de datos se utiliza para categorizar el nivel de conocimiento que tiene el diseñador acerca de los datos que está ingresando para el análisis. Hay tres niveles disponibles para jerarquizar los valores que se ingresan para la mayoría de los parámetros de materiales y tránsito:

Nivel de Entrada 1: El parámetro de entrada se mide directamente y corresponde a parámetros específicos del sitio o proyecto, medidos en forma directa.

Nivel de Entrada 2: Los parámetros son calculados a partir de correlaciones o ecuaciones de regresión. Este nivel puede representar los valores regionales del parámetro de entrada (clima y tráfico).

Nivel de Entrada 3: Los parámetros están basados en valores globales (materiales) o regionales por defecto (clima y tráfico).

La tabla 2-2 muestra los principales tipos de materiales considerados por la MEPDG.

**Tabla 2- 2.** Principales tipos de materiales para pavimentos

<p><b>Materiales asfálticos</b>                  Matriz Agregados Pétreos con Asfalto (SMA).                  Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA).                      Granulometría densa.                      Granulometría abierta.                      Mezclas de bases estabilizadas con asfalto.                      Mezclas de arena – asfalto.                  Mezcla asfáltica en frío.                      Procesada en planta.                      Reciclada en frío in – situ.</p>	<p><b>Base / subbase granular no tratada</b>                  Base / subbase granular.                  Subbase de arena.                  Mezcla asfáltica reciclada en frío (utilizada como agregado).                  RAP (incluye fresados).                  Pulverizados in – situ.                  Reciclaje en frío in – situ del pavimento de asfalto (HMA más base / subbase de agregado).</p>
<p><b>Materiales de PCC</b>                  Losas intactas – PPC.                      Mezclas de alta resistencia.                      Mezclas de concreto de baja resistencia.                  Losas fracturadas.                      Partir / asentar.                      Romper / asentar.                      Triturado in – situ (rubblized).</p>	<p><b>Suelos Subrasantes</b>                  Gravas (A – 1, A – 2).                  Arenas.                      Arenas sueltas (A–3).                      Arenas densas (A–3).                      Arenas limosas (A–2–6; A– 2–7)                      Arenas arcillosas (A–2–6)                  Limos (A–4; A–5).                  Suelos arcillosos, arcillas de baja plasticidad (A – 6).                      Seco – duro.                      Húmedo rígido.                      Mojado / blando.                  Suelos arcillosos, arcillas de alta plasticidad (A – 7).                      Seco – duro.                      Húmedo                      Mojado / blando.</p>
<p><b>Materiales Estabilizados Químicamente.</b>                  Agregados estabilizados con cemento.                      Suelo cemento.                      Cal – Cemento Ceniza volante.                      Cal – Ceniza volante.                      Suelos estabilizados con cal.                  Agregados de granulometría abierta estabilizados con cemento.</p>	<p><b>Cimentación de roca.</b>                  Sólido, masivo y continuo.                  Altamente fracturado y climatizado.</p>

Fuente: Adaptado de guía de diseño mecanístico – empírico de pavimentos, ICG, 2015.

### 2.5.9 Datos de entrada de los materiales jerárquicos

Las propiedades de los materiales representan los valores que tendrán justo después de la construcción del pavimento. Obviamente, las propiedades in situ para las nuevas capas de

pavimento no estarán disponibles para el diseñador porque el proyecto aún necesita ser construido.

### 2.5.9.1 Niveles de jerarquía.

Nivel 1: Valores obtenidos de ensayos exhaustivos de laboratorio.

Nivel 2: Valores calculados a través de correlaciones con otras propiedades del material, mediadas en laboratorio o en campo.

Nivel 3: Valores basados en la experiencia del diseñador, con pocas o ninguna prueba de laboratorio.

### 2.5.10 Mezclas de concreto (PCC)

Incluye concreto de baja resistencia y capas base tratadas con cemento. La tabla 2-3 muestra los datos requeridos para el nivel 1 de los materiales mostrados en la tabla 2-2.

**Tabla 2- 3.** Parámetros de entrada del material de concreto (PCC) del Nivel 1

Tipo de diseño	Propiedad Medida	Fuente de datos	
		Ensayos	Estimado
Pavimentos nuevos y reforzados de PCC y pavimentos de PCC existente sujetos a una capa adherida de PCC	Módulo elástico	ASTM C469	
	Coefficiente de Poisson	ASTM C469	
	Resistencia a la flexión	AASHTO T97	
	Resistencia a la tracción indirecta (solo CRCP)	AASHTO T198	
	Peso específico	AASHTO T121	
	Contenido de aire	AASHTO T152 o T196	
	Coefficiente de expansión térmica	AASHTO TP60	
	Temperatura de cero esfuerzo de PCC		X
	Tipo de cemento		X
Pavimentos nuevos y reforzados de PCC y pavimentos de PCC existente sujetos a una capa adherida de PCC	Contenido de cemento		X
	Relación agua – cemento		X
	Tipo de agregado		X
	Método de curado		X
	Retracción última		X
	Retracción reversible		X
	Tiempo para desarrollar 50% de la última retracción		X

Fuente: Adaptado de guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

**Tabla 2- 4.** Parámetros y valores de datos de entrada recomendados para materiales PCC Niveles 2 y 3

Propiedad medida	Niveles de entrada 2 y 3 recomendados														
Nuevo módulo elástico de PCC y resistencia a la flexión	Resistencia a la flexión de 28 días y módulo elástico de PCC de 28 días Resistencia a la compresión de 28 días y módulo elástico PCC de 28 días Resistencia SOLO a la flexión de 28 días Resistencia SOLO a la compresión de 28 días														
Coefficiente de Poisson	El coeficiente de Poisson para PCC nuevos típicamente varía entre 0.10 y 0.21, y los valores de 0.20, 0.15 y 0.18 son típicamente asumidos para el diseño de PCC.														
Peso específico	Seleccionar los datos históricos de la agencia del rango típico para peso normal de concreto: 140 a 160 lb/pie <sup>3</sup> .														
Coefficiente de expansión térmica	<p>Seleccione los valores históricos de la agencia o los valores típicos basados en el tipo de agregado grueso de PCC.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Tipo de Agregado</th> <th>Coefficiente de expansión térmica (10<sup>-6</sup>/°F)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Andesita</td> <td>5.3</td> </tr> <tr> <td>Basalto</td> <td>5.2</td> </tr> <tr> <td>Pedernal</td> <td>6.6</td> </tr> <tr> <td>Dolomita</td> <td>5.8</td> </tr> <tr> <td>Caliza</td> <td>5.4</td> </tr> <tr> <td>Esquisto</td> <td>5.6</td> </tr> </tbody> </table> <p>Donde el tipo de agregado grueso es desconocido, utilizar el valor 5.5*10<sup>-6</sup>/°F</p>	Tipo de Agregado	Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>-6</sup> /°F)	Andesita	5.3	Basalto	5.2	Pedernal	6.6	Dolomita	5.8	Caliza	5.4	Esquisto	5.6
Tipo de Agregado	Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>-6</sup> /°F)														
Andesita	5.3														
Basalto	5.2														
Pedernal	6.6														
Dolomita	5.8														
Caliza	5.4														
Esquisto	5.6														
Temperatura configurada de PCC	<p>La temperatura de cero esfuerzo, <math>T_z</math>, puede ser directamente ingresada o puede ser estimada de la temperatura ambiente mensual y del contenido de cemento utilizando la siguiente ecuación:</p> $T_z = 0.2023 \cdot H \cdot C_C + MMT$ <p>Donde:</p> <p><math>T_z</math> = Temperatura de cero esfuerzo (rango: 70 a 212 °F)  <math>C_C</math> = Contenido de cemento, lb/yd<sup>3</sup>  <math>H = -0.0787 + 0.007 \cdot MMT - 0.00003 \cdot MMT^2</math>  <math>MMT</math> = Temperatura media mensual para el mes de construcción, °F</p>														
Tipo de cemento	Estimado basado en las prácticas de las agencias														
Tipo de agregado	Estimado basado en las prácticas de las agencias														
Retracción última	Estimara usando ecuación de predicción MEPDG														
Retracción reversible	Utilizar valores por defecto del MEPDG para el 50%, a menos que una información más precisa esté disponible.														
Tiempo para desarrollar el 50% de la última retracción	Utilizar valores por defecto del MEPDG de 35 días, a menos que una información más precisa esté disponible.														

Fuente: Adaptado de guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

### 2.5.11 Materiales de subbase, base granular y subrasante

La tabla 2-5 muestra los parámetros requeridos para el nivel de entrada 1 para la base granular, la sub-base, el terraplén y los tipos de material del suelo subrasante de la tabla 1. La tabla 2-6 muestra los datos de entrada para los niveles 2 y 3 para los materiales de base granular, la sub-base, el terraplén o el suelo de subrasante.

**Tabla 2- 5.** Requerimientos para materiales nuevos de base granular, sub-base, terraplén y subrasante

Tipo de diseño	Propiedad medida	Fuente de datos		
		Ensayo	Estimado	
Nuevo (muestras de laboratorio) y existentes (materiales extraídos)	<p>Dos opciones:</p> <p>Coefficientes de regresión <math>k_1</math>, <math>k_2</math>, <math>k_3</math> para el modelo constitutivo generalizado que define el módulo resiliente como una función del estado de tensiones obtenido de los ensayos del módulo resiliente del laboratorio.</p> $M_r = k_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$ <p>Donde:</p> <p><math>M_r</math> = módulo resiliente, psi  <math>\theta</math> = sumatoria de tensiones (<math>\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3</math>)  <math>\sigma_1</math> = tensión principal mayor  <math>\sigma_2</math> = tensión principal intermedia  <math>\sigma_3</math> = tensión principal menor  <math>\tau_{oct}</math> = tensión de corte octaédrico                      =  <math display="block">\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}</math> <math>P_a</math> = tensión normal  <math>k_1, k_2, k_3</math> = constantes de regresión</p>	AASHTO T307 o NCHRP 1- 28a		
	Coefficiente de Poisson			X
	Densidad seca máxima		AASHTO T180	
	Contenido óptimo de humedad		AASHTO T180	
	Gravedad específica		AASHTO T100	
	Conductividad hidráulica saturada		AASHTO T215	
	Parámetro de la curva característica suelo agua		AASHTO T99	

Fuente: Adaptado de guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

**Tabla 2- 6.** Parámetros y valores recomendados para los niveles de datos de entrada 2 y 3 para las propiedades de material de base granular, sub-base, terraplén y subrasante

Entrada requerida	Nivel de entrada recomendada			
Módulo resiliente	Utilizar los datos de entrada del nivel 3 en materiales de base, sub-base, terraplén y subrasante, de acuerdo a la clasificación de suelos AASHTO.			
	Clasificación de Suelos AASHTO	Módulo Resiliente Recomendado en la Humedad Óptima, psi		
		Base / sub-base para Pavimentos Flexibles y Rígidos	Terraplén y subrasante para pavimentos flexibles	Terraplén y subrasante para Pavimentos Rígidos
	A-1-a	40 000	29 500	18 000
	A-1-b	38 000	26 500	18 000
	A-2-4	32 000	24 500	16 500
	A-2-5	28 000	21 500	16 000
	A-2-6	26 000	21 000	16 000
	A-2-7	24 000	20 500	16 000
	A-3	29 000	16 500	16 000
	A-4	24 000	16 500	15 000
	A-5	20 000	15 500	8 000
	A-6	17 000	14 500	14 000
	A-7-5	12 000	13 000	10 000
A-7-6	8 000	11 500	13 000	
Máxima densidad seca	Estimado usando las siguientes entradas: granulometría, índice de plasticidad y límite líquido			
Gravedad específica	Estimado usando las siguientes entradas: granulometría, índice de plasticidad y límite líquido			
Contenido óptimo de humedad	Estimado usando las siguientes entradas: granulometría, índice de plasticidad y límite líquido			
Conductividad hidráulica saturada	Estimado basado en las siguientes entradas: granulometría, índice de plasticidad y límite líquido			
Parámetro de la curva característica suelo — agua	Seleccionado basado en la clase de material de agregado / subrasante			

Fuente: Adaptado de guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

**Tabla 2- 7.** Modelos relacionados al índice de materiales y propiedades de resistencia para Mr

Propiedad Resistencia / índice	Modelo	Comentarios	Ensayo
CBR	$M_r = 2555(CBR)^{0.64}$ , psi	CBR = Relación de soporte de California, %	AAHTO T193
Valor R	$M_r = 1155 + 555R$ , psi	R = Valor R	AASHTO T190
Coefficiente de capa de AASHTO	$M_r = 3000\left(\frac{a_i}{0.14}\right)$ , psi	$a_i$ : Coeficiente de capa de AASHTO	Guía AASHTO
IP y Gradación	$CBR = \frac{75}{1 + 0.728(wPI)}$	$wPI = P_{200}PI$ $P_{200}$ : % que pasa la malla n°200 $PI$ : Índice de plasticidad, %	AASHTO T27 AASHTO T90
DCP <sup>6</sup>	$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$	DCP = Índice DCP, mm/golpe	ASTM D6951

Fuente: Adaptado de guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

### 2.5.12 Información general para el proyecto

En esta etapa inicial corresponde a la información referencial propiamente del proyecto y sirve para determinar el punto de partida en el tiempo y ubicación de los elementos analizados, estos son:

Mes y año de construcción de pavimento.

Mes y año de apertura de tráfico.

El tipo de pavimento.

#### Información climática:

Los datos climáticos detallados son requeridos para la predicción de deterioro o fallas de pavimento con el MEPDG e incluyen la temperatura a cada hora, precipitación, velocidad del viento, humedad relativa y nubosidad. Estos datos se utilizan para predecir la temperatura y el contenido de humedad en cada una de las capas del pavimento, así como para proporcionar algunos de los datos de entrada para el parámetro del factor local para los modelos de predicción de la regularidad.

Todos los datos sobre el clima requeridos por el MEPDG se encuentran disponibles de estaciones meteorológicas, situadas generalmente en los campos de aviación de los Estados Unidos. El MEPDG tiene un gran número de estaciones meteorológicas integrado en su software para facilitar su uso e implementación. El usuario simplemente tiene que saber la longitud y latitud del proyecto y el software automáticamente seleccionará las seis estaciones meteorológicas más cercanas de ese lugar. La longitud, latitud, elevación y el número de meses de datos disponibles pueden ser vistos por el usuario en la selección de las estaciones meteorológicas a ser utilizadas por el software para crear una estación meteorológica virtual en la ubicación del proyecto para las predicciones de falla.

### **Tránsito:**

El tránsito de camiones es un elemento importante, la estimación ESAL utilizada para la caracterización del tránsito en las versiones anteriores en AASHTO 93 no es necesaria para el MEPDG, en su lugar utiliza los datos del espectro de carga completo por eje para cada tipo de eje, tanto en los procedimientos de diseño para pavimentos nuevos como para las rehabilitaciones.

El tránsito vehicular es uno de los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de pavimentos. Para el análisis y diseño de pavimentos por la metodología mecanístico – empírico, se hace uso del espectro normalizado de carga por eje para cada tipo de eje (simple, tándem, tridem y quad).

Para determinar el espectro normalizado de carga, el número de aplicaciones de eje con niveles de carga dentro de un rango específico de cargas por un tipo de eje se divide entre el número total de ejes registrados para ese tipo de eje. La suma acumulada de todos los valores incrementales en la distribución de un tipo de eje específico debe de ser igual a 100%.

Los valores por defecto se determinaron a partir de un análisis de cerca de 200 estaciones de pesaje WIN incluidas en el programa LTPP<sup>1</sup>, simplificando notablemente el uso del MEPDG relacionado con el tránsito de camiones. Estos valores por defecto están incluidos

---

<sup>1</sup> LTPP: Sistema Nacional de Gestión de Información, base de datos que incluye información tráfico, medio ambiente, etc.

en el software MEPDG y fueron determinados a partir de datos recogidos en las estaciones WIM en su mayor parte en carreteras interestatales y arterias primarias.

**Datos de entrada específicos de la carretera:**

**Tránsito promedio diario anual inicial de camiones en vías de dos sentidos (AADTT):**

Representa el promedio ponderado del tránsito de camiones (el número total de vehículos pesados; es decir, clases de 4 a 13, en el flujo de tráfico) entre los días laborables y los fines de semana, que pasan por un punto de control durante un periodo de 24 horas. Este valor representa ambas direcciones y a todos los carriles.

**Número de carriles en la dirección de diseño:** El número de carriles en la dirección de diseño se determina a partir de las especificaciones de diseño y representa el número total de carriles en una dirección.

**Porcentaje de camiones en el carril de diseño (LDF):** El porcentaje de camiones en el carril de diseño comúnmente es determinado mediante el cálculo del porcentaje del tránsito de camiones en el carril de diseño relacionado a todo el tránsito de camiones en una dirección.

**Porcentaje de camiones en la dirección del diseño (DDF):** Representa el porcentaje de camiones en la dirección del diseño en relación a todos los camiones que utilizan la carretera en ambas direcciones.

**Velocidad de operación:** La velocidad de los camiones tiene un efecto definitivo en el módulo dinámico pronosticado del HMA.

**Tabla 2- 8.** Velocidades de Operación recomendadas

Tipo de vía	V (mph)
Interestatal	60
Primarias	45
Urbanas	15
Intersecciones	0.5

Fuente: guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2004

**Crecimiento del tránsito de camiones:** Se puede determinar una tasa de crecimiento global o particular para cada clase de camiones, además se debe determinar la función de crecimiento del tráfico (sin crecimiento, crecimiento lineal o crecimiento exponencial).

**Datos de entrada extraídos de las estaciones de pesaje WIM:**

**Factores de distribuciones de carga por eje:** Representa el porcentaje del total de solicitudes de eje dentro de cada intervalo de carga para un tipo de eje específico (Simple, tándem, tridem y quads) y clase de camión. Los intervalos de carga para cada tipo de eje son:

Eje simple: 3000 lb – 40000 lb a intervalos de 1000 lb.

Eje tándem: 6000 lb – 80000 lb a intervalos de 2000 lb.

Eje tridem y quad: 12000 lb – 102000 lb a intervalos de 3000 lb.

**Distribución normalizada del volumen de camiones:** Representa el porcentaje de cada clase de camión dentro de la distribución del tránsito de camiones.

**Tabla 2- 9.** Clasificación de tráfico de camiones (TTC) y el vehículo correspondiente (camiones) y valores por defecto en el software MEPDG.

TTC GRUPO	TTC Descripción	Vehículo / Distribución de clase de camión (porcentaje)									
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Ruta principal con Camión con remolque simple (Tipo I)	1.3	8.5	2.8	0.3	7.6	74	1.2	3.4	1.0	0.3
2	Ruta principal con remolque simple (Tipo II)	2.4	14.1	4.5	0.7	7.9	66.3	1.4	2.2	0.3	0.2
3	Ruta principal Camión con remolque simple (Tipo I)	0.9	11.6	3.6	0.2	6.7	62	4.8	2.6	1.0	6.2
4	Ruta principal Camión con remolque simple (Tipo III)	2.4	22.7	5.7	1.4	8.1	55.5	1.7	2.2	0.2	0.4
5	Ruta principal Camión con remolque simple o múltiple (Tipo II)	0.9	14.2	3.5	0.6	6.9	54.0	5.0	2.7	1.0	11.0
6	Ruta intermedia Camiones livianos con remolque simple (Tipo I)	2.8	31.0	7.3	0.8	9.3	44.8	2.3	1.0	0.4	0.3
7	Ruta principal Camiones mezclados (Tipo I)	1.0	23.8	4.2	0.5	10.2	42.2	5.8	2.6	1.0	8.4
8	Ruta principal Camiones con remolque múltiple (Tipo I)	1.7	19.3	4.6	0.9	6.7	44.8	6.0	2.6	2	11.8

**Tabla 2- 10.** Clasificación de tráfico de camiones (TTC) y el vehículo correspondiente (camiones) y valores por defecto en el software MEPDG-continuación.

TTC GRUPO	TTC Descripción	Vehículo / Distribución de clase de camión (porcentaje)									
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
9	Ruta intermedia Camiones livianos con remolque simple (Tipo II)	3.3	340	12.0	1.6	9.9	36.2	1.0	1.8	0.2	0.3
10	Ruta principal Camiones mezclados (Tipo II)	0.8	30.8	6.9	0.1	7.8	37.5	3.7	1.2	5.0	6.7
11	Ruta principal Camión con remolque simple (Tipo I)	1.8	24.6	7.6	0.5	5.0	31.3	9.8	0.8	3.3	15.3
12	Camión con remolque simple (Tipo II)	3.9	40.8	11.7	1.5	12.2	25.0	2.7	0.6	0.3	1.3
13	Ruta principal Camión con remolque simple (Tipo I)	0.8	33.6	6.2	0.1	7.9	26.0	10.5	1.4	3.2	10.3
14	Ruta principal Camión con remolque simple (Tipo III)	2.9	56.9	10.4	3.7	9.2	15.3	0.6	0.3	0.4	0.3
15	Ruta principal Camión con remolque simple o múltiple (Tipo II)	1.8	56.5	8.5	1.8	6.2	14.1	5.4	0.0	0.0	5.7
16	Ruta principal Camiones livianos con remolque simple (Tipo I)	1.3	48.4	10.8	1.9	6.7	13.4	4.3	0.5	0.1	12.6
17	Ruta principal Camiones mezclados (Tipo I)	36.2	14.6	13.4	0.5	14.6	17.8	0.5	0.8	0.1	1.5

Fuente: AASHTO 2008

**Tabla 2- 11.** Definiciones y descripciones para los grupos de TTC.

Autobuses en la clasificación del tráfico	Artículos que se transportan por el tipo de camión		TTC Group No.
	Multi - Remolque	Solo-remolque y solo-unidad	
No nunca o ninguno (<2%)	Cantidad relativamente alta de los camiones del multi-remolque (>10%)	Predominantemente camiones de un solo-remolque.	5
		Porcentaje alto de camiones de un solo-remolque, pero algún solo-unidad transporta en camión.	8
		Tráfico de camiones mezclado con un porcentaje más alto de camiones de un solo-remolque.	11

		Tráfico de camiones mezclado con sobre e igual los porcentajes de solo-unidad y solo-remolque.	13	
		Predominantemente los camiones de solo-unidad.	16	
	Cantidad moderada de los camiones del multi-remolque (2-10%)	Predominantemente los camiones de un solo-remolque.	3	
		Tráfico de camiones mezclado con un porcentaje más alto de camiones de un solo-remolque.	7	
		Tráfico de camiones mezclado con sobre e igual los porcentajes de solo-unidad y solo-remolque.	10	
		Predominantemente los camiones de solo-unidad.	15	
	Poco para moderar (>2%)	Poco o ninguno (<2%)	Predominantemente los camiones de un solo-remolque.	1
			Predominantemente solo-remolque transporta en camión, pero con un porcentaje bajo de camiones de solo-unidad.	2
Predominantemente solo-remolque transporta en camión con un poco para moderar cantidad de solo-unidad.			4	
Tráfico de camiones mezclado con un porcentaje más alto de camiones del solo-remolque.			6	
Tráfico de camiones mezclado con sobre e igual los porcentajes de solo-unidad y solo-remolque.			9	
Tráfico de camiones mezclado con un porcentaje más alto de camiones de solo-unidad.			12	
Predominantemente camiones de solo-unidad.			14	
Autobús mayor (>25%)	No nunca o ninguno (<2%)	Tráfico de camiones mezclado con sobre e igual solo - unidad y camiones de solo-remolque.	17	

Fuente: Adaptado de guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

**Separación de los ejes:** Separación entre ejes y entre el eje direccional y el primer eje del remolque.

Separación en eje tándem: 51.6 in

Separación en eje tridem: 49.2 in

Separación en eje quad: 49.2 in

**Factores de ajuste mensual (MAF):** Se utilizan para distribuir el tránsito de camiones de cada clase durante todo el año por cambios estacionales, los factores de distribución mensual de 1 fueron usados para todas las clases de camiones durante todos los esfuerzos de calibración.

La razón por la que se usan los valores de 1 se debe a la mayoría de los sitios de calibración se encuentran a lo largo del sistema interestatal o a lo largo de las arterias principales, la suma de todos los meses por cada clase debe de ser 12.

**Factores de distribución por horarios:** Los factores de distribución por horarios se utilizan para distribuir el tránsito total de camiones durante un día típico, los valores promedio por defecto fueron determinados a partir de un análisis de los datos el programa LTPP de estaciones de pesaje WIM, los factores de distribución horarios sólo son requeridos para pavimentos rígidos.

**Datos del tránsito de camiones no incluidos en los datos de estaciones de pesaje:**

**Separación entre neumáticos duales:** El MEPDG asume que todos los ejes del camión estándar incluidos en los datos de estaciones de pesaje WIM contienen neumáticos duales. La separación de los neumáticos duales debe representar a la mayoría de los camiones que utilizan la carretera y deben ser tomados de los estándares de la industria de camiones. El valor por defecto de 12 in fue seleccionado basado en la separación de los neumáticos utilizados por la mayoría de los camiones.

**Presión del neumático:** El MEPDG asume una presión de neumáticos para todas las condiciones de carga que representen la condición de funcionamiento, un valor medio de 120 psi. Se utilizó en todos los esfuerzos de calibración.

**Zigzag lateral de las cargas por eje:** El MEPDG asume un constante zigzag lateral para todos los camiones, un valor de 10 in fue utilizados para todos los esfuerzos de calibración, independiente de la anchura del carril.

**Criterios de nivel de confiabilidad:**

Los criterios de desempeño y de confiabilidad del diseño afectan en gran medida los resultados obtenidos por la metodología Mecánico – Empírico, en todo momento se

debe mantener un adecuado equilibrio entre los criterios umbral de diseño y sus correspondientes niveles de confiabilidad umbral, primando el buen juicio y la experiencia ingenieril.

**Tabla 2- 12.** Niveles de confiabilidad recomendados por MEPDG

Clasificación Funcional	Nivel de confiabilidad	
	Urbano	Rural
Interestatal/ Autopista	95	95
Arterias principales	90	85
Colectores	80	75
Local	75	70

**Fuente:** Adaptado de guía de diseño mecanístico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

## 2.6 PREDICCIÓN DE DETERIORO EN PAVIMENTOS RÍGIDOS DE PCC

### 2.6.1 Fisuramiento transversal de losas (abajo hacia arriba y arriba hacia abajo)

Cualquier losa puede fisurarse ya sea de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo, pero no de ambos modos. El porcentaje de losas con fisuras transversales (incluyendo todos los niveles de severidad) en un carril determinado se utiliza como medida del fisuramiento transversal y se predice utilizando la siguiente ecuación global, tanto para las fisuras de abajo hacia arriba como para las de arriba hacia abajo, (MEPDG 2015):

$$CRK = \frac{100}{1 + C_4 (DI_F)^{C_5}}$$

Donde:

CRK = Cantidad pronosticada de fisuramiento de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo (fracción).

$DI_F$  = Daño por fatiga

$C_{4,5}$  = Coeficientes de calibración;  $C_4 = 1.0$ ,  $C_5 = -1.98$

La expresión general para las acumulaciones de daño por fatiga, considerando todos los factores críticos para el fisuramiento transversal del JPCP, se conoce como hipótesis de Miner y se describe a continuación:

$$DI_F = \sum \frac{n_{i,j,k,l,m,n,o}}{N_{i,j,k,l,m,n,o}}$$

Donde:

$DI_F$  = Daño total por fatiga (arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba)

$n_{i,j,k}$  = Número de repeticiones de aplicaciones de carga en la condición  $i, j, k, l, m, n, o$

$N_{i,j,k,\dots}$  = Número permitido de aplicaciones de carga en las condiciones  $i, j, k, l, m, n, o$

$i$  = Edad (considerado para el cambio en el módulo de PCC de rotura y elasticidad, fricción entre losa y base, deterioro de la LTE de la berma)

$j$  = Mes (considerado para los cambios en el módulo elástico base y en el módulo dinámico efectivo de la reacción de la subrasante)

$k$  = Tipo de eje (single, tándem, y tridem para fisuramiento de abajo hacia arriba; distancia entre ejes corta, mediana y larga para el fisuramiento de arriba hacia abajo)

$l$  = Nivel de carga (carga incremental para cada tipo de eje)

$m$  = Diferencia de temperatura equivalente entre las superficies de PCC superior e inferior.

$n$  = Distancia de la carga al borde de la losa

$o$  = Fracción horaria de tránsito de camiones

El número de repeticiones de aplicaciones de carga ( $n_{j,k,l,m,n}$ ) es el número real de tipos de eje  $k$  de nivel de carga  $l$  que pasan a través de la trayectoria del tránsito  $n$  bajo cada condición (edad, estación y diferencia de temperatura). Cada paso de un eje se convierte en un número equivalente de ejes simples, tándem y tridem así:

Un eje simple, es equivalente a una aplicación de un solo eje de la misma carga.

Un eje tándem, es equivalente a dos aplicaciones de un eje tándem de la misma carga.

Un eje tridem, es equivalente a un eje tridem de la misma carga y dos ejes tándem con dos tercios de la carga total.

Un eje quad, es equivalente a dos ejes tridem con las tres cuartas partes de la carga total y dos ejes tándem con la mitad de la carga total.

El número permitido de aplicaciones de carga es el número de ciclos de carga requeridos para generar deterioro por fatiga, el cual corresponde al 50 por ciento de las losas agrietadas y es una función del esfuerzo aplicado y de la resistencia del PCC. El número permitido de aplicaciones de carga se determina utilizando la siguiente ecuación de fatiga de PCC:

$$\log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \cdot \left( \frac{M_{R_i}}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{C_2}$$

Donde:

$N_{i,j,k,\dots}$  = Número permitido de aplicaciones de carga en la condición  $i, j, k, l, m, n$ .

$M_{R_i}$  = Módulo de rotura del concreto en la edad  $i$ , en psi.

$\sigma_{i,j,k,\dots}$  = Esfuerzo aplicado en la condición  $i, j, k, l, m, n$ .

$C_1$  = Constante de calibración, 2.0.

$C_2$  = Constante de calibración, 1.22.

El daño por fatiga se calcula sumando cada incremento de daño. Una vez que los daños de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba son calculados, los fisuramientos correspondientes se determinan utilizando la ecuación y el fisuramiento total combinado se determina utilizando la ecuación.

$$TCRACK = (CRK_{Bottom-up} + CRK_{Top-down} - CRK_{Bottom-up} \cdot CRK_{Top-down}) \cdot 100\%$$

Donde:

$TCRACK$  = Fisuramiento transversal total (porcentaje, todas las severidades)

$CRK_{Bottom-up}$  = Cantidad pronosticada de fisuramiento transversal de abajo hacia arriba (fracción).

$CRK_{Top-down}$  = Cantidad pronosticada de fisuramiento transversal de arriba hacia abajo.

El error estándar de la predicción se estima con las ecuaciones siguientes:

$$S_{e(CR)} = (5.3116 \cdot CRACK)^{0.3903} + 2.99$$

CRACK, es el fisuramiento transversal pronosticado basado en los valores medios, % de losa.

## 2.6.2 Escalonamiento promedio de juntas transversales

El escalonamiento promedio en juntas transversales se determina mes a mes utilizando incrementos. Se determina un incremento del escalonamiento cada mes y el nivel presente de escalonamiento afecta la magnitud del incremento. El escalonamiento de cada mes se determina sumando los incrementos del escalonamiento de todos los meses anteriores en la vida del pavimento, desde la fecha de apertura al tráfico, usando las siguientes ecuaciones, (MEPDG, 2015):

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} \cdot (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 \cdot DE_i$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 \cdot \sum_{j=1}^m DE_j \cdot \log(1 + C_5 \cdot 5.0^{EROD})^{C_6}$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} \cdot \delta_{curling} \cdot \left[ \log(1 + C_5 \cdot 5.0^{EROD}) \cdot \log\left(\frac{P_{200} \cdot WetDays}{P_s}\right) \right]^{C_6}$$

Donde:

$Fault_m$  = Escalonamiento en junta promedio al final del mes  $m$ , en in.

$\Delta Fault_i$  = Cambio incremental (mensual) en el escalonamiento en junta transversal promedio durante el mes  $i$ , en in.

$FAULTMAX_i$  = Escalonamiento máximo en junta transversal promedio para el mes  $i$ , en in.

$FAULTMAX_0$  = Escalonamiento máximo inicial en junta transversal promedio, en in.

$EROD$  = Factor de erosionabilidad de la base/subbase.

$DE_i$  = Diferencia de densidad de energía de deformación de la subrasante acumulada durante el mes  $i$  (ver ecuación 2.119a).

$\delta_{curlin}$  = Deflexión máxima promedio mensual hacia arriba de la esquina de la losa de PCC debido al alabeo por temperatura y humedad.

$P_s$  = sobrecarga en la subrasante, en lb.

$P_{200}$  = Porcentaje del material de subrasante que pasa el tamiz #200.

WetDays = Número promedio de días húmedos al año (más de 0.1 in de lluvia).

$C_{1,2,3,4,5,6,7,12,34}$  = Constantes de calibración global ( $C_1 = 1.0184$ ,  $C_2 = 0.91656$ ,  $C_3 = 0.0021848$ ,  $C_4 = 0.0008837$ ,  $C_5 = 250$ ,  $C_6 = 0.4$ ,  $C_7 = 1.83312$ ,  $C_{12}$  y  $C_{34}$

$$C_{12} = C_1 + C_2 \cdot FR^{0.25}$$

$$C_{34} = C_3 + C_4 \cdot FR^{0.25}$$

FR = Índice base de congelamiento definido como porcentaje del tiempo en que la temperatura superior de la base está por debajo de la temperatura de congelamiento (32°F).

Para el análisis del escalonamiento, cada pasada de un eje puede producir una carga crítica sólo una vez (es decir, cuando *DE* tiene el valor máximo). Como el escalonamiento máximo ocurre en la noche, cuando la losa se curva hacia arriba, las juntas se abren y la eficiencia de transferencia de carga son más bajas, sólo las repeticiones de carga por eje aplicadas entre las 8:00 p.m. y las 8:00 a.m. son consideradas en el análisis del escalonamiento.

Para el análisis del escalonamiento, la diferencia de temperatura lineal durante la noche se determina para cada mes calendario como la diferencia promedio entre las caras del PCC superior e inferior entre las 8:00 p.m. y las 8:00 a.m. Por cada mes del año, el gradiente de temperatura equivalente mensual se determina entonces de la siguiente manera, (MEPDG, 2015)

$$\Delta T_m = \Delta T_{t,m} - \Delta T_{b,m} + \Delta T_{sh,m} + \Delta T_{PCW}$$

Donde:

$\Delta T_m$  = Diferencial de temperatura para el mes *m*.

$\Delta T_{t,m}$  = Temperatura media en la cara superior del PCC durante la noche, para el mes *m*.

$\Delta T_{b,m}$  = Temperatura media en la cara inferior del PCC durante la noche, para el mes  $m$ .

$\Delta T_{sh,m}$  = Diferencial de temperatura equivalente debido a la retracción reversible para el mes  $m$ , para un concreto viejo (es decir, la retracción está completamente desarrollada)

$\Delta T_{PCW}$  = Diferencial de temperatura equivalente debido al alabeo/curvatura permanente.

Diferencial de temperatura debido a alabeo permanente; incluye un gradiente de temperatura remanente de la construcción, más el gradiente efectivo por alabeo asociado a la diferencia de humedad, más los efectos por fluencia lenta a largo plazo de la losa y el asentamiento en la base. Un valor aproximado de  $-10^{\circ}\text{F}$  se podría tomar a menos que se tenga valores de calibración local.

Diferencial de temperatura debido a la retracción reversible; La variación estacional en la humedad relativa genera un importante alabeo en la losa de PCC. Esto puede describirse a través de un gradiente de temperatura equivalente que genera el mismo alabeo. El efecto de la humedad relativa en la atmósfera se transforma a un gradiente de temperatura equivalente con la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{sh,m} = \frac{3 \cdot (\varphi \cdot \varepsilon_{su}) (Sh_m - Sh_{ave}) \cdot h_s \cdot \left( \frac{h}{2} - \frac{h_s}{3} \right)}{\alpha \cdot h^2 \cdot 100}$$

Donde:

$\Delta T_{sh,m}$  = Diferencial de temperatura equivalente debido a la retracción reversible para el mes  $m$ ,  $^{\circ}\text{F}$

$\varphi$  = Factor de retracción reversible del PCC, 0.5 aprox.

$\varepsilon_{su}$  = Retracción última del PCC.

$Sh_m$  = Factor de humedad relativa durante el mes  $m$ .

$$Sh_m = \begin{cases} 1.1RH_a \rightarrow RH_a \leq 30\% \\ 1.4 - 0.01RH_a \rightarrow 30\% < RH_a < 80\% \\ 3.0 - 0.03RH_a \rightarrow \geq 80\% \end{cases}$$

$RH_a$  = Humedad relativa promedio del ambiente, %.

$Sh_{ave}$  = Factor de humedad relativa promedio anual, media anual de  $Sh_m$ .

$h_s$  = Profundidad de la zona de contracción (típicamente 2 in).

$h$  = Espesor de la losa de PCC, in.

$\alpha$  = Coeficiente de contracción térmica de la losa de PCC, /°F.

El diferencial de temperatura calculado en la ecuación se basa en la retracción última, la cual toma tiempo en desarrollarse, por lo que para determinar el diferencial de temperatura equivalente para cualquier tiempo  $t$  después de colocado el PCC, se utiliza la siguiente relación:

$$\Delta T_{sh,t} = S_t \cdot \Delta T_{sh,m}$$

$$S_t = \frac{Age}{n + Age}$$

Donde:

$\Delta T_{sh,t}$  =  $\Delta T_{sh}$  en cualquier tiempo  $t$  (días) después de colocado el PCC, °F.

$S_t$  = Factor de tiempo para la deformación de la losa relacionado con la humedad.

$Age$  = Edad del PCC después de la colocación, días.

$n$  = Tiempo para desarrollar el 50% de retracción última, días.

Las magnitudes de las deflexiones de las esquinas, tanto de las losas cargadas como no cargadas, son significativamente afectadas por la LTE en la junta. Para evaluar la LTE en la junta transversal inicial, se determinan las LTE de la trabazón de agregados, de las barras de transferencia (si existen), y de la base/subrasante. Después de determinar las contribuciones de la trabazón de agregados, de las barras de transferencia y de la base/subrasante, el total inicial de la LTE en la junta se obtiene de la siguiente manera, (MEPDG, 2015)

$$LTE_{joint} = 100 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{LTE_{dowel}}{100} \right) \left( 1 - \frac{LTE_{agg}}{100} \right) \left( 1 - \frac{LTE_{base}}{100} \right) \right]$$

Donde:

$LTE_{joint}$  = Eficiencia de transferencia de carga en la junta transversal total, en %.

$LTE_{dowel}$  = Eficiencia de transferencia de carga en la junta si las barras de transferencia son el único mecanismo de transferencia de carga, en %.

$LTE_{base}$  = Eficiencia de transferencia de carga en la junta si la base es el único mecanismo de transferencia de carga, en %.

$LTE_{agg}$  = Eficiencia de transferencia de carga en la junta si la trabazón de agregados es el único mecanismo de transferencia de carga, en %.

Determinación de  $LTE_{agg}$ : Depende de la abertura de junta, la cual se determina para cada incremento (meses) usando la siguiente expresión:

$$jw = \text{Max}(12000 \cdot L \cdot \beta \cdot (\alpha_{PCC} \cdot (T_{constr} - T_{mean}) + \varepsilon_{sh,m}), 0)$$

Donde:

$jw$  = Abertura de junta, en milésima de pulgada (0.001 in).

$L$  = Separación de la junta, ft.

$\beta$  = Coeficiente de fricción entre la base y la losa de PCC.

$\alpha_{PCC}$  = coeficiente de expansión térmica de PCC, /°F.

$T_{mean}$  = Temperatura promedio mensual en la profundidad media de la losa durante la noche, °F.

$T_{constr}$  = Temperatura del hormigón al momento de colocación, °F.

$\varepsilon_{sh,m}$  = Deformación de retracción del PCC para el mes  $m$ .

La deformación de retracción del PCC depende de las propiedades del material, la humedad relativa y la edad del PCC,  $\varepsilon_{sh,m}$  puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{sh,m} = \varepsilon_{sh,b} + (\varepsilon_{sh,t} - \varepsilon_{sh,b}) \cdot \frac{h_d}{h_{PCC}}$$

Donde:

$\varepsilon_{sh,t}$  = Deformación de retracción sobre la losa de PCC en el mes  $m$ .

- $\varepsilon_{sh,b}$  = Deformación de retracción bajo la losa de PCC en el mes m.  
 $h_d$  = Profundidad de la porción más seca de la losa de PCC, 2 in.  
 $h_{PCC}$  = Espesor de la losa de PCC, in.

La deformación de retracción en la parte superior e inferior de la losa de PCC, se estima con las ecuaciones respectivamente.

$$\varepsilon_{sh,t} = \varepsilon_{su} S_t (S_{h_{max}} - \phi S_{hi})$$

$$\varepsilon_{sh,b} = \varepsilon_{su} S_t S_{hbot}$$

Donde:

- $\varepsilon_{su}$  = Deformación última de retracción.  
 $S_t$  = Factor de tiempo para la relación de la humedad con el alabeo de la losa  
 $S_{hmax}$  = Factor de humedad relativa promedio máximo, máximo  $S_{hi}$ .  
 $\phi$  = Factor de deformación por retracción, 0.5  
 $S_{hi}$  = Factor de humedad relativa del mes i, ecuación  
 $S_{hbot}$  = Factor de humedad relativa bajo la losa de PCC, se asume igual a 90%.

La capacidad inicial de corte de la junta (en el primer incremento) es una función de la apertura de junta y del espesor de losa.

$$s_0 = 0.05 h_{PCC} \cdot e^{-0.032 jw}$$

Donde:

- $s_0$  = Capacidad inicial de corte del agregado de la junta, adimensional.  
 $jw$  = Abertura de la junta, 0.001 in.  
 $h_{PCC}$  = Espesor de la losa de PCC, in.

La rigidez de la junta por agregado se determina como una función de la capacidad de corte,  $S$ .

$$\log(J_{AGG}) = -28.4 \cdot e^{-a \left( \frac{S-e}{b} \right)}$$

Donde:

$J_{AGG}$  = Rigidez de la junta producto del agregado de la losa, adimensional.

a = 0.35.

b = 0.38.

S = Capacidad de corte de la junta,  $s_0$  en el primer incremento de tiempo.

La eficiencia de transferencia de carga del agregado se estima con la siguiente ecuación:

$$LTE_{AGG} = \frac{100}{1 + 0.012J_{AGG}^{-0.849}}$$

Determinación de  $LTE_{dowel}$ : (Si los pasadores están presentes). La rigidez no dimensional de la junta debido a la presencia de pasajuntas se determina como sigue:

$$J_d = J_d^* + (J_0 - J_d^*) \exp(-DAM_{dpwels})$$

Donde:

$J_d$  = Rigidez de la pasajunta, adimensional.

$J_0$  = Rigidez inicial de la pasajunta.

$$J_0 = 120 \frac{d^2}{h_{PCC}}$$

$J_d^*$  = Rigidez crítica de la pasajunta.

$$J_d^* = \text{Min} \left( 118, \text{Máx} \left( 165 \frac{d^2}{h_{PCC}} - 19.812, 0.4 \right) \right)$$

d = Diámetro de la pasajunta, in (d > 0.75 in).

$DAM_{dowels}$  = Daño acumulado de la pasajunta que depende del esfuerzo en la pasajunta y de las cargas repetidas, inicialmente es igual a 0.

La eficiencia de transferencia de carga del pasajunta se estima con la siguiente ecuación:

$$LTE_{dowel} = \frac{100}{1 + 0.012J_d^{-0.849}}$$

Determinación de  $LTE_{base}$ : Se puede determinar a partir de la tabla 2-30, si la temperatura media de la losa de PCC para un mes dado es menor a 32°F la  $LTE_{base}$  es igual a 90%.

**Tabla 2- 13.** Eficiencia de transferencia de carga (LTE) efectiva referencial asumida para diferentes tipos de base

Tipo de base	LTE <sub>base</sub>
Base de agregado	20%
ATB o CTB	30%
Base de Concreto de Baja Resistencia	40%

Fuente: Guía de diseño mecánico – empírico de pavimentos, ICG, 2015

La energía diferencial ( $DE$ ), el esfuerzo cortante en la esquina de la losa ( $\tau$ ) y el esfuerzo de apoyo en la barra de transferencia ( $\sigma_b$ ), son calculados con las fórmulas

$$DE = \frac{k}{2}(\delta_{loaded}^2 - \delta_{unloaded}^2)$$

$$\tau = \frac{AGG(\delta_{loaded} - \delta_{unloaded})}{h_{PCC}}$$

$$\sigma_b = \frac{\zeta_d(\delta_{loaded} - \delta_{unloaded})}{d \cdot dsp}$$

Donde:

$DE$  = Energía diferencial, en lb/in

$\delta_{loaded}$  = Deflexión de la esquina cargada, en in.

$\delta_{unloaded}$  = Deflexión de la esquina no cargada, en in.

$AGG$  = Factor de rigidez de la trabazón de agregados.

$k$  = Módulo de la reacción de la subrasante, en psi/in.

$h_{PCC}$  = Espesor de la losa de PCC, en in.

$\zeta_d$  = Factor de rigidez de la barra de transferencia =  $J_d \cdot k \cdot l \cdot dsp$

$d$  = Diámetro de la barra de transferencia, en in.

$dsp$  = Separación de la barra de transferencia, en in.

$J_d$  = Rigidez adimensional de la barra de transferencia al momento de la aplicación de la carga.

$l$  = Radio de rigidez relativa de la losa, en in.

La pérdida de capacidad de corte ( $\Delta s$ ), debido a las reiteradas aplicaciones de carga por neumático, se caracteriza en términos del ancho de la junta transversal. Esta se basa en una función derivada del análisis de los datos de prueba de transferencia de carga desarrollados por la asociación de cemento (PCA). La siguiente pérdida de corte se produce durante el incremento de tiempo (mes).

$$\Delta s = \begin{cases} 0 \rightarrow Si : w < 0.001h_{PCC} \\ \sum_j \frac{0.005}{1.0 + \left(\frac{jw}{h_{PCC}}\right)^{-5.7}} \left(\frac{n_j}{10^6}\right) \left(\frac{\tau_j}{\tau_{ref}}\right) \rightarrow Si : jw < 3.8h_{PCC} \\ \sum_j \frac{0.068}{1.0 + 6.0 \cdot \left(\frac{jw}{h_{PCC}} - 3\right)^{-1.98}} \left(\frac{n_j}{10^6}\right) \left(\frac{\tau_j}{\tau_{ref}}\right) \rightarrow Si : jw > 3.8h_{PCC} \end{cases}$$

Donde:

$n_j$  = Número de aplicaciones de carga para el incremento actual mediante el grupo de carga  $j$ .

$w$  = Apertura de juntas, en milésimas de pulgada (0.001 in)

$\tau_j$  = Esfuerzo de corte en la fisura transversal del modelo de respuesta para el grupo de carga  $j$ , en psi.

$$\tau_j = \frac{AGG(\delta_{loaded} - \delta_{unloaded})}{h_{PCC}}$$

Donde:

$\tau_{ref}$  = Número de aplicaciones de carga para el incremento actual mediante el grupo de carga  $j$ .

$$\tau_{ref} = 111.1 \cdot \exp \left\{ - \exp \left[ 0.9988 \cdot \exp(-0.1089 \log J_{AGG}) \right] \right\}$$

$J_{AGG}$  = Rigidez de la junta en la fisura transversal calculada por el incremento de tiempo.

El daño de la barra de transferencia,  $DAM_{dow}$  se determina de la siguiente manera:

$$DAM_{dow} = C_8 \sum_j \left( \frac{J_d (\delta_{loaded} - \delta_{unloaded}) \cdot DowelSpace}{df_c'} \right)$$

Donde:

$DAM_{dow}$  = Daño en la interfaz entre la barra de transferencia y el concreto.

$C_8$  = Coeficiente igual a 400.

$n_j$  = Número de aplicaciones de carga para el incremento actual mediante el grupo de carga  $j$ .

$J_d$  = Rigidez adimensional de la barra de transferencia al momento de aplicación de la carga.

$\delta_{loaded}$  = Deflexión en la esquina de la losa cargada inducida por el eje, en in.

$\delta_{unloaded}$  = Deflexión en la esquina de la losa no cargada inducida por el eje, en in.

$dsp$  = Espacio entre las barras de transferencia adyacente en la huella del neumático, en in.

$f_c$  = Resistencia a la compresión del PCC, en psi.

$d$  = Diámetro de la barra de transferencia, en in.

El error estándar de la predicción se estima con las ecuaciones siguientes:

$$S_{e(F)} = [0.0097 \cdot Fault(t)]^{0.5178} + 0.014$$

Donde:

$Fault(t)$  = escalonamiento promedio pronosticado de la junta transversal a cualquier tiempo dado  $t$ , in.

### 2.6.3 Regularidad superficial

El IRI se predice como una función del perfil inicial del pavimento tal como se construyó y de cualquier cambio en el perfil longitudinal por el tiempo o por el tránsito, debido a deterioros y movimientos de la cimentación. El modelo calibrado es el siguiente:

$$IRI = IRI_1 + C_1 \cdot CRK + C_2 \cdot SPALL + C_3 \cdot TFAULT + C_4 \cdot SF$$

Donde:

IRI = IRI pronosticado, en in/mi.

IRI<sub>I</sub> =Regularidad superficial inicial medida como IRI, en in/mi.

CRK = Porcentaje de losas con fisuras transversales (todas las severidades).SAPALL = Porcentaje de juntas con descamado (severidades medianas y altas).

TFAULT = Total acumulado del escalonamiento de la junta por milla, en in.

C<sub>1</sub> = 0.8203

C<sub>2</sub> = 0.4417

C<sub>3</sub> = 1.4929

C<sub>4</sub> = 25.24

SF = Factor de sitio

$$SF = AGE(1 + 0.5556 \cdot FI)(1 + P_{200}) \cdot 10^{-6}$$

Donde:

AGE =Edad del pavimento, en años.

FI =Índice de congelamiento, en °F-días.

P<sub>200</sub>=Porcentaje del material subrasante que pasa el tamiz Nro. 200.

El fisuramiento transversal y los escalonamientos se obtienen utilizando los modelos descritos anteriormente. El descamado de la junta transversal se determina de acuerdo a la sgte. ecuación

$$SPALL = \left( \frac{AGE}{AGE + 0.01} \right) \left( \frac{100}{1 + 1.005^{(-1.2 \cdot AGE + SCF)}} \right)$$

Donde:

SPALL =Porcentaje de las juntas descamadas (severidades medianas y altas).

AGE= Edad del pavimento desde su construcción, en años.

SCF= Factor de escala basado en la relación con el sitio, el diseño y el clima.

$$SFC = -1400 + 350 \cdot AC_{PCC} \cdot (0.5 + PREFORM) + 43.4 f_c^{0.4} - 0.2 (FT_{cycle} \cdot AGE) + 43 H_{PCC} - 536 WC_{PCC}$$

$AC_{PCC}$  = Contenido de aire en el PCC, en %

$PREFORM$  = 1 si el sellador preformado está presente, 0 si no lo está.

$f_c$  = Resistencia a compresión del PCC, en psi.

$FT_{cycles}$  = Número promedio anual de ciclos de congelamiento – descongelamiento.

$H_{PCC}$  = Espesor de la losa PCC, en in.

$WC_{PCC}$  = Relación agua/cemento del PCC.

## 2.7 LIMITACIONES DEL PROGRAMA

La aplicación se centra netamente en el diseño de un aplicativo computacional (software) para el diseño de pavimentos por el Método Mecánico – Empírico AASHTO 2015, por lo que la calibración local de las variables de entrada para el método (clima, tráfico), está fuera del alcance de este trabajo.

También se tiene como limitación del software que los pavimentos rígidos tienen muchos tipos de deformaciones, pero el software sólo toma las principales que son: escalonamiento de juntas, porcentaje de fisuras transversales y el IRI.

## 2.8 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Ahuellamiento:** Depresión superficial en la trayectoria del neumático. Es el resultado de la deformación vertical plástica o permanente de cada una de las capas que conforman el pavimento flexible a causa de la consolidación, debido a las cargas de tránsito (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Base:** Capa de material grueso granular tratada o no tratada que subyace a la carpeta de rodadura (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Carpeta asfáltica:** Capa superior de los pavimentos flexibles, elaborada con la mezcla homogénea de materiales pétreos y productos asfálticos para proporcionar la superficie de rodamiento a los vehículos que transitan sobre el pavimento (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**CBR:** Medida indirecta de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones controladas de humedad y densidad (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Confiabilidad del diseño de prueba:** Probabilidad de que el indicador del desempeño pronosticado en el diseño de prueba no supere los umbrales establecidos dentro de la vida útil del pavimento (MEPDG, 2015).

**Curva característica suelo – agua:** Curva Característica de Succión en el suelo (SWCC). Relación existente entre el contenido de agua y la succión matricial en un suelo. La SWCC no es única para un suelo, variando para trayectorias de humedecimiento y trayectorias de secado del suelo (histéresis) (MEPDG, 2015).

**Criterios de diseño o valores umbrales:** Se utilizan para determinar la vida de la estructura del pavimento y la estrategia de rehabilitación. Representan la magnitud del deterioro o nivel de rugosidad para el cual se hace necesario actividades de rehabilitación mayor (MEPDG, 2015).

**Daño incremental:** Relación definida por el número real de aplicaciones de carga por un neumático, dentro de un intervalo de tiempo, y para un nivel de carga y tipo de eje específico, dividido entre el número admisible de aplicaciones de carga por neumático, para el mismo nivel de carga y tipo de eje, bajo las condiciones existentes en el mismo intervalo específico de tiempo. Los indicadores de daño incremental luego se suman para determinar el daño acumulado a lo largo del tiempo (MEPDG, 2015).

**Escalonamiento de juntas transversales (JPCP):** Diferencia de elevación entre ambas caras de la junta, se mide aproximadamente a una distancia de 1 a 3 pies del borde externo de la losa (junta longitudinal para losas de ancho convencional) o de la franja de la pintura demarcatoria externa del carril. Surge como resultado de una aplicación sucesiva de cargas elevadas, insuficiente transferencia de carga a través de la junta, humedad libre bajo la losa de PCC, erosión de la base/ subbase de apoyo, de la subrasante o incluso de la base de la berma y alabeo cóncavo de la losa, 2015).

**Fisuramiento transversal de abajo hacia arriba (JPCP):** Cuando los ejes de los camiones están sobre el borde longitudinal de la losa o muy cerca del mismo, en medio

de las juntas transversales ocurre un esfuerzo crítico de tracción por flexión en la parte inferior de la losa bajo la carga. Esta tensión aumenta notablemente cuando hay gradiente térmico altamente positivo a través de la losa; la repetición de cargas pesadas en esas condiciones provoca la acumulación de daño por fatiga a lo largo del borde bajo la losa, lo cual eventualmente resulta en la aparición de una fisura transversal que se propaga hasta la superficie del pavimento (MEPDG, 2015).

**Fisuramiento transversal de arriba hacia abajo (JPCP):** La aplicación repetitiva de cargas por parte de camiones tractores con cierta separación entre sus ejes cuando el pavimento está expuesto a gradientes térmicos altamente negativos trae como resultado daño por fatiga en la parte superior de la losa. Esto eventualmente resulta en una fisura transversal o diagonal que se inicia en la superficie del pavimento. La condición de carga por neumático crítica para este tipo de fisuramiento involucra una combinación de ejes que carga los extremos opuestos de una losa simultáneamente (MEPDG, 2015).

**Espectro de cargas:** Histograma o distribución estadística de la carga de un tipo de eje dado (simple, tándem, tridem o quad), de un cierto vehículo o conjunto de ellos durante un período de tiempo. De este modo los valores de distribución son los porcentajes del total de ejes aplicados, para cada rango de carga por eje (MEPDG, 2015).

**Factores de calibración:** Son de dos tipos: factores de calibración global y local. Permiten aplicar ajustes a los coeficientes y/o exponentes de la función de transferencia para eliminar los sesgos entre deterioros medidos y pronosticados (MEPDG, 2015).

**Fisuramiento tipo piel de cocodrilo:** Fisuramiento de abajo hacia arriba. Consiste en un tipo de fisuramiento por fatiga o relacionado a las cargas de tránsito. Se define como una serie de fisuras interconectadas (con un patrón característico de “piel de cocodrilo”) que se inicia en la cara inferior de la capa de HMA. Inicialmente aparecen como múltiples fisuras cortas, longitudinales o transversales, localizadas en la trayectoria del neumático; luego se van interconectando lateralmente en forma progresiva con el sucesivo tránsito de camiones (MEPDG, 2015).

**Fisuramiento longitudinal:** Fisuramiento de arriba hacia abajo. Es un tipo de fisuramiento por fatiga o relacionado a las cargas de tránsito. Se produce en la zona de la

huella y se define como las grietas predominantemente paralelas a la línea central del pavimento. Se inician en la superficie del pavimento de HMA y, en un principio, aparecen como fisuras longitudinales cortas que luego se van conectando longitudinalmente con el continuo tránsito de camiones (MEPDG, 2015).

**Fisuramiento transversal:** Fisuramiento térmico. Se trata de un fisuramiento no relacionado con las cargas de tránsito. Es principalmente perpendicular a la línea central del pavimento y es causado por las bajas temperaturas o por el ciclo térmico (MEPDG, 2015).

**Función de transferencia:** Parte empírica del modelo de predicción de deterioro que relaciona el parámetro crítico de respuesta del pavimento con su deterioro, ya sea directamente o a través del concepto de daño (Mepdg, 2015).

**Índice de Regularidad Internacional (IRI):** Acumulación del movimiento vertical que sufre la suspensión de una rueda cuando esta recorre una superficie de rodadura a 80 km/h. Es un índice de comodidad de rodadura y constituye el parámetro de la vía que percibe el usuario (MEPDG, 2015).

**Losa de PCC:** Losa de Concreto de Cemento Portland. Elementos cuyas dimensiones en planta son relativamente grandes en comparación con su espesor, están conformadas por la mezcla homogénea de cemento Portland, agua, agregado, aire y aditivos especiales. Conforman la superficie de rodamiento y transmiten las cargas vehiculares a capas inferiores de manera uniforme (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Modelo de respuesta estructural:** Modelo mecanístico basado en los principios fundamentales de la ingeniería y se utiliza para calcular la respuesta crítica del pavimento (MEPDG, 2015).

**Módulo dinámico:** Valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal. El módulo complejo se define como la razón de la amplitud del esfuerzo sinusoidal en un tiempo dado y a una frecuencia angular de carga (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Módulo resiliente:** Relación entre la deformación elástica resiliente y el esfuerzo desviador aplicado, en materiales no ligados. Representa la respuesta de un suelo ante cargas cíclicas (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Módulo de elasticidad:** Relación entre el esfuerzo al que está sometido un material y su deformación unitaria. En el PCC representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Sub-base:** Capa que forma parte de la estructura de un pavimento y que se encuentra inmediatamente por debajo de la capa base (Reyes Lizcano, FA. 2015).

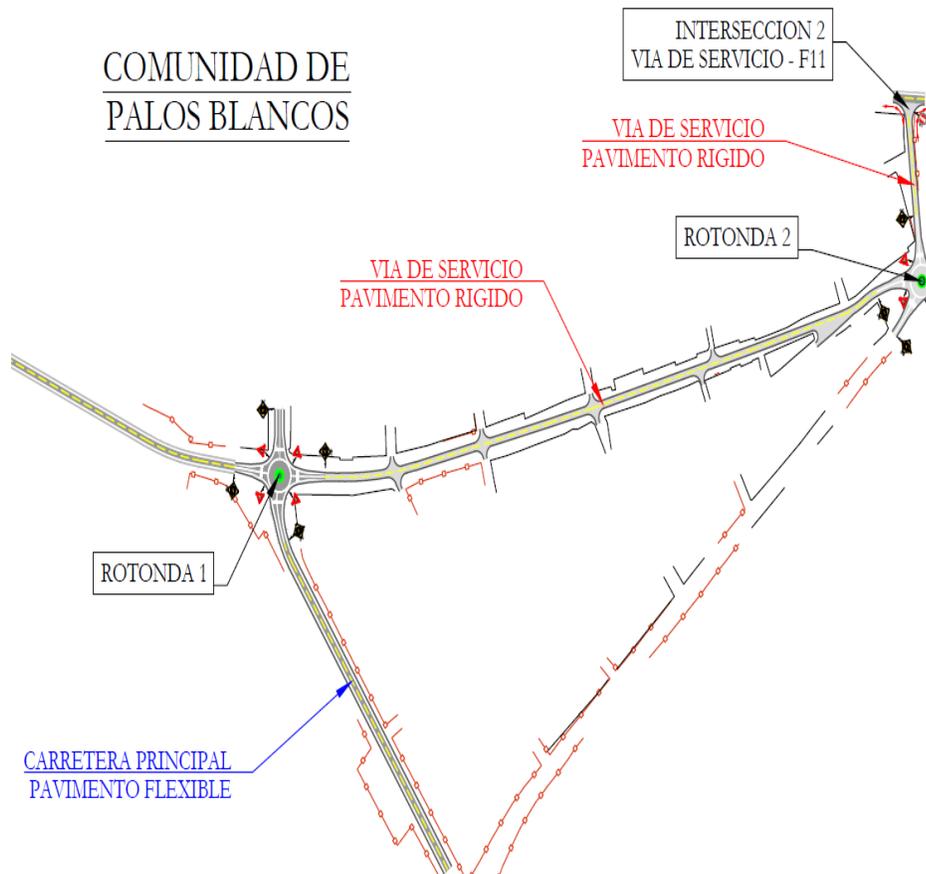
**Subrasante:** Se denomina así al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento (Reyes Lizcano, FA. 2015).

**Vida útil de diseño:** Tiempo transcurrido desde la construcción hasta que el pavimento se ha deteriorado estructuralmente a tal punto que requiere de una reconstrucción o rehabilitación importante (condición crítica definida para el pavimento). (MEPDG, 2015)

**CAPITULO III**  
**APLICACIÓN DE LA PRÁCTICA AL PAVIMENTO RÍGIDO**  
**TRAMO PALOS BLANCOS**

**3.1 GENERALIDADES**

**Figura 3- 1.** Vía de pavimento rígido tramo Palos Blancos.



Fuente: Elaboración propia.

El Proyecto comunidad Palos Blancos, con una longitud aproximada de 900m., atraviesa toda la vía principal donde pasan los buses que van hacia la ciudad de Yacuiba y Tarija.

**3.2 VARIABLES DE DISEÑO**

En el diseño de pavimentos se involucran una serie de variables, de tal forma tenemos variables provenientes del tráfico que circulará por la carretera, variables que dependen de las características mecánicas del hormigón a emplearse, variables que están en función

de las condiciones climatológicas de la zona de emplazamiento del proyecto y variables que dependen de las características de las capas inferiores del paquete estructural.

### 3.2.1 Tráfico<sup>2</sup>

**Tabla 3- 1.** Composición vehicular promedio por estación.

ESTACION	T.P.D.A.	Descripcion	Composicion del Trafico											Total	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
Cr. Palos Blancos	195	Nº de Veh.	45	62	3	4	2	33	8	8	36	10	1	2	214
		Porcentaje	21.03%	29.04%	1.34%	1.80%	1.07%	15.42%	3.60%	3.60%	16.89%	4.61%	0.53%	1.07%	100%

Fuente: Diseño de pavimento rígido vía Palos Blancos.

#### 3.2.1.1 Proyección del TPDA – tránsito normal

**Tabla 3- 2.** Proyección de TPDA – tránsito normal

Años	Automoviles y Vagonetas	Camionetas (hasta 2 Tn)	Minibuses (hasta 15 pjs)	Microbuses (hasta 21 pjs; 2 ejes)	Buses Medianos (hasta 35 pjs; 2 ejes)	Buses Grandes (mas de 35 pjs; 3 ejes)	Camiones Medianos (de 2.5 a 10.0 Tn ; 2 ejes)	Camiones Grandes (mas de 10.0 Tn ; 2 ejes)	Camiones Grandes (mas de 10.0 Tn ; 3 ejes)	Camiones Semirremolque	Camiones Remolque	Otros Vehiculos	TOTAL
2018	45	62	3	4	2	33	8	8	36	10	1	2	214
2019	49	67	3	4	2	36	8	8	39	11	1	2	232
2020	53	73	3	5	3	39	9	9	42	12	1	3	251
2021	57	79	4	5	3	42	10	10	46	13	1	3	271
2022	62	85	4	5	3	45	11	11	50	14	2	3	294
2023	67	92	4	6	3	49	11	11	54	15	2	3	318
2024	72	100	5	6	4	53	12	12	58	16	2	4	344
2025	78	108	5	7	4	57	13	13	63	17	2	4	373
2026	85	117	5	7	4	62	15	15	68	19	2	4	403
2027	92	127	6	8	5	67	16	16	74	20	2	5	437
2028	99	137	6	9	5	73	17	17	80	22	3	5	473
2029	108	149	7	9	5	79	18	18	86	24	3	5	512
2030	117	161	7	10	6	85	20	20	94	26	3	6	554
2031	126	174	8	11	6	92	22	22	101	28	3	6	600
2032	137	189	9	12	7	100	23	23	110	30	3	7	649
2033	148	204	9	13	8	108	25	25	119	32	4	8	703
2034	160	221	10	14	8	117	27	27	128	35	4	8	761
2035	173	239	11	15	9	127	30	30	139	38	4	9	824
2036	187	259	12	16	10	137	32	32	151	41	5	10	891
2037	203	280	13	17	10	149	35	35	163	44	5	10	965
2038	220	303	14	19	11	161	38	38	176	48	6	11	1045

Fuente: Diseño de pavimento rígido vía Palos Blancos.

Para la determinación del tráfico de diseño para la vía de servicio se consideró el

<sup>2</sup> Aporte de diseño de espesores de pavimento vía Palos Blancos.

crecimiento de las actividades de la región, aplicables al proyecto que afectan los valores TPDA del tramo, entonces corresponde determinar la forma y magnitud en que estos serán afectados mediante la elaboración de “proyecciones”.

Una proyección es una estimación de un cambio futuro, éstas se realizan sobre la base de suposiciones de permanencia de tendencias y factores no controlables como son los siguientes:

El crecimiento histórico del TPDA.

El crecimiento de la población.

El crecimiento de la población, también está íntimamente ligado con el crecimiento de los volúmenes de tráfico por lo que este parámetro interviene para la proyección del tráfico normal.

**Tasa de crecimiento= 4%**

### **3.2.1.2 Determinación de los factores de equivalencia por carga**

En el diseño estructural de pavimentos a través del método AASHTO, la solicitud causada por el tráfico de los vehículos usuarios de la carretera está expresada como el número de repeticiones de aplicación de carga de un eje padrón de 8.2 ton. Para ello, el número de pasadas de los ejes de los vehículos que emplearán la carretera en el periodo de análisis (con diferentes cargas y configuraciones), debe ser correlacionado con el eje padrón a través de factores de equivalencia.

Los factores de equivalencia vehicular por carga han sido determinados, para cada tipo de vehículo, a partir de la composición de tráfico detectada en las encuestas de origen/destino realizadas en el proyecto (se muestra en el estudio de tráfico); empleando las tablas de la guía para diseños de estructuras de pavimento de la AASHTO, considerando un índice de serviciabilidad final igual a 2.5 y un número estructural SN = 4.

El peso total viene dado por la siguiente expresión:

$$W_t = W_v + W_c$$

Donde:

$W_t$  = Peso total

$W_v$  = Peso del vehículo.

$W_c$  = Peso de la carga que lleva el vehículo

Para el análisis correspondiente, de acuerdo al estudio de tráfico, se han tomado en cuenta los tipos de vehículos que circulan por el tramo en estudio.

Se ha considerado, para efectos de cálculo, que el eje delantero soporta valores cercanos a un tercio del peso total del vehículo y el eje trasero soporta el porcentaje restante.

La estimación de las cargas por eje se muestra en detalle en la Tabla 3-3 (condición carga completa), Tabla 3-4 (condición 50 % de carga).

El peso en toneladas, permite ingresar a las tablas del Apéndice D de la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos publicada por la AASHTO 1993, del que se obtiene el factor de equivalencia del eje. La suma de los factores parciales por eje obtenidos, proporciona el factor de equivalencia total por vehículo.

**Tabla 3- 3.** Factor de equivalencia con carga completa.

FACTOR DE EQUIVALENCIA CON CARGA COMPLETA																	
TIPO DE VEHICULO		Nº PASAJEROS	NOMENCLATURA ESTANDAR	PESO VACIO (tn)	PESO DE LA CARGA (tn)	PESO TOTAL (tn)	DISTRIBUCION DE EJES CARGADOS										
							DELANTERO		TRASERO		SEMI REMOLQUE		REMOLQUE				
							%	TRASERO	%	SEMI REMOLQUE	%	DELANTERO	%	TRASERO	%		
1	AYV	Automovil Vagoneta	11			1.5	0.70	46.67	0.80	53.33							
2	CTA	Camioneta	11			2	1.00	50.00	1.00	50.00							
3	MNB	Minibus	15	11		7	3.00	42.86	4.00	57.14							
4	MCB	Microbus	21	11	6	3.2	9.2	32.61	6.20	67.39							
5	BM	Bus Mediano	35	11	10	5.3	15.3	34.64	10.00	65.36							
6	BG	Bus Grande	45	12	14	6.8	20.8	26.44	15.30	73.56							
7	CME	Camion Mediano		11	4	5.5	9.5	33.68	6.30	66.32							
8	CES	Camion de Eje Simple		11	7	11	18	38.89	11.00	61.11							
9	CET	Camion de Eje Tandem		12	10	15	25	28.00	18.00	72.00							
10	CSR	Camion Semi-Remolque		12 2	19.3	23.7	43	7.00	16.28	18.00	41.86	18	41.86				
11	CCR	Camion con Remolque		1 2 1 2	19	35	54	7.00	12.96	18.00	33.33			11	20.37	18	33.33
12	OV	Otros Vehiculos		11			10	4.00	40.00	6.00	60.00						

Fuente: Diseño de pavimento rígido vía Palos Blancos.

**Tabla 3- 4.** Factor de equivalencia con carga 50%.

FACTOR DE EQUIVALENCIA CON CARGA 50%														
TIPO DE VEHICULO	Nº PASAJEROS	NOMENCLATURA ESTANDAR	PESO VACIO (tn)	PESO DE LA CARGA (tn)	PESO TOTAL (tn)	DISTRIBUCION DE EJES CARGADOS								
						DELANTERO		TRASERO		SEMI REMOLQUE		REMOLQUE		
						%	%	%	%	%	%	%	%	
1	AYV	Automovil Vagoneta	11		1.5	0.70	46.67	0.80	53.33					
2	CTA	Camioneta	11		2	1.00	50.00	1.00	50.00					
3	MNB	Minibus	15		7	3.00	42.86	4.00	57.14					
4	MCB	Microbus	21	6	7.6	2.48	32.61	5.12	67.39					
5	BM	Bus Mediano	35	10	12.65	4.38	34.64	8.27	65.36					
6	BG	Bus Grande	45	14	17.4	4.60	26.44	12.80	73.56					
7	CME	Camion Mediano	11	4	6.75	2.27	33.68	4.48	66.32					
8	CES	Camion de Eje Simple	11	7	12.5	4.86	38.89	7.64	61.11					
9	CET	Camion de Eje Tandem	12	10	17.5	4.90	28.00	12.60	72.00					
10	CSR	Camion Semi-Remolque	122	19.3	31.15	5.07	16.28	13.04	41.86	13.04	41.86			
11	CCR	Camion con Remolque	1212	19	36.5	4.73	12.96	12.17	33.33			7.44	20.37	33.33
12	OV	Otros Vehiculos	11		10	4.00	40.00	6.00	60.00					

Fuente: Diseño de pavimento rígido vía Palos Blancos.

### 3.2.2 Materiales

#### 3.2.2.1 Hormigón

##### 3.2.2.1.1 Ubicación de la fuente de los materiales a utilizarse

Agregado petreo: Los materiales pétreos de la investigación son provenientes de la planta chancadora Garzón ubicada en San Mateo. Se verificará si los agregados son de buena calidad mediante los ensayos de caracterización.

Coordenadas:

**Tabla 3- 5.** Coordenadas de la ubicación del agregado pétreo.

Coordenadas	
Geográficas	Latitud: 21°28'19,25" S Longitud: 64°44'46,79" W
UTM	Este: 319062,154 Norte: 7624602,402

Fuente: Elaboración propia

##### 3.2.2.1.2 Ensayo Granulometría AASHTO T – 27 (ASTM C-136)

#### Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las carreteras es la distribución de los tamaños de partículas al mezclarlos. La graduación de los agregados es la combinación de tamaños de partículas en la mezcla que afecta la densidad, la resistencia y la economía de la estructura del pavimento.

El objetivo es determinar los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material seco por medio de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura.

### Procedimiento

Seleccionar un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va a ensayar.

Determinar el peso de la muestra retenida en cada tamiz con una balanza, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original.

A la porción de material agregado que queda retenida en la malla N°10 (esto es, con partículas mayores de 2,00mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que pasa por la malla N°10 pero queda retenido en la malla N°200 (partículas mayores que 0,075mm) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla N°200 se llama fino y corresponde a impurezas limo y arcilla. Se realizaron 3 análisis granulométricos por tamizado para cada uno de los agregados, tanto para la grava, gravilla y arena.

**Tabla 3- 6.** Datos de la granulometría de la grava.

N° de ensayo	1	2	3
	Peso Retenido (gr.)		
Tamiz			
2 1/2"	0.00	0.00	0.00
2"	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	138.00	144.80	135.00
1"	2771.30	2768.00	2750.30
3/4"	1675.40	1667.00	1677.70
1/2"	413.30	417.50	435.30
3/8"	0.00	0.00	0.00
N°4	0.00	0.00	0.00
base	1.00	1.5	1.30

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3- 7.** Datos de la granulometría de la arena.

N° de ensayo	1	2	3
	Peso Retenido (gr.)		
Tamiz			
3/8"	0.00	0.00	0.00
N°4	9.40	10.60	8.90
N°8	40.80	41.60	41.50
N°16	111.30	113.70	109.80
N°30	358.60	357.60	359.80
N°50	366.30	364.90	367.30
N°100	93.60	94.30	94.40
base	20.00	17.30	18.30

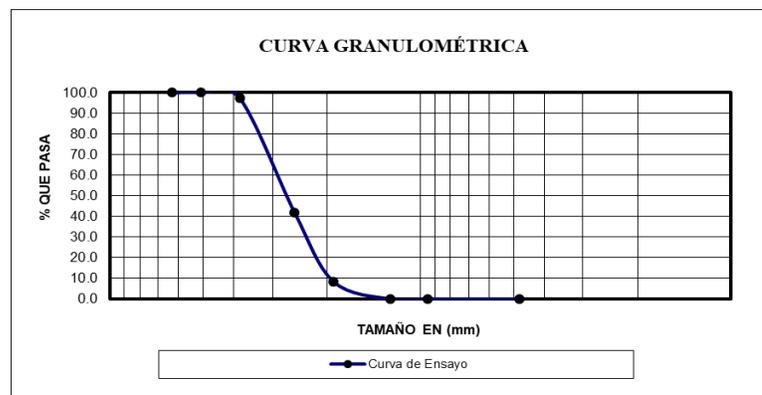
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3- 8.** Planilla de resultados de las granulometrías promedio

**Granulometría agregado grueso**

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Retenido Acumulado		% Que pasa del total
			(gr)	(%)	
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>
1 1/2"	38.10	139.27	139.27	2.79	<b>97.2</b>
1"	25.40	2763.20	2902.47	58.05	<b>42.0</b>
3/4"	19.05	1673.37	4575.83	91.52	<b>8.5</b>
1/2"	12.50	422.03	4997.87	99.96	<b>0.0</b>
3/8"	9.50	0.00	4997.87	99.96	<b>0.0</b>
N°4	4.80	0.00	4997.87	99.96	<b>0.0</b>
base	0	1.27	4999.13	99.98	<b>0.0</b>

**Grafica 3- 1.** Curva granulométrica-agregado grueso.

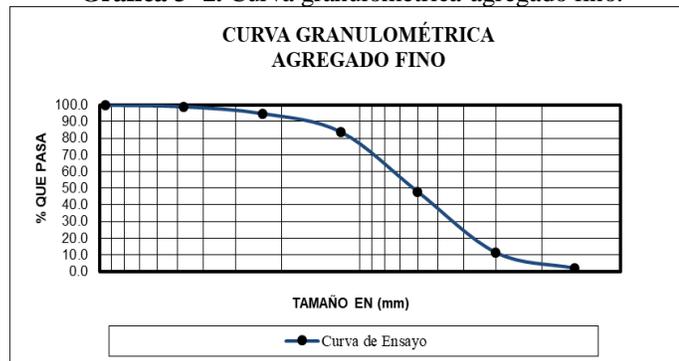


Fuente: Elaboración propia.

**Granulometría agregado fino**

Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	<b>100.0</b>
Nº4	4.75	9.63	9.63	0.96	<b>99.0</b>
Nº8	2.36	41.30	50.93	5.09	<b>94.9</b>
Nº16	1.18	111.60	162.53	16.25	<b>83.7</b>
Nº30	0.60	358.67	521.20	52.12	<b>47.9</b>
Nº50	0.30	366.17	887.37	88.74	<b>11.3</b>
Nº100	0.15	94.10	981.47	98.15	<b>2</b>
base		18.53	1000.00	100.00	<b>0.0</b>

**Grafica 3- 2.** Curva granulométrica-agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2.1.3 Ensayo de desgaste mediante la máquina de los Ángeles AASHTO T-96 (ASTM C-131)

Los materiales que se usan en los pavimentos de carreteras deberán ser duros y resistir el desgaste debido al efecto de pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de los Ángeles. La máquina que se usa en la prueba de los Ángeles consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes en posición horizontal. La muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de los Ángeles, y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 30 y 33rpm; el número total de vueltas deberá ser 500. La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad constante. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada en el tamiz Nº12.

El material retenido en el tamiz se lava, se seca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste la diferencia entre la masa original y la masa

fin de la muestra expresada como un porcentaje de la masa original. El método T-96 de AASHTO (ASTM C-131) da un procedimiento detallado para esta prueba.

El tipo de abrasión que se efectuó es de tipo A.

**Figura 3- 2.** Máquina de desgaste por abrasión y material ensayado.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 3- 3.** Máquina de desgaste por abrasión y material ensayado.



**Fuente:** Elaboración propia

**Grafica 3- 3.** Tamizado de material.



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3- 9.** Datos del ensayo de desgaste.

Datos de laboratorio		
Pasa tamiz	Retenido tamiz	Peso retenido
1 1/2"	1"	1250 gr.
1"	3/4"	1250 gr.
3/4"	1/2"	1250 gr.
1/2"	3/8"	1250 gr.
Retenido tamiz de corte Nº12 (1.7 mm)		2051.6 gr.
Diferencia		2948.4 gr.
Número de ensayos		1
Tipo de Gradación		A
Carga abrasiva		12 esferas 500 revoluciones.

**Fuente:** Elaboración propia.

Cálculo

$$\% \text{ desgaste} = \frac{\text{Diferencia}}{\text{Peso total}} * 100$$

$$\% \text{ desgaste} = \frac{5000 - 3960.4}{5000} * 100$$

$$\% \text{ desgaste} = 20.8\%$$

#### 3.2.2.1.4 **Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados gruesos** **AASHTO T-85 (ASTM C-127)**

El peso específico y la absorción de los agregados son propiedades importantes que se requieren para el diseño de concreto. La densidad relativa de un sólido es la razón de su masa a la de un volumen igual de agua destilada a una temperatura específica.

##### **Procedimiento:**

Para realizar el ensayo se deberá realizar:

Cuartear el agregado grueso más o menos 5 kg lavados y retenidos en la malla N°3/8", se secan a peso constante.

La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua.

Los agregados se sacan del agua.

Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca.

La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el peso sumergido en agua.

La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante.

**Figura 3- 4.** Peso específico del agregado grueso.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3- 10.** Datos del ensayo de peso específico de agregado grueso.

Muestra N°	Peso muestra secada "A" (gr)	Peso muestra saturada con sup. seca "B" (gr)	peso muestra saturada dentro del agua "C" (gr)
1	4958.30	5025.70	3082.00
2	4961.30	5029.60	3078.00

Fuente: Elaboración propia.

### Cálculo

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B-C}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{4958.3}{5025.7-3082}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2.55 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{P. E. A. saturado con superficie seca} = \frac{B}{B-C}$$

$$\text{P. E. A. saturado con superficie seca} = \frac{5025.7}{5025.7-3082}$$

$$\text{P. E. A. saturado con superficie seca} = 2.59 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A-C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{4958.3}{4958.3-3082}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2.64 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B-A}{A} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{5025.7-4958.3}{4958.3} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 1.36$$

**Tabla 3- 11.** Resultados del ensayo de peso específico para grava

<b>Muestra N°</b>	<b>Peso específico a granel (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso específico aparente (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>% de absorción</b>
1	2.55	2.59	2.64	1.36
2	2.54	2.58	2.63	1.38

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.2.1.5 Ensayo de peso específico y absorción de agua en agregados finos AASHTO T-84 (ASTM C-128)

Mediante este ensayo podemos determinar el peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, este valor expresado en porcentaje en peso. Se define como peso específico aparente a la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

**Figura 3- 5.** Peso específico del agregado fino.



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3- 12.**Datos obtenidos del ensayo peso específico para agregado fino.

Muestra N°	Peso muestra (gr)	Peso de matr�az (gr)	Muestra + matraz + agua (gr)	Peso del agua agregado al matr�az "W" (ml) � (gr)	Peso muestra secada "A" (gr)	Volumen del matr�az "V" (ml)
1	500	116	905	289.00	492.70	500.00
2	500	116	903.6	287.60	494.20	500.00

Fuente: Elaboración propia.

### Calculo

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{V-W}$$

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{492.7}{500-289}$$

$$\text{Peso específico a granel} = 2.34 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{P. E. A. saturado con superficie seca} = \frac{500}{V-W}$$

$$\text{P. E. A. saturado con superficie seca} = \frac{500}{500-289}$$

$$\text{P. E. A. saturado con superficie seca} = 2.37 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V-W)-(500-A)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{492.7}{(500-289)-(500-492.7)}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2.42 \text{ gr/cm}^3$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500-A}{A} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500-492.7}{492.7} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = 1.46$$

**Tabla 3- 13.** Resultados del ensayo de peso específico para grava.

Muestra N°	P. E. a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
1	2.34	2.37	2.42	1.46
2	2.33	2.35	2.39	1.16

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.2.2.1.6 Ensayo de peso unitario agregados AASHTO T-19 (ASTM C-29)

El peso unitario de unos áridos dados puede determinarse sobre volumen suelto o sobre volumen compactado. Para ello se emplea un recipiente cilíndrico de volumen conocido.

##### **Procedimiento:**

Para medir el peso unitario con áridos sueltos se llena el recipiente por un procedimiento normalizado y se determina el peso de los áridos contenidos en el recipiente lleno.

Para medir el peso compactado se llena el recipiente en tres capas aproximadamente iguales, aplicando a cada capa determinados procedimientos de agitación o apisonado según el tamaño de los áridos empleados en el ensayo.

Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHO T-19 y ASTM C-29.

**Grafica 3- 4.** Peso unitario agregado grueso.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3- 14.** Datos del ensayo de peso unitario suelto de la grava.

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	5725.00	9790.70	21290.00	15565.00
2	5725.00	9790.70	21310.00	15585.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3- 15.** Datos del ensayo de peso unitario compactado de la grava.

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra compacta (gr)	Peso muestra compacta (gr)
1	5725.00	9790.70	22080.00	16355.00
2	5725.00	9790.70	22095.00	16370.00

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento de cálculo de peso unitario:

$$\text{Peso unitario} = \frac{\text{Peso del agregado}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

$$\text{Peso unitario} = \frac{16355}{9790.7}$$

$$\text{Peso unitario} = 1.67 \text{ gr/cm}^3$$

**Tabla 3- 16.** Resultados del ensayo de peso unitario de la grava.

Numero de ensayo	Unidad	1	2
Peso unitario suelto	gr/cm <sup>3</sup>	1.529	1.592
Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	1.591	
Peso unitario compactado	gr/cm <sup>3</sup>	1.67	1.672
Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	1.671	

Fuente: Elaboración propio.

**Tabla 3- 17.** Datos del peso unitario suelto de la arena.

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra suelta (gr)	Peso muestra suelta (gr)
1	2609.70	2954.80	7040.00	4430.30
2	2609.70	2954.80	7160.00	4550.30

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3- 18.** Datos del peso unitario compactado de la arena.

Muestra N°	Peso recipiente (gr)	Volumen recipiente (cm3)	Peso recip. + muestra compacta (gr)	Peso muestra compacta (gr)
1	2609.70	2954.80	7345.00	4735.30
2	2609.70	2954.80	7500.00	4890.30

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3- 19.** Resultados del ensayo de peso unitario de la arena.

Numero de ensayo	Unidad	1	2
Peso unitario suelto	gr/cm <sup>3</sup>	1.499	1.54
Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	1.52	
Peso unitario compactado	gr/cm <sup>3</sup>	1.603	1.655
Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	1.629	

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2.1.7 Resultados de las características de los agregados

**Tabla 3- 20.** Resultados de las características de los agregados.

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Modulo de finura de la arena (MF)	s/u	2.61
2.- Peso unitario compactado de la grava ( PUC )	kg/m <sup>3</sup>	1671
3.- Peso específico de la arena ( $\gamma_f$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2.41
4.- Peso específico de la grava ( $\gamma_g$ )	gr/cm <sup>3</sup>	2.64
5.- Absorción de la arena ( Aa )	%	1.31
6.- Absorción de la grava ( Ag )	%	1.4
7.- Humedad de la arena ( Ha )	%	1.92
8.- Humedad de la grava ( Hg )	%	2.37
9.- Tamaño máximo nominal ( TMN )	pulg	1½"
10.- Tamaño máximo ( TM )	pulg	1½"
11.- Peso específico del cemento	gr/cm <sup>3</sup>	3.14

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2.1.8 Metodología del diseño de mezcla<sup>3</sup>



De acuerdo al ACI 211:

La dosificación de los materiales para el hormigón debe establecerse para lograr:

- Trabajabilidad y consistencia que permita colocar fácilmente el hormigón, sin segregación ni exudación
- Resistencia a exposiciones especiales
- Conformidad con los requisitos del ensayo de resistencia
- Acabado superficial

#### Dosificación de hormigones (Método ACI -211)



De los materiales (Agregados: origen, tamaño y color)  
Del elemento a vaciar, tamaño y forma de las estructuras  
Resistencia requerida  
Condiciones ambientales  
Condiciones a la que estará expuesta



En relación a su geometría y el refuerzo de las estructuras  
Muchas veces la selección del TM está en función de la disponibilidad del material y por su costo.  
Deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura.

<sup>3</sup> Las tablas para el diseño de mezclas se encuentran en ANEXOS 2



Examinar el tamaño de la sección que se va construir, la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo.  
 Considerar las condiciones de colocación.  
 Considerar el sistema de compactación.



Está en función de las condiciones de trabajabilidad  
 TMN del agregado grueso  
 Ocasionalmente del tipo de cemento



El ACI proporciona el % aprox. de aire total  
 $AIRE\ TOTAL = A. ATRAPADO + A. INCORPORADO$



La relación a/c es función de la resistencia, durabilidad y requisitos de acabado.



$$\text{Cemento} = \text{agua} / (\text{a/c})$$



Análisis de la capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas  
 ↓  
 Lograr una máxima densidad y por ende una máxima resistencia



Calculo teórico para 1 m<sup>3</sup> (volúmenes absolutos)

**Elaboración de las muestras**

A continuación, se describe el proceso que se siguió, para la elaboración de los diferentes tipos de muestras basados en ensayos de testificación de materiales (ASTM), constando de probetas cilíndricas estándar de 15cm. de diámetro y 30cm de alto y de vigas rectangulares de ancho de 15cm., de alto 15cm., de largo 50 cm.

## Hormigón

Se inició el vaciado de probetas (patrón) y de vigas rectangulares de hormigón simple, pesando los agregados, de acuerdo a las proporciones obtenidas del cálculo de dosificación correspondiente a cada agregado (cemento, arena, grava, agua), en condición seca.

A continuación, se introdujo a la mezcladora el agregado grueso y gran parte del agua, segundos más tarde, luego de que el agregado grueso se haya saturado, se introdujo el cemento y la arena, seguido del agua restante para fluidificar la mezcla y ésta se homogenice en función al diseño de cálculo.

Luego de transcurridos un par de minutos en la mezcladora, se vació la pasta de hormigón sobre un recipiente, para proceder al vaciado de las probetas y vigas rectangulares al ensayo de consistencia o desplazamiento de cono. Los moldes se colocaron en un lugar donde no serán movidos por un periodo de  $24 \pm 8$  horas después que han sido llenados. Los moldes fueron limpiados y cubiertos en su interior con un líquido oscuro de tipo viscoso (aceite) para evitar que el hormigón se adhiera a las paredes de los moldes.

Teniendo los moldes y el hormigón listos, se procedió al llenado de los especímenes según la siguiente secuencia. Los cilindros se llenaron en tres capas, dando a cada capa 25 golpes con una varilla de punta redonda de 5/8" y alrededor de 15 golpes con un martillo de goma en los 4 puntos cardinales del cilindro. Terminada la última capa, se enrasó la superficie con la misma varilla de compactación para que la superficie quede lo más lisa y uniforme posible. Se dejó fraguar al hormigón por 24Hrs. y se procedió al desmolde para que las piezas de hormigón, sean sometidas al curado.

**Figura 3- 6.** Proceso de vaciado de probeta en molde rectangular.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3- 7.** Vaciado de probeta en molde rectangular.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3- 8.** Proceso de vaciado de probeta en molde cilíndrico.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3- 9.** Vaciado de probeta en molde cilíndrico.



Fuente: Elaboración propia.

### Curado de las muestras

Luego del proceso de fraguado del hormigón, fue necesario mantenerlo tan saturado de agua como sea posible, con el fin de terminar de hidratar las partículas del cemento y conseguir así su máxima eficiencia.

Respecto al curado que tuvieron los especímenes, después que se llenaron los moldes, se los colocó en un ambiente fresco. Los especímenes se mantuvieron así durante un periodo de 24 horas  $\pm$  8 horas hasta su momento de desmoldeo. Cuando los especímenes fueron desmoldados, se trasladaron hacia el cuarto de curado donde fueron sumergidos en una piscina llena con agua. Una vez depositados los especímenes en el cuarto de curado, se espera que se cumpla el periodo necesario para poder ser ensayados.

#### 3.2.2.2 Módulo promedio de ruptura a flexión del hormigón a 28 días ( $S'_c$ )

Tabla 3- 21. Tabla de ruptura a flexión del hormigón.

Probeta N°	Edad (días)	Resistencia a (Mpa)	Proyección 28 días (Mpa)	Resistencia promedio (Mpa)
1	14	3.501	4.20	4.2
2	14	3.49	4.18	
3	14	3.53	4.22	
4	14	2.97	4.14	
5	14	3.251	4.07	
6	14	2.89	4.22	
7	14	3.523	4.22	
8	14	3.285	4.11	
9	14	3.471	4.08	
10	14	3.160	4.20	
11	14	3.512	4.21	
12	14	3.466	4.08	

Fuente: Elaboración propia.

El Módulo de rotura o resistencia a tracción del hormigón por flexión, es el esfuerzo de tensión en la fibra extrema bajo la carga de rotura. Para determinar este módulo se usa el ensayo de carga del tercio central (AASHTO T97, ASTM C78). Las expresiones que correlacionan la resistencia a compresión a los 28 días con el módulo de ruptura ofrecen valores muy dispersos con relación a los valores obtenidos mediante el ensayo nombrado, razón por la cual se dificulta la elección de un valor de resistencia cilíndrica para la obra.

En la práctica del diseño de pavimentos se ha generalizado el empleo de valores promedio de  $S'_c = 4.2 \text{ MPa}$ , el cual será adoptado en el presente diseño. El módulo de rotura deberá verificarse durante la construcción mediante ensayos de vigas a la flexión. Las dosificaciones de hormigón corresponden en forma aproximada a este valor.

### 3.2.2.3 Características de la subrasante

La subrasante natural a lo largo del tramo proyectado, presentándose suelos de tipo A6.

Las características del suelo son:

IP = 25, LL = 80

Tamiz	% que pasa
3 ½"	100
2"	99.8
1½"	99.5
1"	99
¾"	98.4
½"	97.4
3/8"	96.4
Nº4	95
Nº10	90.2
Nº40	82.4
Nº80	73.5
Nº200	63.2

### 3.2.2.4 Características de los materiales de subbase

Capa Sub Base con CBR mínimo de 40 % (valor definido en base a los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para esta etapa del proyecto). Se ha previsto que esta capa estará conformada por materiales naturales que provienen de yacimientos existentes en la zona.

El material granular de características parecidas a la subbase del pavimento flexible. Su propósito es el siguiente:

Proveer una superficie estable, uniforme y de soporte permanente.

Incrementar el módulo de reacción (k)

Prevenir el bombeo del material de subrasante por el material fino en las juntas, grietas y bordes de la losa.

Características del suelo:

IP = 1, LL = 10

Tamiz	% que pasa
3 ½"	97.6
2"	91.6
1½"	85.8
1"	78.8
¾"	72.7
½"	63.1
3/8"	57.2
Nº4	44.7
Nº10	33.8
Nº40	20
Nº80	12.9
Nº200	8.7

### 3.2.2.5 Espesores del pavimento rígido<sup>4</sup>

#### RESULTADO DE LOS ESPESORES DEL PAVIMENTO RÍGIDO Tramo Palos Blancos

	carpeta asfáltica (mm)
Losa de Hormigón	200
Subbase granular	150

---

<sup>4</sup> Aporte de diseño de espesores de pavimento vía Palos Blancos.

### 3.3 DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO AASHTO 2015

Se realizará el diseño de Pavimento Rígido (PCC) JPCP

**Pavimento rígido JPCP.-** En este tipo de pavimento PCC, las juntas transversales están relativamente cerca para minimizar el fisuramiento transversal por gradiente térmico y gradiente de esfuerzos de retracción por secado. Este pavimento no contiene acero distribuido para controlar el fisuramiento aleatorio y puede o no contener dispositivos de transferencia de carga en la junta transversal (por ejemplo, dovelas, o pasadores o barras de transferencia). El JPCP puede tener juntas longitudinales unidas o no unidas. Sin embargo, la mayoría de las secciones de prueba incluidas en el proceso de calibración global tenían juntas longitudinales unidas. El efecto de las juntas longitudinales unidas o no, tendría que ser definido y considerado a lo largo del proceso de calibración local. La base (capa directamente debajo de la losa PCC) y la capa de subbase pueden consistir de una amplia variedad de agregados no ligados, estabilización con asfalto, estabilización con cemento, concreto de baja resistencia, concreto triturado, estabilización con cal, pavimento de asfalto reciclado y otros materiales. Las capas de base pueden ser granulometrías densas o capas permeables de drenaje.

#### 3.3.1 Parámetros para el diseño

##### Criterio de diseño y nivel de confiabilidad

Deterioro	Valor límite	Nivel de confiabilidad
Escalonamiento promedio de junta	0.20 in	80 %
Fisuramiento transversal de losa	15 %	80 %
Regularidad superficial inicial (IRI)	42 in/mi	80 %
Regularidad superficial final (IRI)	200 in/mi	80 %

##### Datos de configuración

Características del Proyecto	Valor	Características de la sección	Valor
Velocidad operacional (km/h)	60	Espesor de la losa de PCC (cm)	20
Periodo de diseño (años)	20	Espesor Sub-base (cm)	15

### Propiedades de losa PCC

Valores por nivel 3			
Descripción	Valor	Descripción	Valor
Resistencia a flexión, 28 días	4.2 Mpa.	Coefficiente de Poisson, ( $\mu$ )	0.20
Peso unitario del concreto, ( $\rho$ )	145 pcf.	Conductividad térmica	0.67
Coefficiente de expansión térmica	5.8 E-4 /°F	Capacidad calorífica	0.28
Contenido de material cementante	576 lb/yd <sup>3</sup>	Relación agua – cemento	0.48
Retracción reversible	50 %	Tiempo para el 50 % de retracción	35 días

### Propiedades de la capa subbase

Valores por nivel 3			
Descripción	Valor	Descripción	Valor
CBR	40 %	Coefficiente de Poisson, ( $\mu$ )	0.35
Ø para el 60 % de distribución granulométrica, ( $D_{60}$ )	10.82 mm	Pasa la malla n°200, ( $P_{200}$ )	8.7 %
Mr	27083 psi	Índice plástico, ( $IP$ )	1

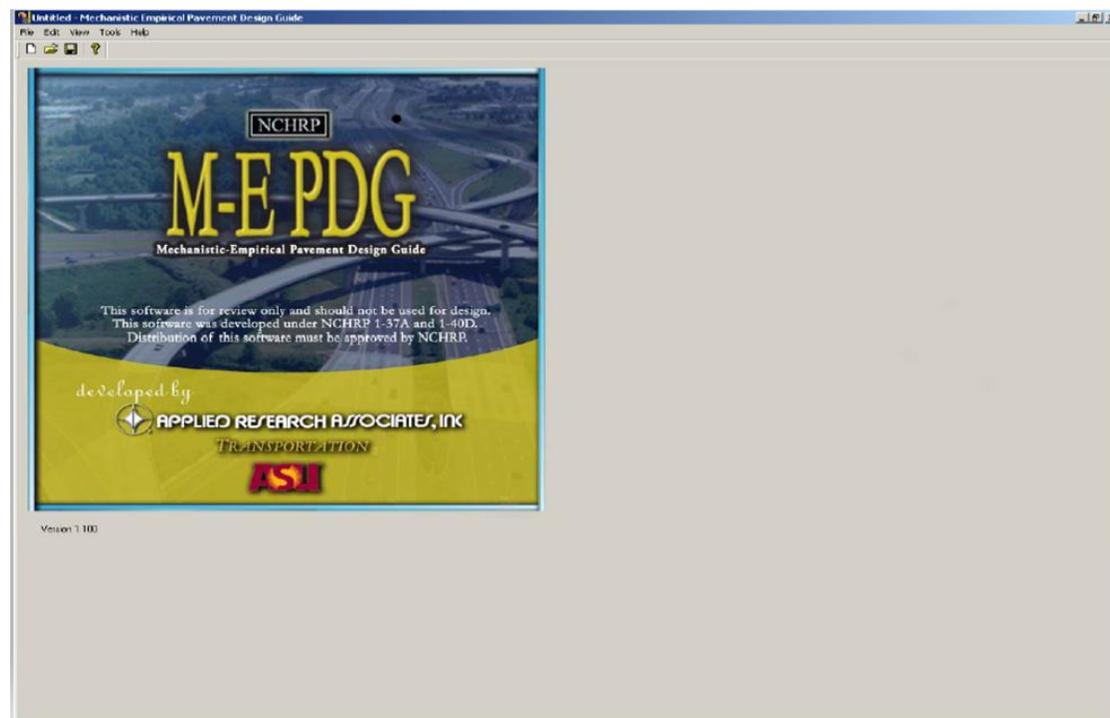
### Propiedades de la capa subrasante

Valores por nivel 3	
Descripción	Valor
CBR	3.16 %
Pasa la malla n°200, ( $P_{200}$ )	63.2 %
Ø para el 60 % de distribución granulométrica, ( $D_{60}$ )	0.05 mm
Índice plástico, ( $IP$ )	25 %

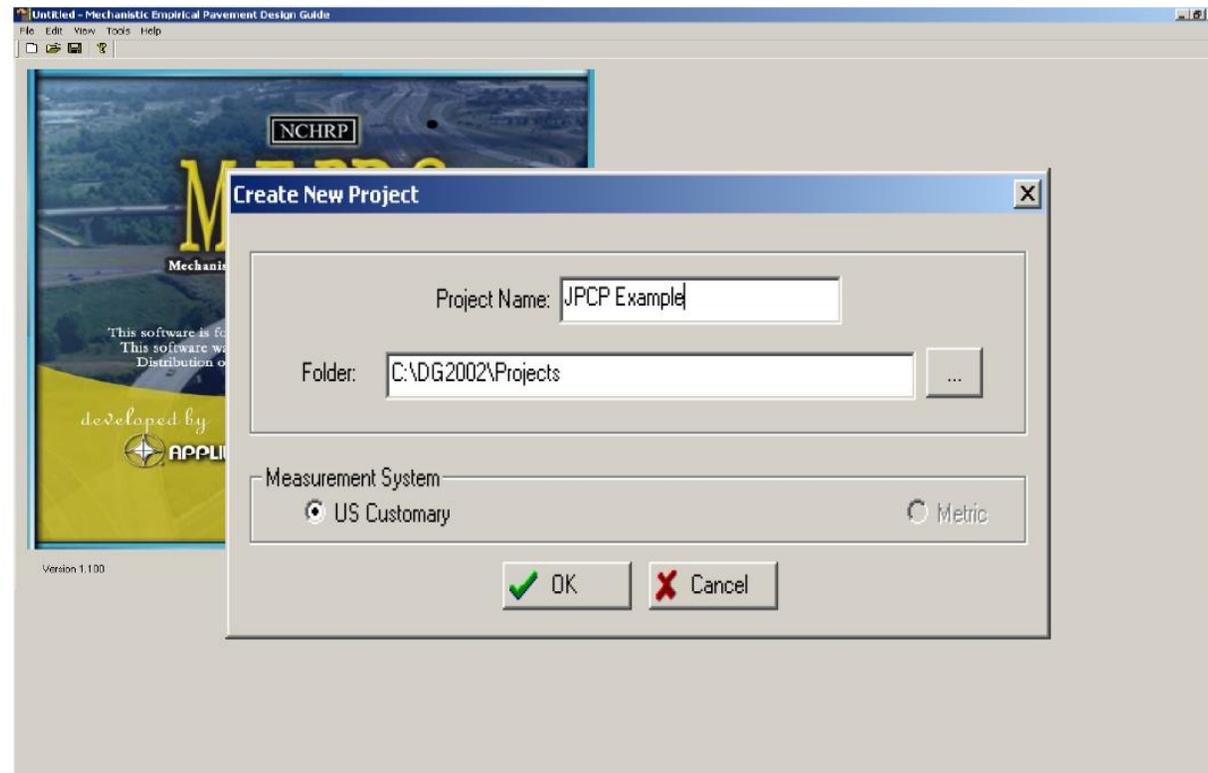
### 3.3.2 Programa informático de AASHTO 2015.-

# **DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO MENDIANTE SOFTWARE AASHTO 2015**

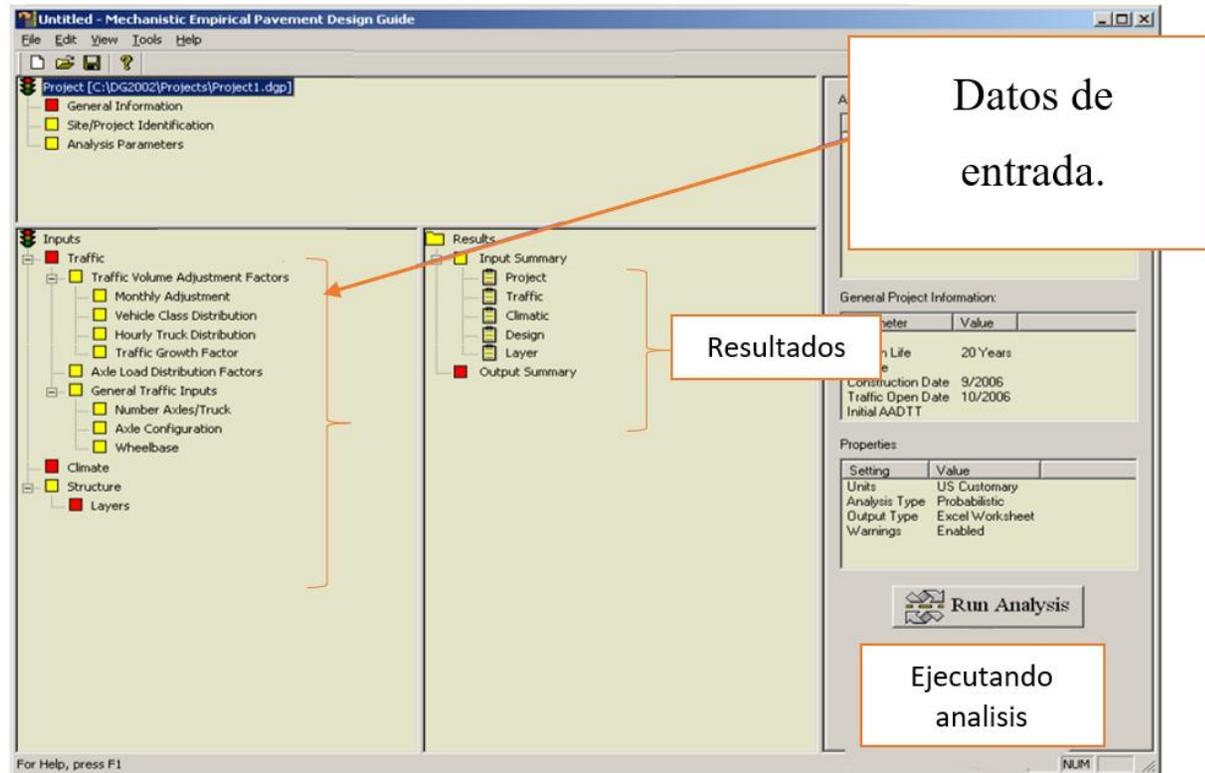
**Se ingresa al software y nos muestra la pantalla principal.**



**Se crea un nuevo proyecto, nuestro ejemplo es un pavimento rígido JPCP.**



**Ingresamos a la ventana principal del software,  
donde se ingresa los datos de entrada.**



# Información general

**General Information**

Project Name: JPCP Example

Description:

Design Life (years): 20

Base/Subgrade Construction Month: Year:

Pavement Construction Month: January Year: 2019

Traffic open month: March Year: 2019

Type of Design

New Pavement

Flexible Pavement  Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)  Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

Restoration

Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)

Overlay

Asphalt Concrete Overlay  PCC Overlay

OK Cancel

Fecha de construcción  
Fecha de tráfico abierto

# Identificación del proyecto

The image shows a software dialog box titled "Site/Project Identification". It contains several input fields and dropdown menus. The "Location" field is filled with "El Paso". The "Project ID" field is filled with "JPCP Design Example". The "Section ID" field is filled with "JPCP 1". The "Date" field is empty. The "Station/milepost format" dropdown is set to "Feet: 00 + 00". The "Station/milepost begin" field is filled with "00 + 00". The "Station/milepost end" field is filled with "00 + 00". The "Traffic direction" dropdown is set to "North bound". At the bottom, there are "OK" and "Cancel" buttons.

Location:	El Paso
Project ID:	JPCP Design Example
Section ID:	JPCP 1
Date:	
Station/milepost format:	Feet: 00 + 00
Station/milepost begin:	00 + 00
Station/milepost end:	00 + 00
Traffic direction:	North bound

OK Cancel

# Parámetros de análisis

Project Name: JPCP Example

Initial IRI (in/mi) 42

Performance Criteria

Rigid Pavement  Flexible Pavement

	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mi)	200	90
<input checked="" type="checkbox"/> Transverse Cracking (% slabs cracked)	15	90
<input checked="" type="checkbox"/> Mean Joint Faulting (in)	.2	90
<input type="checkbox"/> CRCP Existing Punchouts		
<input type="checkbox"/> Maximum CRCP Crack Wid		
<input type="checkbox"/> Minimum Crack Load Trans		
<input type="checkbox"/> Minimum Crack Spacing (ft)		
<input type="checkbox"/> Maximum Crack Spacing (ft)		

Porcentaje del fisuramiento transversal de la losa.

Escalonamiento de la junta.

OK Cancel

# Tráfico

Design Life (years): 20

Opening Date: March, 2019

Annual two-way AADTT: 1045

Number of lanes in design direction: 2

Percent of trucks in design direction (%): 50.0

Percent of trucks in design lane (%): 90.0

Operational speed (mph): 60

Traffic Volume Adjustment:  Edit

Axle load distribution factor:  Edit

General Traffic Inputs:  Edit

Traffic Growth: Compound, 4%

OK Cancel

Transito promedio anual

% de camiones en la dirección de diseño

% de camiones en el carril de diseño

# Factor de volumen ajustado mensual – por defecto nivel 3

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment |  Vehicle Class Distribution |  Hourly Distribution |  Traffic Growth Factors

Load Monthly Adjustment Factors (MAF)

Level 1: Site Specific - MAF

Level 2: Regional - MAF

Level 3: Default MAF

Monthly Adjustment Factors

Month	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8
January	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
February	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
March	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
April	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
May	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
June	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
July	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
August	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
September	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
October	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
November	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

# Distribución de clase de vehículo – por defecto nivel 3

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment    Vehicle Class Distribution    Hourly Distribution    Traffic Growth Factors

AADTT distribution by vehicle class

Class 4	<input type="text" value="2.4"/>	
Class 5	<input type="text" value="14.1"/>	
Class 6	<input type="text" value="4.5"/>	
Class 7	<input type="text" value="0.7"/>	
Class 8	<input type="text" value="7.9"/>	
Class 9	<input type="text" value="66.3"/>	
Class 10	<input type="text" value="1.4"/>	
Class 11	<input type="text" value="2.2"/>	
Class 12	<input type="text" value="0.3"/>	
Class 13	<input type="text" value="0.2"/>	
Total	<input type="text" value="100.0"/>	

Note: AADTT distribution must total 100%.

Load Default Distribution

Level 1: Site Specific Distribution

Level 2: Regional Distribution

Level 3: Default Distribution



OK Cancel

**Load Default AADTT** [?] [X]

Select general category:  AADTT distribution for the selected General Category:

\* = recommended value

	*	TTC	Bus %	Multi-Trailer %	Single-trailer and Single-unit(SU) Trucks	Vehicle Class	Percent(%)
<input type="checkbox"/>	*	5	(<2%)	(>10%)	Predominately Single-trailer trucks.	Class 4	2.4
<input type="checkbox"/>	*	8	(<2%)	(>10%)	"High percentage of single-trailer truck with some single	Class 5	14.1
<input type="checkbox"/>	*	11	(<2%)	(>10%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-tr	Class 6	4.5
<input type="checkbox"/>	*	13	(<2%)	(>10%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of sing	Class 7	0.7
<input type="checkbox"/>		16	(<2%)	(>10%)	Predominantly single-unit trucks.	Class 8	7.9
<input type="checkbox"/>	*	3	(<2%)	(2 - 10%)	Predominantly single-trailer trucks	Class 9	66.3
<input type="checkbox"/>		7	(<2%)	(2 - 10%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-tr	Class 10	1.4
<input type="checkbox"/>		10	(<2%)	(2 - 10%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of sing	Class 11	2.2
<input type="checkbox"/>		15	(<2%)	(2 - 10%)	Predominantly single-unit trucks.	Class 12	0.3
<input type="checkbox"/>	*	1	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-trailer trucks		
<input checked="" type="checkbox"/>	*	2	(>2%)	(<2%)	"Predominantly single-trailer trucks with a low percenta		
<input type="checkbox"/>	*	4	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-trailer trucks with a low to modera		
<input type="checkbox"/>		6	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-ur		
<input type="checkbox"/>		9	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of sing		
<input type="checkbox"/>		12	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-ur		
<input type="checkbox"/>		14	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-unit trucks		
<input type="checkbox"/>		17	(>25%)	(<2%)	Mixed truck traffic with about equal si		

OK Cancel

Se selecciono el grupo TTC 2

# Distribución horaria

**Traffic Volume Adjustment Factors** [?] [X]

Monthly Adjustment    Vehicle Class Distribution    Hourly Distribution    Traffic Growth Factors

Hourly truck traffic distribution by period beginning:

Midnight	<input type="text" value="2.3"/>	Noon	<input type="text" value="5.9"/>
1:00 am	<input type="text" value="2.3"/>	1:00 pm	<input type="text" value="5.9"/>
2:00 am	<input type="text" value="2.3"/>	2:00 pm	<input type="text" value="5.9"/>
3:00 am	<input type="text" value="2.3"/>	3:00 pm	<input type="text" value="5.9"/>
4:00 am	<input type="text" value="2.3"/>	4:00 pm	<input type="text" value="4.6"/>
5:00 am	<input type="text" value="2.3"/>	5:00 pm	<input type="text" value="4.6"/>
6:00 am	<input type="text" value="5.0"/>	6:00 pm	<input type="text" value="4.6"/>
7:00 am	<input type="text" value="5.0"/>	7:00 pm	<input type="text" value="4.6"/>
8:00 am	<input type="text" value="5.0"/>	8:00 pm	<input type="text" value="3.1"/>
9:00 am	<input type="text" value="5.0"/>	9:00 pm	<input type="text" value="3.1"/>
10:00 am	<input type="text" value="5.9"/>	10:00 pm	<input type="text" value="3.1"/>
11:00 am	<input type="text" value="5.9"/>	11:00 pm	<input type="text" value="3.1"/>

Note: The hourly distribution must total 100%

Total:

OK    Cancel

# Factor de ajuste del volumen de tráfico

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment    Vehicle Class Distribution    Hourly Distribution    Traffic Growth Factors

Opening Date:

Design Life (years):

Vehicle-class specific traffic growth

AADTT:

% Traffic Design Direction:

% Traffic Design Lane:

Default Growth Function

No Growth

Linear Growth

Compound growth

Default growth rate (%)

View Growth Plots

factors are needed to view the effects of traffic growth.

Tasa de crecimiento de tráfico compuesto

# Entradas de tráfico general

The image shows a software dialog box titled "General Traffic Inputs". It contains several input fields and checkboxes. Two callout boxes with orange borders and arrows point to specific fields: one points to the "Average axle width (edge-to-edge) outside dimensions,ft:" field with the value "10", and the other points to the "Dual tire spacing (in):" field with the value "12".

**General Traffic Inputs**

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking): 18

Traffic wander standard deviation (in): 10

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width) 12

Number Axles/Truck  Axle Con

Average axle width (edge-to-edge) outside dimensions,ft): 10

Dual tire spacing (in): 12

Tire Pressure (psi) 120

Axle Spacing (in)

Tandem axle: 51.6

Tridem axle: 49.2

Quad axle: 49.2

OK Cancel

Separacion entre neumaticos

Ancho medio del eje, borde a borde

# Distancia entre ejes

**General Traffic Inputs** [?] [X]

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking):

Traffic wander standard deviation (in):

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width)

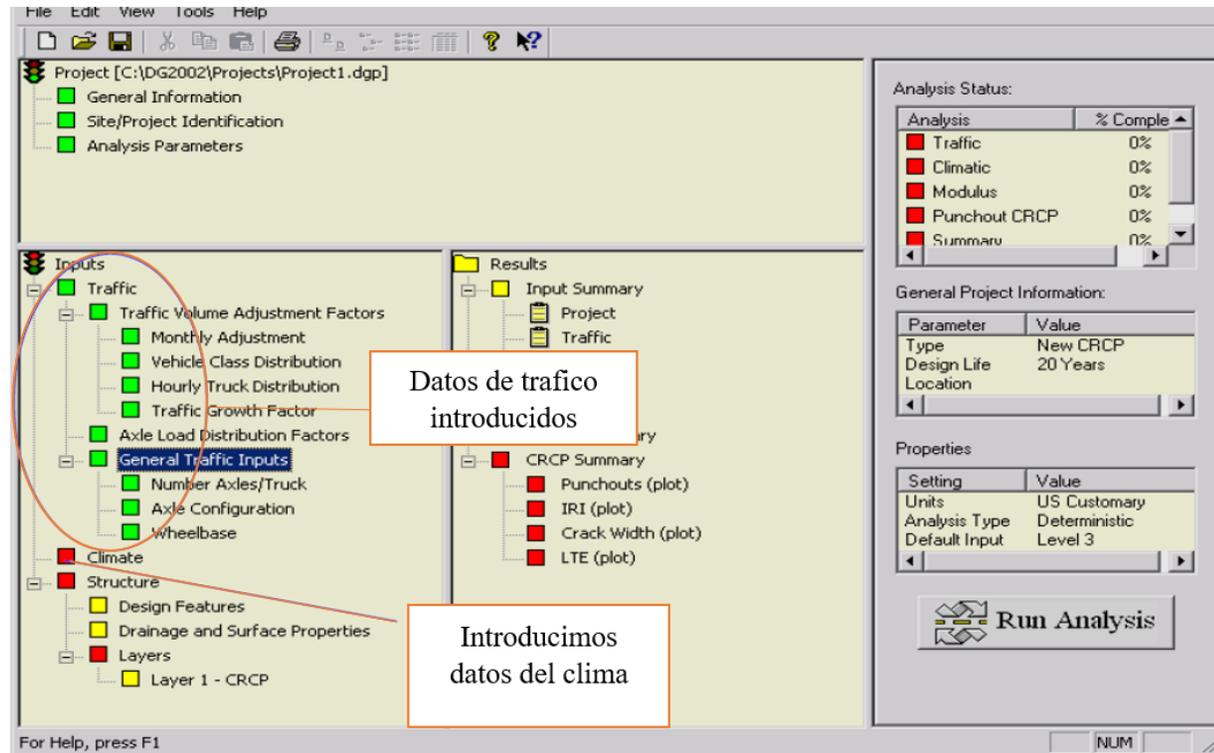
Number Axles/Truck |  Axle Configuration |  Wheelbase

Wheelbase distribution information for JPCP top-down cracking. The wheelbase refers to the spacing between the steering and the first device axle of the truck-tractors or heavy single units.

	Short	Medium	Long
Average Axle Spacing (ft)	<input type="text" value="12"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="18"/>
Percent of trucks (%)	<input type="text" value="2.0"/>	<input type="text" value="20.0"/>	<input type="text" value="78.0"/>

OK  Cancel

# Pantalla principal del software, verificamos datos introducidos



# Se genera el archivo del clima

**Environment/Climatic** [?] [X]

Current climatic data file: J:\MEPDG-MinPaver\MEPDG-PRJCTS\Project1\Climatic Data\El Paso.icm

Import previously generated climatic data file.

Generate new climatic data file

Latitude (degrees.minutes)

Longitude (degrees.minutes)

Elevation (ft)

Seasonal

Depth of water table (ft)	
Annual average	55

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

# Selección de estación para el clima

Environment/Climatic

Climatic data for a specific weather station.  
 Interpolate climatic data for given location.

Latitude (degrees.minutes): 31.49  
Longitude (degrees.minutes): -106.23  
Elevation (ft): 3945

Seasonal

Depth of water table (ft)	
Annual average	

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

Select weather station

- DALHART, TX
- DALLAS, TX
- DALLAS, TX
- DALLAS-FORT WORTH, TX
- DEL RIO, TX
- DENTON, TX
- EL PASO, TX**
- FORT STOCKTON, TX
- FORT WORTH, TX
- FORT WORTH, TX
- GALVESTON, TX
- GUADALUPE PASS, TX

Select Station  
Cancel

Station Location:  
EL PASO INTERNATIONAL ARPT  
Months of available data:116  
Months missing in file:0

# Introduciendo capa de concreto de espesor 8”

Structure

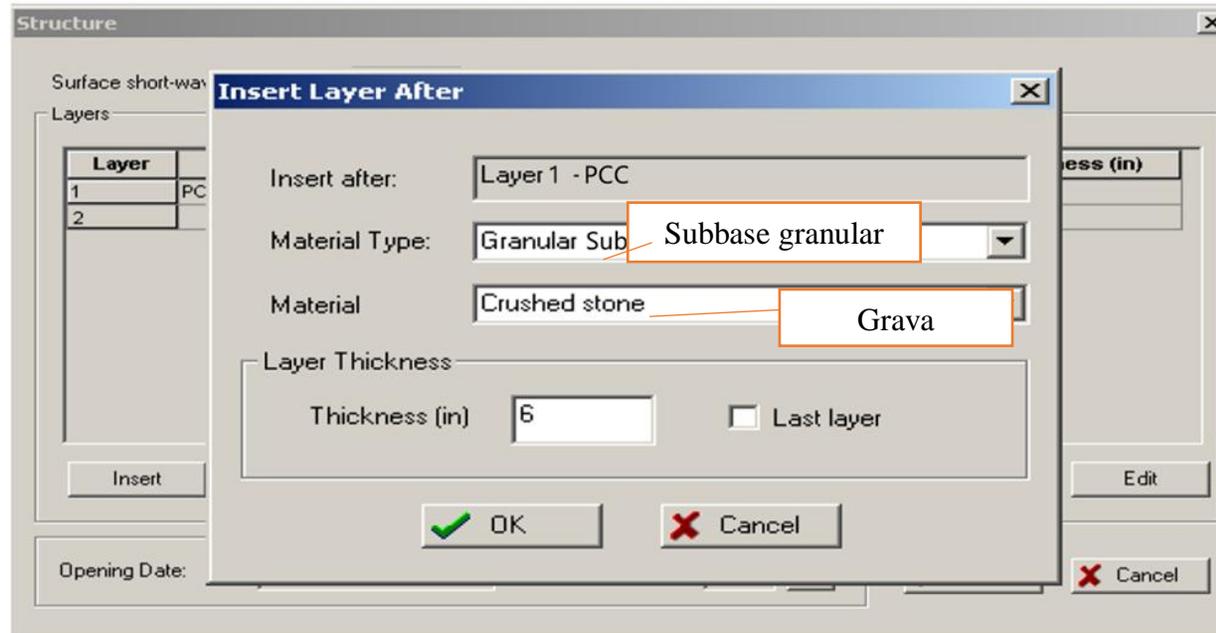
Surface short-wave absorptivity:

Layers

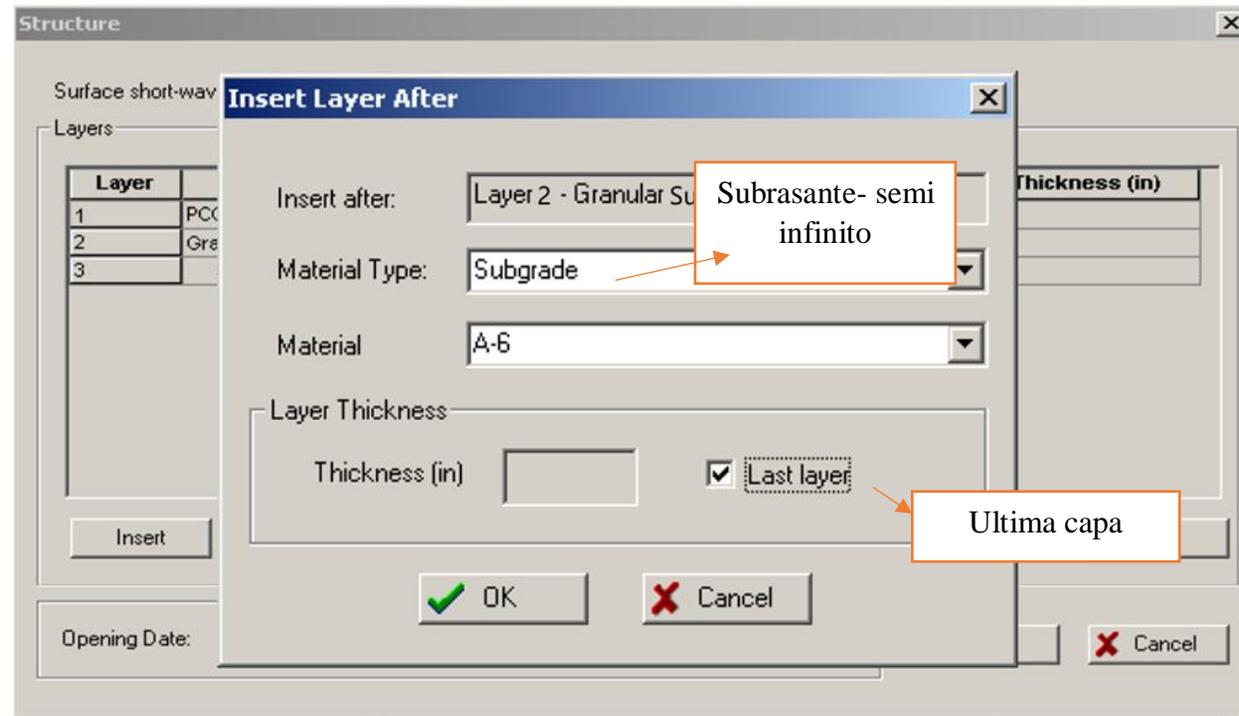
Layer	Type	Material	Thickness (in)
1	PCC	JPCP	8.0

Opening Date:  Design Life (years):

# Introduciendo capa subbase de espesor 6”



# Introduciendo capa subrasante



# Estructura del pavimento

Structure ✕

Surface short-wave absorptivity:

Layers

Layer	Type	Material	Thickness (in)
1	PCC	JPCP	8.0
2	Granular Subbase	Crushed stone	6.0
3	Subgrade	A-6	Semi-infinite

Opening Date:  Design Life (years):

# Propiedades de material de concreto

PCC Material Properties - Layer #1

Thermal |  Mix |  Strength

General Properties

PCC material: JPCP

Layer thickness (in): 8

Unit weight (pcf): 145

Poisson's ratio: 0.20

Thermal Properties

Coefficient of thermal expansion (per F° x 10<sup>-6</sup>): 5.8

Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F°): 0.67

Heat capacity (BTU/lb-F°): 0.28

OK Cancel

Propiedades generales

Propiedades termicas

The image shows a software dialog box titled "PCC Material Properties - Layer #1". It has three tabs: "Thermal", "Mix", and "Strength", all of which are selected. The dialog is divided into two main sections: "General Properties" and "Thermal Properties". In the "General Properties" section, there is a dropdown menu for "PCC material" set to "JPCP", and three input fields: "Layer thickness (in)" with the value "8", "Unit weight (pcf)" with "145", and "Poisson's ratio" with "0.20". In the "Thermal Properties" section, there are three input fields: "Coefficient of thermal expansion (per F° x 10<sup>-6</sup>)" with "5.8", "Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F°)" with "0.67", and "Heat capacity (BTU/lb-F°)" with "0.28". At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons. Two orange callout boxes with white text are present: one labeled "Propiedades generales" pointing to the "Layer thickness", "Unit weight", and "Poisson's ratio" fields; and another labeled "Propiedades termicas" pointing to the "Coefficient of thermal expansion", "Thermal conductivity", and "Heat capacity" fields.

# Propiedades de material de concreto

**PCC Material Properties - Layer #1**

Thermal  Mix  Strength

Cement type: Type I

Cementitious material content (lb/yd<sup>3</sup>): 576

Water/cement ratio: 0.48

Aggregate type: Dolomite

PCC zero-stress temperature (F°): 114

Ultimate shrinkage at 40% R.H (microstrain): 545

Reversible shrinkage (% of ultimate shrinkage): 50

Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days): 35

Curing method: Curing compound

OK Cancel

# Propiedades de material subbase

Unbound Material:  Thickness(in):   Last layer

Strength Properties  ICM

Input Level  
 Level 1:  
 Level 2:  
 Level 3:

Poisson's ratio:   
Coefficient of lateral pressure,  $K_0$ :

Analysis Type  
 ICM Calculated Modulus  
 ICM Inputs

User Input Modulus  
 Seasonal input (design value)  
 Representative value (design value)

Material Property  
 Modulus (psi)  
 CBR  
 R-Value  
 Layer Coefficient -  $a_i$   
 Penetration DCP (in)  
 Based upon PI and Gradation

Modulus (input) (psi):

# Propiedades de material subbase

Unbound Layer - Layer #3

Unbound Material:  Thickness(in):   Last layer

Strength Properties  ICM

Range  Mean

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	8.7
#100	
#80	12.9
#60	
#50	
#40	20.0
#30	
#20	
#16	
#10	33.8
#8	
#4	44.7
3/8"	57.2
1/2"	63.1
3/4"	72.7
1"	78.8
1 1/2"	85.8
2"	91.6
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	97.6

Plasticity Index (PI)

Liquid Limit (LL)

Compacted Layer  No

Index Properties from Sieve Analysis

% Passing #200	8.7
% Passing #40	20.0
% Passing #4	44.7
D10 (mm)	0.1035
D20 (mm)	0.425
D30 (mm)	1.306
D60 (mm)	10.82
D90 (mm)	46.19

User Overridable Index Properties

Maximum Dry Unit Weight(pcf)	<input type="checkbox"/>	127.2
Specific Gravity, Gs	<input type="checkbox"/>	2.70
Sat. Hydraulic Conductivity(ft/hr)	<input type="checkbox"/>	0.051
Optimum gravimetric water content(%)	<input type="checkbox"/>	7.4
Degree of Saturation at Optimum(%)	<input type="checkbox"/>	61.2

User Overridable Soil Water Characteristic Curve

af	<input type="checkbox"/>	7.255
bf	<input type="checkbox"/>	1.333
cf	<input type="checkbox"/>	0.8242
hr	<input type="checkbox"/>	117.4

# Propiedades de material subrasante

Unbound Material:  Thickness(in):   Last layer

Strength Properties  ICM

Input Level:  
 Level 1  
 Level 2  
 Level 3

Poisson's ratio:   
Coefficient of lateral pressure, Ko:

Material Property:  
 Modulus (psi)  
 CBR  
 R-Value  
 Layer Coefficient - ai  
 Penetration DCP (r)  
 Based upon PI and Gradation

Analysis Type:  
 ICM Calculated Modulus  
 ICM Inputs  
User Input Modulus:  
 Seasonal input (design value)  
 Representative value (design value)

AASHTO Classification  
Unified Classification

Modulus (input) (psi):

View Equation Calculate >>

OK Cancel

# Propiedades de material subrasante

Unbound Material: A-6 Thickness(in):   Last layer

Strength Properties  ICM

Range  Mean

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	63.2
#100	
#80	73.5
#60	
#50	
#40	82.4
#30	
#20	
#16	
#10	90.2
#8	
#4	95
3/8"	96.4
1/2"	97.4
3/4"	98.4
1"	99.0
1 1/2"	99.5
2"	99.8
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	100.0

Plasticity Index (PI)	25
Liquid Limit (LL)	80
Compacted Layer	<input type="checkbox"/> No
Index Properties from Sieve Analysis	
% Passing #200	63.2
% Passing #40	0.0
% Passing #4	95.0
D10 (mm)	0.000285
D20 (mm)	0.000812
D30 (mm)	0.002316
D60 (mm)	0.05364
D90 (mm)	1.922
User Overridable Index Properties	
Maximum Dry Unit Weight(pcf)	<input type="checkbox"/> 104.2
Specific Gravity, Gs	<input type="checkbox"/> 2.70
Sat. Hydraulic Conductivity(ft/hr)	<input type="checkbox"/> 5.7e-007
Optimum gravimetric water content(%)	<input type="checkbox"/> 18.9
Degree of Saturation at Optimum(%)	82.9
User Overridable Soil Water Characteristic Curve	
af	<input type="checkbox"/> 123.1
bf	<input type="checkbox"/> 0.59
cf	<input type="checkbox"/> 0.12
hr	<input type="checkbox"/> 500

# Datos completados en el software

Project [C:\Dsg2002\Projects\Project1.dgp]

- General Information
- Site/Project Identification
- Analysis Parameters

Inputs

- Traffic
  - Traffic Volume Adjustment Factors
    - Monthly Adjustment
    - Vehicle Class Distribution
    - Hourly Truck Distribution
    - Traffic Growth Factor
  - Axle Load Distribution Factors
  - General Traffic Inputs
    - Number Axes/Truck
    - Axle Configuration
    - Wheelbase
- Climate
- Structure
  - Design Features
  - Layers
    - Layer 1 - J
    - Layer 2 - G
    - Layer 3 - S

Results

- Input Summary
- Project

Analysis Status:

Analysis	% Complete
Traffic	0%
Climatic	0%
Modulus	0%
Faulting JPCP	0%
Cracking JPCP	0%
Summary	0%

General Project Information:

Parameter	Value
Type	New JPCP
Design Life	20 Years
Climate	C:\Documents and Settings...
Construction Date	9/2006
Traffic Open Date	10/2006
Initial AADTT	1500

Properties

Setting	Value
Units	US Customary
Analysis Type	Probabilistic
Output Type	Excel Worksheet
Warnings	Enabled

Run Analysis

Datos completos de trafico

Datos completos de clima y capas.

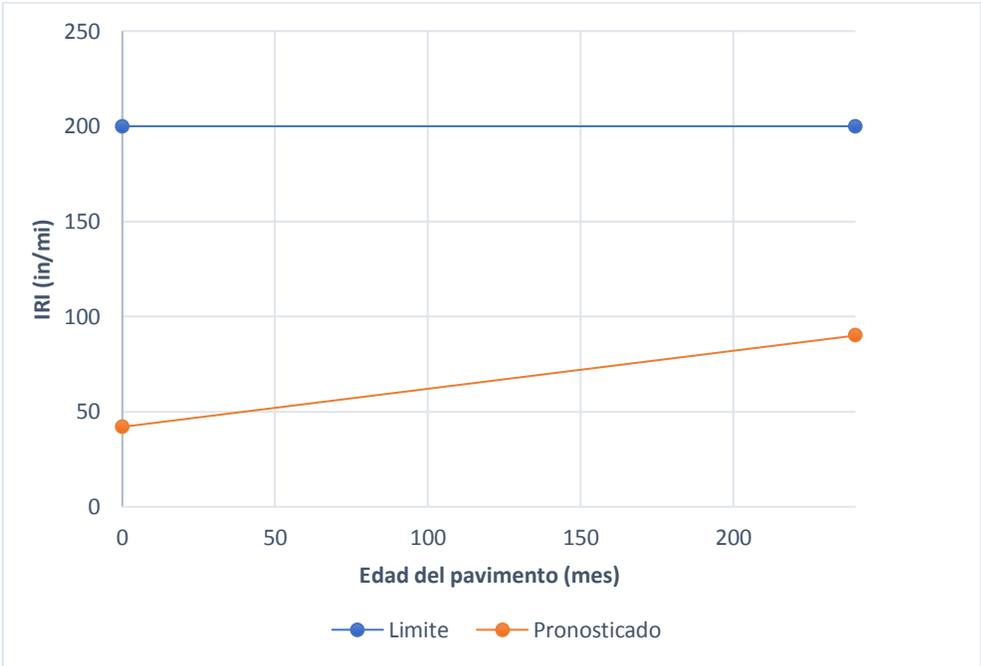
For Help, press F1

NUM SCRL

### 3.3.3 Resultados pronosticados

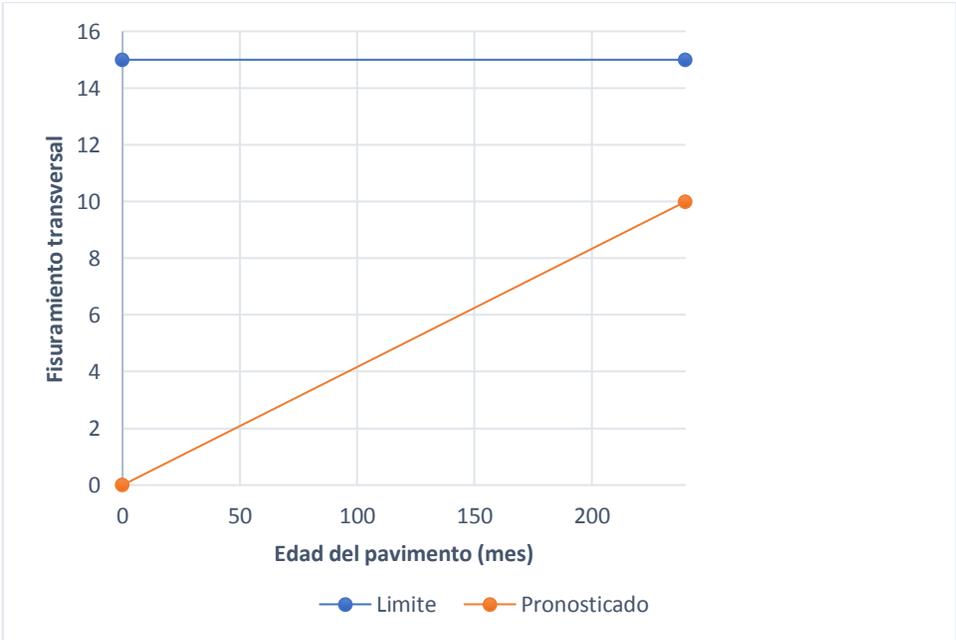
#### 3.3.3.1 IRI

Criterio de rendimiento	Deterioro especificado	Confiabilidad deseada	Deterioro pronosticado	Confiabilidad pronosticada	¿Aceptable?
Terminal IRI (in/mi)	200	80	90	100	cumple



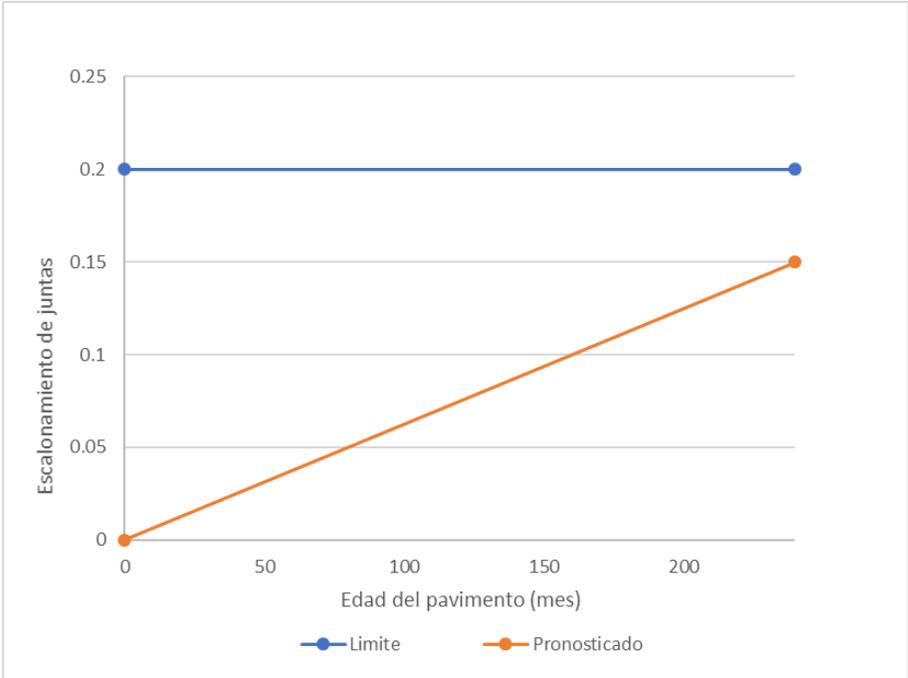
**3.3.3.2 Fisuramiento transversal**

<b>Criterio de rendimiento</b>	<b>Deterioro especificado</b>	<b>Confiabilidad deseada</b>	<b>Deterioro pronosticado</b>	<b>Confiabilidad pronosticada</b>	<b>¿Aceptable?</b>
Fisuramiento Transversal (% de losas fisuradas)	15	80	10	99.74	cumple



**3.3.3.3 Escalonamiento de juntas (in)**

<b>Criterio de rendimiento</b>	<b>Deterioro especificado</b>	<b>Confiabilidad deseada</b>	<b>Deterioro pronosticado</b>	<b>Confiabilidad pronosticada</b>	<b>¿Aceptable?</b>
Escalonamiento Promedio de juntas (in)	0.20	80	0.15	99.99	cumple



### 3.4 Análisis del software AASHTO 2015

#### ✓ Estudio de la zona del tramo de Palos Blancos

Se ha realizado un estudio al tramo de Palos Blancos y se ha logrado identificar algunos daños en el pavimento.





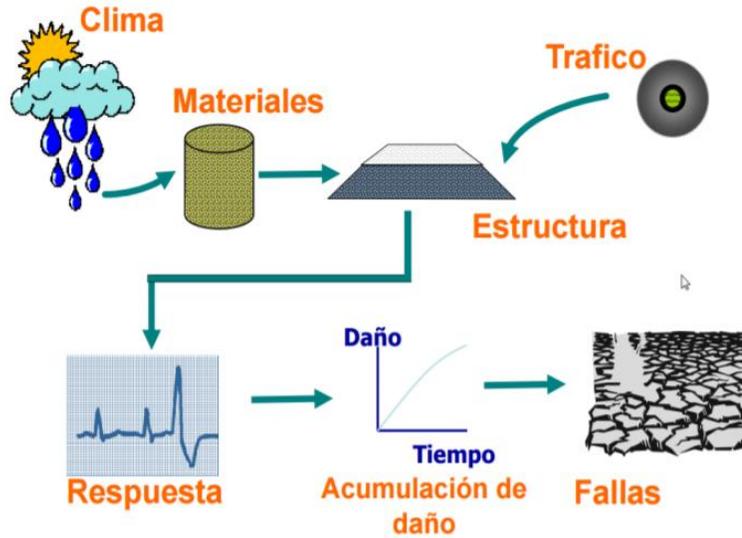
Se ha identificado que las juntas transversales y longitudinales están dañadas, presentan erupciones de su recubrimiento en horarios de 12pm a 4pm esto debido a las fuertes temperaturas que se presentan en la zona, también están siendo afectadas por material suelto (arena y gravilla).

Las losas presentan pequeñas perforaciones en su superficie de manera muy continuas.

El pavimento tiene 12 meses de vida y presenta daños que el programa predice para más tiempo de vida, esto muestra la ventaja del software porque usándolo con factores calibrados a la zona podemos usar los materiales correctos para la construcción del pavimento, porque el software toma en cuenta la estación climatológica que contiene datos del clima, temperatura, humedad, nubosidad, precipitación. Así podemos reducir las deformaciones causadas en el pavimento y mejorar nuestras carreteras, también debemos realizar un estudio de laboratorio más complejo de las capas del pavimento.

Las deformaciones encontradas pueden ser causadas por el clima, por materiales de las capas del pavimento o por el tráfico de la zona.

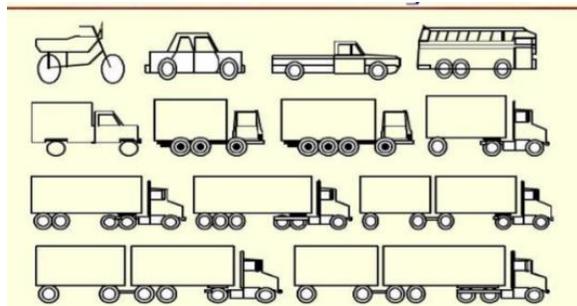
✓ **Análisis del software MEPDG AASHTO 2015 respecto el AASHTO 93**



Para aplicar el diseño de MEPDG AASHTO 2015 en nuestro medio se recomienda lo siguiente:

✓ **Análisis de tráfico**

- Es necesario que calibremos los espectros de carga por eje en nuestro medio y habilitar estaciones de pesaje en las zonas de control de Tarija y Yacuiba para realizar las comparaciones respectivas de los espectros de carga por eje en cada zona y poder estandarizar con mayor confiabilidad los parámetros de tránsito requeridos por el software MEPDG.
- Para el diseño del tramo de estudio se tomó en cuenta vehículos livianos y pesados como los establecidos por la AASHTO 93:



Pero la metodología de MEPDG AASHTO 2015 sólo toma en cuenta vehículos pesados para su análisis del tránsito como los siguientes:



Donde se recomienda generar espectros de carga para cada tipo de eje, los cuales son los siguientes:

### **Eje simple**



### **Eje simple dual**



### Eje tándem



### Eje tridem



- Se recomienda calcular un promedio de la velocidad del tráfico para cada tipo de carga simple, tándem, tridem y quad en la carretera de estudio, luego realizar un promedio para ingresar al software.
- Para realizar el diseño de nuestros pavimentos en nuestro país utilizamos el tránsito promedio diario anual establecido por el método AASHTO 93, pero necesitamos hacer un análisis más completo del tránsito y aforar el tránsito manera diaria y horaria, para tener un cálculo más exacto de tránsito a futuro, ya que es un factor muy importante porque así podemos prevenir deformaciones prematuras en el pavimento.
- Necesitamos adoptar un factor de distribución horaria para la zona en función del gradiente de temperatura a través de la losa del pavimento.
- Se recomienda calibrar un factor de distribución mensual del tránsito para cada

clase de camiones durante todos los esfuerzos de calibración, para cada tipo de carretera.

- Debemos realizar un estudio estadístico de las características de cada clase de vehículo que transita por la zona, para tener un promedio de la clase que predomine en la zona para tener las especificaciones de:

Separación de neumáticos duales

Presión del neumático

Zigzagado lateral de las cargas por eje

- Es muy importante que realicemos un estudio en todo el país que clase de vehículos predomina en las distintas carreteras, para tener una base de datos con mayor información.

#### ✓ **Análisis de clima**

- El modelo climático incluido en el diseño Mecanístico – Empírico es de vital importancia para llevar a cabo una mejor predicción del comportamiento que exhiben las estructuras de pavimentos a lo largo de toda la vida de diseño. El método que utilizamos en nuestro país de diseño de pavimentos se asume generalmente que el clima es estático y no presenta variación en el tiempo. No tener en cuenta esta variabilidad genera que las estructuras en ocasiones fallen de forma prematura. En el diseño ME estas fallas son disminuidas utilizando los criterios de desempeño y confiabilidad, asegurando así que los diseños de pavimentos se desempeñen de manera satisfactoria durante la vida útil.
- El estudio de todos los factores que se incluyen dentro del modelo climático junto al diseño realizado claramente manifiesta que las variables climáticas más importantes dentro del modelo son temperatura y precipitación, haciendo que parámetros como la velocidad del viento, nubosidad, humedad relativa

desempeñen un papel complementario dentro del modelo.

- Al no tener las estaciones climatológicas disponibles todos los factores que se incluyen dentro del modelo de forma horaria como temperatura, precipitación, esto se convierte en una gran limitante para llevar a cabo una calibración precisa, haciendo de esto un trabajo más extenso debido a los patrones de ajuste.
- Generar una base de datos con todos los archivos climáticos que se generen en el futuro teniendo en cuenta las regiones naturales presentes en nuestro país.

✓ **Materiales**

- Debemos tomar en cuenta las propiedades térmicas de la capa de la losa para así poder tener resultados más óptimos.
- Se recomienda poder implementar más equipos de laboratorio de los siguientes ensayos:

Coeficiente de poisson

Conductividad térmica

Capacidad calorífica absorción de la superficie a onda corta

Resistencia a la tensión indirecta

<b>DIFERENCIAS ENTRE LA AASHTO 93 Y MEPDG AASHTO 2015</b>		
<b>PARÁMETRO</b>	<b>MEPDG 2015</b>	<b>AASHTO 93</b>
<b>MODELOS DE PREDICCIÓN</b>		
Fisuramiento transversal en pavimentos rígidos	Si	No
Escalonamiento de Juntas	Si	No
IRI	Si	No
<b>TRÁFICO</b>		
Velocidad de tránsito (tipo de carga)	Si	No
Distribución de tráfico de manera horaria, diaria, mensual.	Si	No
Espectros de carga	Si	No
Análisis de daños por vehículos pesados	Si	No
<b>CLIMA</b>		
Consideración de clima cálido, seco o húmedo.	Si	No
Consideración de la precipitación.	Si	No
Consideración de la humedad	Si	No
<b>CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL</b>		
Niveles jerárquicos de entrada	Si	No
Caracterización del material a utilizar	Si	No
Módulos variables de losa PCC por variación de temperaturas	Si	No

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- ✓ El Método mecánico – empírico de diseño de pavimentos requiere del ingreso de una amplia cantidad de información propia del proyecto, la cual es ingresada en tres niveles de conocimiento de los datos.
- ✓ El ingreso de datos jerarquizados es propio de la metodología mecánico – empírico, con lo cual la metodología se vuelve flexible al momento de obtener los datos necesarios para el análisis de un pavimento, por lo que puede ser usado desde un nivel básico de conocimiento (nivel 3) hasta un nivel avanzado (nivel 1), según la importancia del proyecto y los recursos disponibles.
- ✓ La flexibilidad del ingreso de datos no se restringe a un solo nivel como tal (uso de un nivel determinado para toda la estructura que se está analizando) sino que los datos de entrada disponibles en tres niveles pueden combinarse, esto es posible porque el algoritmo de cálculo no varía con el nivel jerárquico de datos como si lo hace el error estándar asociado a la confiabilidad del diseño. La siguiente tabla muestra las diferentes variables de cálculo y el nivel jerárquico en el cual pueden ser definidos.

<b>LOSA DE PCC</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Nivel jerárquico</b>
Coeficiente de Poisson	1, 3
Coeficiente de expansión Térmica	1, 2, 3
Retracción de PCC	2, 3
Temperatura de Cero Esfuerzo	3
<b>BASE Y SUBBASE</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Nivel jerárquico</b>

Módulo Resiliente	1,2, 3
Coefficiente de Poisson	3
Gravedad Específica	1, 2
Contenido de Óptimo de Humedad	1, 2
Densidad Seca Máxima	1, 2
Permeabilidad Hidráulica Saturada	1, 2
Curva característica Suelo – Agua	1, 2, 3
SUBRASANTE	
Propiedad	Nivel jerárquico
Módulo Resiliente	2, 3
Coefficiente de Poisson	3
Gravedad Específica	2
Contenido de Óptimo de Humedad	2
Densidad Seca Máxima	2
Permeabilidad Hidráulica Saturada	2
Curva característica Suelo – Agua	3
CLIMA	
Propiedad	Nivel jerárquico
Temperatura	1, 2, 3
Precipitación	1, 2, 3
Nivel Freático	1, 2, 3
Humedad Relativa	1, 2, 3
TRÁNSITO	
Propiedad	Nivel jerárquico
Volumen de Tráfico e Información General	1, 2, 3
Ajustes de Volumen de Tráfico	1, 2, 3
Factores de Distribución de Cargas por Eje	1, 2, 3

- ✓ El método consiste básicamente en predecir las respuestas del pavimento a distintos tipos de falla durante su vida útil, esto se realiza a través de tanteos basados en la experiencia del diseñador.
- ✓ Los resultados de predicción de los deterioros fueron óptimos porque nos da una confiabilidad mayor al que elegimos que es 80%.
- ✓ Realizando el cálculo con distintos espesores de la losa de hormigón se pudo identificar el espesor más óptimo para el pavimento es de 25 cm debido a que

reduce significativamente sus deformaciones.

- ✓ El cálculo del escalonamiento de juntas, IRI y porcentaje de fisuras transversales en campo en comparación al resultado obtenido por el software, tienen una variación muy corta esto se debe a factores del clima y tráfico.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- ✓ En futuros trabajos debe orientarse a la posibilidad de calibración local de los modelos propuestos por la MEPDG de AASHTO 2015, o a obtener modelos equivalentes que puedan integrarse al software propuesto.
- ✓ Realizar más pruebas del método Mecánico – Empírico y del software propuesto, con la finalidad de buscar mejoras.
- ✓ Adecuar el software a nuestro medio, las estaciones climatológicas del programa corresponden al país de Estados Unidos.
- ✓ Para un mejor resultado diseñar el pavimento con el nivel de entrada 1.
- ✓ Se recomienda realizar ensayos de laboratorio de todos los datos introducidos y no tomar datos por defecto del programa.