"AÑO DE LA DIVERSIFICACIÓN PRODUCTIVA Y DEL FORTALECIMIENTO DE LA EDUCACIÓN"

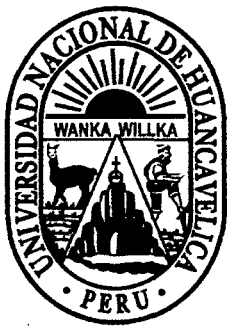
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA

(Creada por Ley Nº. 25265)

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS - CIVIL - AMBIENTAL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL - LIRCAY

V° B°



TESIS

"EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DAÑO PRODUCIDO POR VEHÍCULOS EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA HUANCAVELICA – HUANCAYO, TRAMO PUENTE SANTA ROSA – SACHAPITE - 2014

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
INGENIERÍA VIAL

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. ASTO MANRIQUE, Edwin Alberto
Bach. YAURI LULO, Sandro

ASESOR:

Ing. MEDINA CHAMPE, Dedicación M.

LIRCAY - HUANCAVELICA

2015

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

EN EL PARANINFO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA MINAS - CIVIL, ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL - LIRCAY A LOS TRECE DIAS DEL MES DE ENERO DEL 2015, SIENDO LAS 11.30 A.M, SE INSTALO LOS MIEMBROS DEL JURADO EN BASE A LA RESOLUCION DEL CONSEJO DE FACULTAD N: 021-2015-FIMC-UNH DE FECHA 13 DE ENERO DEL 2015, EN EL CUAL SE RESUELVE: ARTICULO PRIMERO: APROBAR LA HORA Y FECHA PARA LA SUSTENTACION DE TESIS CUYO TITULO DE TESIS ES "EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DAÑO PRODUCIDO POR VEHICULOS EN LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DE LA CARRETERA HUANCAVELICA - HUANCAYO, TRAMO PUENTE SANTA ROSA - SACHAPITE - 2014" SIENDO LOS RESPONSABLES DEL PROYECTO DE INVESTIGACION LOS BACHILLERES: ASTO MANRIQUE, EDWIN ALBERTO Y YAURI LULO SANDRO; MIEMBROS DEL JURADO COMO PRESIDENTE: ING. URIEL NEIRA CALSIN, SECRETARIO: ING. ENRIQUE ROBERTO CAMAC OJEDA, VOCAL: LIC. FRANKLIN SURICHAQUI GUTIERREZ.

CON LA FINALIDAD DE EVALUAR LA SUSTENTACION DE TESIS REFERIDO, INMEDIATAMENTE SE PROCEDIO CON LA INTERVENCION DEL PRESIDENTE DANDO LAS INSTRUCCIONES CORRESPONDIENTES PARA EL INICIO DE LA SUSTENTACION, PRIMERO DANDO EL TIEMPO REGLAMENTARIO DE TREINTA MINUTOS DE SUSTENTACION, SEGUIDAMENTE TERMINADA LA SUSTENTACION SE PROCEDIO A LA FORMULACION DE PREGUNTAS PERTINENTES, LOS CUALES FUERON ABSUELTOS POR LOS TESISTAS.

LOS MIEMBROS DEL JURADO DESPUES DE UN INTENSO DEBATE SE RESUELVE: APROBAR LA SUSTENTACION DE TESIS POR UNANIMIDAD. SIENDO LAS 12.30 DEL DIA TRECE DE ENERO DEL AÑO DOS MIL QUINCE, EN SEÑAL DE CONFORMIDAD FIRMAN AL PIE DEL PRESENTE.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
CERTIFICO: QUE LA PRESENTE ES COPIA FIEL DE LA ORIGINAL QUE TENGO A LA VISTA
HUANCAVELICA
Abog. Alfonso ... del Hernández López
FUNCIONARIO FEDATARIO
26 ENE. 2019

ING. ENRIQUE CAMAC OJEDA
SECRETARIO

ING. URIEL NEIRA CALSIN
PRESIDENTE

Lic. Franklin Surichaqui G.
VOCAL

A nuestro señor, por estar conmigo en cada paso que doy. A mis padres por su cariño y abnegado sacrificio y apoyo incondicional en todo momento de mi vida. A mi hija que e s la fuente de mi inspiración, mi sacrificio y mi entrega.

Edwin Alberto Asto

Agradecer hoy y siempre a mi familia por el esfuerzo realizado por ellos. El apoyo en mis estudios, de ser así no hubiese sido posible. A mis padres y demás familiares ya que me brindan el apoyo, la alegría y me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

Sandro Yauri

AGRADECIMIENTO

A dios por darnos la fuerza y voluntad para seguir avanzando hacia nuestros objetivos y nuestros logros.

A la Universidad Nacional de Huancavelica, Escuela Académica profesional de Ingeniería Civil.

A los docentes por sus enseñanzas que nos brindaron durante los años de estudio en nuestra Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil - Huancavelica.

A nuestros padres y hermanos un agradecimiento muy especial por la paciencia y el ánimo recibido.

A todos ellos muchas gracias.

Los tesistas

RESUMEN

La presente investigación está orientada al cálculo de esfuerzos a diferentes profundidades; Existen diferentes tipos de vehículos los cuales aportan daños a la estructura del pavimento según su peso y presión de inflado de sus neumáticos; para el eje unitario su daño es igual a uno sobre la superficie como a lo largo de la vertical, a diferencia de los otros ejes vehiculares, cuyos daños varían de acuerdo a la profundidad de la estructura del pavimento.

Es aquí donde se recurre a la teoría de "Boussinesq", para llegar al cálculo de esfuerzos de acuerdo a diferentes profundidades, y con esto obtener el coeficiente de daño producido por vehículos pesados.

ABSTRACT

This research is aimed at calculating efforts at different depths; There are different types of vehicles which bring damage to the pavement structure according to weight and pressure of your tires inflated; for its damage axis unit is equal to one on the surface and along the vertical, unlike the other vehicle axle, whose damage vary according to the depth of the pavement structure.

This is where it draws on the theory of "Boussinesq" to get to the calculation of forces according to different depths, and thereby obtain the coefficient of damage from heavy vehicles.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de diseño de pavimentos flexibles, basado en experiencias Norteamericanas (AASHO 1993), han sido desarrolladas con pruebas en pista circular y de tramos experimentales, tal método considera para efectos de diseño un "Eje Unitario" o "Eje Equivalente" con un peso de 8200 Kg y una presión de inflado de 5.8 Kg/cm2 (para el caso de autopistas) dicho eje aporta un daño a una estructura de pavimento con un valor unitario.

Existen diferentes tipos de vehículos los cuales aportan daños a la estructura del pavimento según su peso y presión de inflado de sus neumáticos; para el eje unitario su daño es igual a uno sobre la superficie como a lo largo de la vertical, a diferencia de los otros ejes vehiculares, cuyos daños varían de acuerdo a la profundidad de la estructura del pavimento. Es aquí donde se recurre a la teoría de "Boussinesq", para llegar al cálculo de esfuerzos de acuerdo a diferentes profundidades, y con esto obtener el coeficiente de daño producido por vehículos pesados.

Los coeficientes mencionados deben ser parámetros en el diseño de pavimentos flexibles; contando con la solicitación de carga a la que estará sometida cierta estructura de pavimento, la cual surge de un Índice Medio Diario Anual (IMDA) y su correspondiente clasificación vehicular.

ÍNDICE

DEDICATORIA ii
AGRADECIMIENTO iii
RESUMEN iv
ABSTRACT v
INTRODUCCIÓN vi
ÍNDICE vii
CAPITULO I: PROBLEMA 9
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 9
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 10
1.3. OBJETIVOS 10
1.3.1. Objetivo General 10
1.3.2. Objetivos Específicos 10
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 11
1.4.1. Justificación legal. 11
1.4.2. Justificación teórica. 11
1.4.3. Justificación técnica. 11
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO 12
2.1 ANTECEDENTES 12
2.2 BASES TEÓRICAS - CONCEPTUALES 13
2.2.1 Definición y Clasificación de Pavimentos. 13
2.2.2 Estructura Básica del Pavimento Flexible. 15
2.2.3 Funciones de las distintas capas de la estructura del pavimento. 16
2.2.4 Factores que influyen en el diseño de pavimentos flexibles 19
2.2.5 Teoría de Boussinesq para el cálculo de esfuerzos 26
2.2.6 Consideraciones de tráfico y vehículos 30
2.2.7 Coeficiente de daño 32
2.2.8 Método de diseño del Instituto de Ingeniería para el cálculo del coeficiente de daño 33
2.2.9 Datos del Expediente Técnico de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo Puente Santa Rosa - Sachapite 39
2.2.10 Consideraciones para el cálculo de coeficiente de daño 41
2.3 HIPÓTESIS 41

2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 41
2.5 VARIABLES DE ESTUDIO 42
2.5.1. Variable Independiente. 42
2.5.2. Variables Dependientes 43
2.5.3. Variables Intervinientes 43
2.6 DEFINICIÓN OPERATIVA DE VARIABLE E INDICADORES 43
2.6.1. Variable independiente. 43
2.6.2. Variables Dependientes 43
CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 44
3.1 ÁMBITO DE ESTUDIO 44
3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN 44
3.3 NIVEL DE INVESTIGACIÓN 44
3.4 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN 45
3.5 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 45
3.6 POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO 46
3.7 TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS 46
3.8 PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS 46
3.9 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS 47
3.10 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS 47
CAPITULO IV: RESULTADOS 48
4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 48
4.1.1 Configuración de vehículos con distintas cargas 48
4.1.2 Esfuerzos en la estructura del pavimento. 51
4.1.3 Calculo de coeficientes de daño 66
4.2 DISCUSIÓN 85
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
ANEXOS

CAPITULO I: PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La importancia de este trabajo, se basa en la trascendencia de la carretera Huancavelica – Huancayo, que ayudará a mejorar las condiciones de transporte de la sierra central propiciando el desarrollo de los pueblos adyacentes, así mismo, mejorar el aprovechamiento de los recursos que se encuentran en la zona y constituirse en una ruta de menor longitud entre la capital de la Región Huancavelica y la Región Junín; por todo esto, se hace necesario hacer el análisis y el cálculo del coeficiente de daño que se producirá al paso de vehículos pesados no considerados en el diseño del expediente técnico.

Existen diferentes tipos de vehículos los cuales aportan daños a la estructura del pavimento según su peso y presión de inflado de sus neumáticos; para el eje unitario su daño es igual a uno sobre la superficie como a lo largo de la vertical, a diferencia de los otros ejes vehiculares, cuyos daños varían de acuerdo a la profundidad de la estructura del pavimento. Es aquí donde se recurre a la teoría de "Boussinesq", para llegar al cálculo de esfuerzos de acuerdo a diferentes profundidades, y con esto obtener el coeficiente de daño producido por vehículos pesados.

Los coeficientes mencionados deben ser parámetros en el diseño de pavimentos flexibles; contando con la solicitación de carga a la que estará sometida cierta

estructura de pavimento, la cual surge de un Índice Medio Diario Anual (IMDA) y su correspondiente clasificación vehicular.

Para ello es necesario que se realicen estudios y toma de muestras del pavimento a fin de ir controlando los daños que pudieran causar los vehículos de alto tonelaje y con presiones de inflado de llantas no considerados en la fase de diseño, lo que permitirá cumplir con la vida útil calculada para el pavimento de la carretera.

Se propone:

- Aplicar la teoría de Boussinesq para determinar el Coeficiente de Daño que causarán los vehículos en la estructura del pavimento de la carretera Huancavelica - Huancayo, tramo Puente Santa Rosa - Sachapite, en el Departamento de Huancavelica.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida la determinación de los daños producidos por los vehículos en la estructura del pavimento de la carretera Huancavelica - Huancayo, tramo Puente Santa Rosa - Sachapite, en el Departamento de Huancavelica, permitirá evaluar los coeficientes de los daños y prever si el pavimento cumplirá con su periodo de diseño?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el coeficiente de daño que se producirá al transitar vehículos pesados en la estructura de un pavimento flexible, con este valor prever si éste cumplirá con su periodo de diseño.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Obtener los esfuerzos a diferentes profundidades en las diversas capas de la estructura de pavimento flexible.
- Obtener el coeficiente de daño producido por vehículos pesados en la estructura de pavimento.

- Análisis y comparación entre el coeficiente de daño producido por un eje equivalente o unitario y los producidos por los vehículos pesados.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.4.1. Justificación legal.

Está sustentada en la reglamentación establecida en el I Curso de Titulación por Tesis de la Escuela Académico Profesional de Civil, de la Facultad de Ingeniería de Minas – Civil - Ambiental de la Universidad Nacional de Huancavelica.

1.4.2. Justificación teórica.

Esta referida a los conocimientos teóricos sobre la teoría de transmisión de esfuerzos en suelos y el diseño de pavimentos, los cuales están orientados a obtener el coeficiente de daño en la estructura de pavimento, este será un parámetro que se puede tomar en cuenta en los futuros diseños de pavimentos, así también, es un aporte como material de consulta para las personas interesadas en el tema.

1.4.3. Justificación técnica.

El desarrollo de los temas relacionados con la tesis se sustenta en la bibliografía existente y el Reglamento Nacional de Vehículos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Revisado las diversas fuentes se encontró algunos estudios previos en relación al estudio y dentro de ellos señalaremos a continuación:

a. Antecedentes internacionales

Se tiene conocimiento de un trabajo elaborado en Colombia denominado "*Diagnóstico de vía existente y diseño del pavimento flexible de la vía nueva mediante parámetros obtenidas en la fase 1 de la vía Acceso al Barrio Ciudadela del Café – Vía La Badea*", en el cual emplean la Teoría de Boussinesq para calcular el estado de esfuerzos en una masa de suelo a cualquier profundidad y determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento.

b. Antecedentes nacionales

No se pudo determinar los trabajos existentes en este contexto.

c. Antecedentes locales

Existen algunos trabajos aislados sobre el particular del tema pero aun no registrados.

2.2 BASES TEÓRICAS - CONCEPTUALES

2.2.1 Definición y Clasificación de Pavimentos.

Estructura conformada por un conjunto de capas superpuestas, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados, para poder soportar las cargas repetidas del tránsito, en diferentes condiciones climáticas, sin agrietarse o deformarse excesivamente, y con capacidad de transmitirlas a los suelos de sub-rasante y de fundación, sin provocar hundimiento o asentamientos excesivos dentro de un rango de serviciabilidad y durante el periodo de tiempo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (Menéndez, 2013)

Los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos. El comportamiento de los mismos al aplicarles cargas es muy diferente.

2.2.1.1 Pavimento flexible

Una carpeta constituida por una mezcla asfáltica proporciona la superficie de rodamiento; que soporta directamente las solicitaciones del tránsito y aporta las características funcionales. Estructuralmente, la carpeta absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales, ya que las cargas de los vehículos se distribuyen hacia las capas inferiores por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. (Menéndez, 2013), (Ver fig. 01)

2.2.1.2 Pavimento rígido

La superficie de rodamiento de un pavimento rígido es proporcionada por losas de hormigón hidráulico, las cuales distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Por su rigidez distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con presiones muy reducidas. Salvo en bordes de losa y juntas sin

pasa juntas, las deflexiones o deformaciones elásticas son casi inapreciables. (Menéndez, 2013), (Ver fig. 02)

Aparte de los tipos de pavimentos ya citados existe actualmente el llamado semirígido que es, esencialmente, un pavimento flexible a cuya base se le ha dado una rigidez alta por la adición de cemento o asfalto.

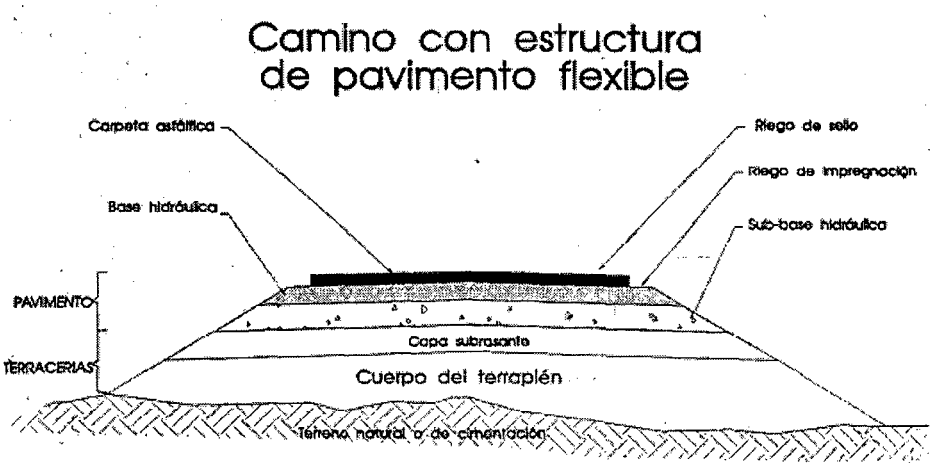


Fig. 01: (Estructura de un Pavimento Flexible)

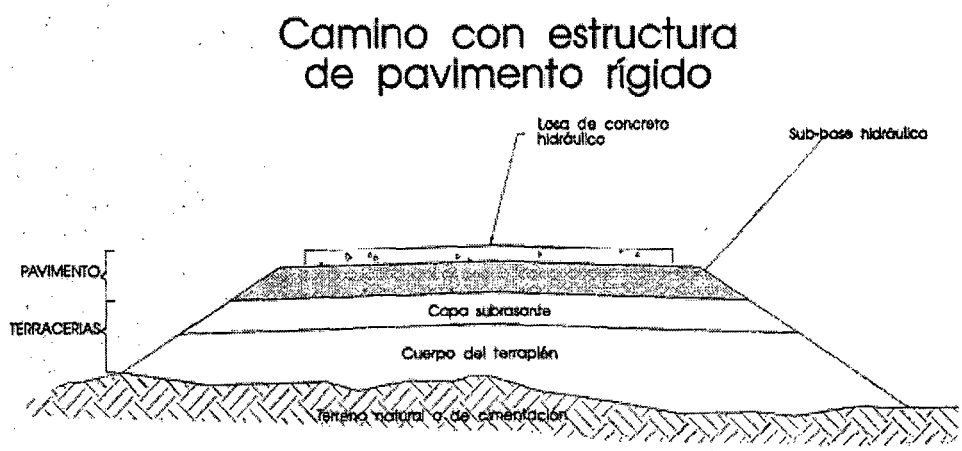


Fig. 02: (Estructura de un Pavimento Rígido)

De lo anterior se desprende que, en general, un pavimento está formado por diversas capas de mejor calidad y mayor costo cuanto más cercanas se encuentran a la superficie de rodamiento; ello es, principalmente por la mayor intensidad de los esfuerzos que le son transmitidos.

Algunos autores consideran que los pavimentos se diferencian y definen en términos de los materiales de que están constituidos y de cómo se estructuran esos materiales. Mientras que otros consideran que la diferencia esencial es la manera en que distribuyen las cargas sobre la subrasante.

2.2.2 Estructura Básica del Pavimento Flexible.

A continuación con base en la Fig. 01 se describe la estructuración de un pavimento flexible incluyendo aquellas capas que no forman parte del pavimento estrictamente pero que forman parte de la sección de un camino y que trabajan en conjunto con las capas supra yacentes.

La Fig. 02 muestra la estructuración típica de una sección en terraplén.

Bajo una carpeta bituminosa, formada típicamente, por una mezcla de agregado pétreo y un aglutinante asfáltico, que constituye la superficie de rodamiento propiamente dicha, se disponen casi siempre por lo menos dos capas bien diferenciadas: una base, de material granular y una sub-base, formada preferentemente, también por suelo granular, aunque el requisito obligue menos que en la base, en el sentido de poder admitir suelos de menor calidad, con mayor contenido de finos y menor exigencia en lo que se refiere a granulometría; la razón es el mayor alejamiento de la sub-base de la superficie de rodamiento, por lo que llegan esfuerzos de menor intensidad

Bajo la sub-base se presenta casi por lo general otra capa denominada subrasante, todavía con menos requisitos de calidad mínima que la sub- base, por la misma razón, pero cuyo fundamental papel mecánico se discute cada vez menos.

Finalmente, bajo la subrasante aparece el material convencional de la terracería ó terreno natural, tratado mecánicamente en lo referente a compactación.

2.2.3 Funciones de las distintas capas de la estructura del pavimento.

2.2.3.1. Terracerías.

a) Terreno natural o de cimentación

Se puede definir como la franja de terreno que es afectada por la construcción del camino y que su función es la de soportar las cargas de la estructura del pavimento y de las terracerías sin olvidar las cargas del tránsito. (Garber, 2004)

b) Cuerpo del terraplén

Esta será utilizada únicamente en porciones de camino con terraplén, sus función principal es la de dar la altura necesaria para alojar las obras de drenaje. (Garber, 2004)

c) Capa subrasante

Tiene múltiples funciones como la de recibir y resistir las cargas del tránsito transmitidas por la capa de pavimento y transmitirlas en forma adecuada a las capas inferiores; además:

- Evitar que se contaminen las capas del pavimento cuando el cuerpo del terraplén o el terreno natural sea de material fino o arcilloso.
- Evitar que sean absorbidas las capas superiores cuando se tienen pedraplenes.
- Evitar que se reflejen las imperfecciones en los cortes hacia las capas de pavimento para lograr espesores de pavimentos constantes.

2.2.3.2. Pavimentos flexibles.

a) Sub-base

Para muchos, una de las principales funciones de esta capa en un pavimento flexible es de carácter económico. Se trata de formar el espesor requerido del pavimento con el material más barato posible. Todo el espesor podría construirse con un material de alta calidad, como el usado en la base, pero se prefiere hacer aquella más delgada y sustituirse en parte por una sub-base de menor calidad, aun cuando esto traiga consigo un aumento en el espesor total del pavimento, pues, naturalmente cuanto menor sea la calidad del material colocado será mayor el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

Sus funciones son la de resistir las cargas de tránsito y transmitirlas adecuadamente a las terracerías.

Otra función consiste en servir de transición entre el material de base, generalmente granular más o menos grueso y la propia subrasante. La sub-base, más fina que la base, actúa como filtro de ésta e impide su incrustación en la subrasante.

La sub-base también se coloca para absorber deformaciones perjudiciales en la subrasante, por ejemplo cambios volumétricos asociados a cambios de humedad, impidiendo que se reflejen en la superficie del pavimento.

Otra función de esta capa es la de actuar como dren para desalojar el agua que se infiltre a través de las capas superiores, y para impedir la ascensión capilar hacia la base, de agua procedente de la terracería. (Garber, 2004)

b) Base

Hasta cierto punto existe en la base una función económica análoga a la comentada para el caso de la sub-base, pues permite reducir el espesor de la carpeta que viene a ser la capa más costosa. Pero la función fundamental de esta capa consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la sub-base y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. (Garber, 2004)

c) Carpeta

La carpeta debe de proporcionar una superficie de rodamiento adecuada con textura y color convenientes y resistir los efectos abrasivos del tráfico hasta donde sea posible ya que estará en contacto directo con él; además debe impedir hasta cierta medida el paso del agua a las capas inferiores. (Garber, 2004)

2.2.3.3. Pavimento rígido.

a) Sub-base

Sus funciones son análogas a la misma en un pavimento flexible y sirve también para proporcionar una superficie uniforme que sirva de apoyo a la losa y facilite su colado; protege también a la losa de cambios volumétricos en la subrasante, que de otra manera inducirían esfuerzos adicionales a aquella. En este caso, la Sub-Base no tiene ningún fin estructural pues la losa debe ser suficiente para soportar las cargas. (Garber, 2004)

b) Losa

Las funciones de la losa en el pavimento rígido son las mismas de la carpeta en el flexible, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado las cargas que se le apliquen. (Garber, 2004)

2.2.4 Factores que influyen en el diseño de pavimentos flexibles

Considerando a un pavimento flexible como un conjunto, se tienen que tomar en cuenta para su diseño, no importando el método, los siguientes factores:

2.2.4.1. La resistencia estructural.

La metodología teórica para el análisis de la resistencia de un pavimento es proporcionada por la mecánica de suelos y es sabido, que en ese campo, las teorías de falla de mayor aceptación por hoy son las del esfuerzo cortante; como consecuencia, en el estudio de los pavimentos flexibles suele considerarse a los mismos esfuerzos como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural.

Las teorías de capacidad de carga de la mecánica de suelos suelen referirse a medios homogéneos e isótropos; la heterogeneidad de la estructura de los pavimentos flexibles, así como su anisotropía, conducen a una primera incertidumbre en el planteamiento teórico de resistencia.

Además de los esfuerzos cortantes actúan en los pavimentos esfuerzos adicionales producidos por la aceleración y frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión que se desarrollan en los niveles superiores de la estructura, a cierta distancia del área cargada, cuando esta se deforma verticalmente hacia abajo. De hecho, el problema de la resistencia plantea en general en relación con la estructura de los materiales del pavimento, pues aunque los materiales de la terracería sean de peor calidad, el espesor protector que el propio pavimento representa hace que los esfuerzos que llegan a aquellos niveles alcancen valores inferiores a la carga requerida para la falla de los suelos.

La determinación de la resistencia de los materiales que constituyen un pavimento es un problema difícil y no resuelto satisfactoriamente, influye en él no solo el tipo de suelo y su tratamiento, sino también su interacción

con los efectos de la intemperie, de los que la variación del contenido de agua es seguramente el más importante. Este contenido es necesario para el proyecto, que suele tender a definir la resistencia en esa condición crítica. Esta es otra de las incertidumbres básicas de diseño, que se ha resuelto a base de hipótesis más o menos justificadas por la experiencia, como considerar que el suelo llegará a saturarse, adquirirá una humedad de equilibrio, mantendrá la humedad óptima de compactación u otra próxima a ella.

Otro factor que influye substancialmente en la resistencia de los materiales es el tipo de carga que se les aplica y la velocidad con que ello se hace. Los pavimentos están sujetos a cargas móviles y los efectos de estas son menos conocidos y diferentes que los de las cargas estáticas; esto es otra fuente de incertidumbre que se ha tratado de resolver en los análisis teóricos (Boussinesq, Burmister, etc.), admitiendo que las cargas actuales son de tipo estático. En las pruebas de laboratorio y en los métodos de diseño en ellas fundados, la situación es un poco más realista, pues si bien las pruebas se realizan con cargas estáticas o con velocidades de aplicación muy lentas, su correlación para la obtención de normas de criterio se hace con el comportamiento real de los pavimentos bajo cargas móviles. (Garber, 2004)

En resumen, la resistencia de los materiales que forman los pavimentos interesa desde dos puntos de vista:

- En cuanto a la capacidad de carga que pueden desarrollar las capas constituyentes del pavimento para soportar adecuadamente las cargas del tránsito.
- •En cuanto a la capacidad de carga de la capa subrasante, que constituye el nexo de unión entre el pavimento y la terracería, para soportar los esfuerzos transmitidos y transmitir, a su vez, esfuerzos a la terracería a niveles convenientes.

Ambos puntos son de primordial importancia en la selección de los materiales que deben constituir las diferentes capas de pavimento.

2.2.4.2. La deformabilidad

En los pavimentos las deformaciones interesan como es usual en la Ingeniería, desde dos puntos de vista: Por un lado, porque las deformaciones excesivas están asociadas a estado de falla y, por otro lado, porque es sabido que un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.

Las Cargas del tránsito producen en el pavimento deformaciones de varias clases. Las elásticas son de recuperación instantánea y las plásticas que son aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora.

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en los materiales con resistencia a la tensión, colocados en la parte superior de la estructura, en los que puede llegar a generar falla por fatiga si el monto de la deformación es importante y los materiales susceptibles.

Bajo carga móvil y repetida la deformación plástica tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles.

Existe hoy una fuerte corriente de opinión en el sentido de que la deformabilidad de los pavimentos flexibles es un punto básico a considerar y, de hecho un buen número de métodos de diseño se centran en mantenerla en límites tolerables. El señalar estos límites se basa en normas de experiencia de grupos de Ingenieros.

Otro problema importante radica en medir la deformación que el pavimento va a sufrir realmente bajo la carga. Este problema debe considerarse en dos fases.

Primero, la estimación de las deformaciones elásticas, que es posible hacer con razonable precisión una vez conocidos los materiales que constituirán el pavimento, obteniendo su módulo de deformación por medio de alguna de las diversas pruebas de campo que hoy existen (pruebas de placa) y que pueden realizarse sobre terraplenes de prueba en las condiciones consideradas críticas.

La segunda base del problema de medición de deformaciones se refiere a las plásticas, efecto acumulativo de la carga repetida. Este aspecto se ha atacado con criterios puramente, empíricos cuyo aprovechamiento por los métodos de diseño requiere de extrapolaciones experimentales; por ejemplo la diversidad de las cargas se refiere a una carga única, llamada estándar, resultado de estudios estadísticos en tramos experimentales ó barreteros, sometidos a la acción del tránsito real ó clasificado. Se intenta que la carga estándar, tome en cuenta el efecto de la repetición, pues al definirla se ha correlacionado su propio efecto destructivo con el que causarían las cargas reales de sus repeticiones respectivas. Una vez fijado el tránsito "de análisis", lo que suele hacerse actualmente en todos los métodos de diseño que toman en cuenta estas cuestiones es prefijar con base experimental, una deformación permanente máxima y el pavimento de diseño de manera que ésta se presente únicamente al fin de la vida útil prevista.

Existen dos criterios para fijar la deformación máxima permisible; o bien se habla de la que produce la falla del camino, atendiendo por ésta la condición en la que el pavimento llega a perder las características de servicio para las que fue diseñado (criterio AASHTO ó de índice de servicio)

o bien se toma en cuenta la deformación que obligue a una reconstrucción de determinada importancia económica (criterio británico).

2.2.4.3. La durabilidad

La durabilidad está ligada con una serie de factores económicos y sociales del propio camino.

En un camino de muy alto tránsito y gran importancia económica se requerirán pavimentos muy duraderos a fin de no tener que recurrir a costosas interrupciones de un tránsito importante.

Una vez fijado el criterio que proporcionan la duración deseada en el pavimento, surgen muchas incertidumbres de carácter práctico para lograrla; ya se ha mencionado que el efecto del clima y del tránsito dista de estar bien establecido, de manera que su influencia en la vida del pavimento no puede definirse con exactitud.

Consecuentemente, los autores no conocen ningún método de diseño que tome en cuenta los requisitos de durabilidad de un modo cuantitativo, racional e independiente del sentimiento particular.

2.2.4.4. El costo

Como toda estructura ingenieril un pavimento representa un balance entre la satisfacción de requisitos de resistencia y estabilidad en general por un lado y el costo, por otro. Un diseño correcto será el que llegue a satisfacer los necesarios requerimientos del servicio a costo mínimo. Naturalmente para lograr el equilibrio podrán seguirse una gran cantidad de posibles líneas de conducta y de aquí emana uno de los aspectos de diseño más inciertos y de los que demandan mayor criterio.

De hecho la primera disyuntiva se tiene al elegir el tipo de pavimento a emplear en cada caso; los pavimentos rígidos, flexibles ó semirrígidos son ventajosos o inconvenientes según los casos, hablando comparativamente. En general, los pavimentos rígidos demandan poco gasto de conservación y se deterioran poco, pero su costo de construcción es alto y están circunscritos a la disponibilidad de los materiales necesarios y a un equipo de construcción especializado. Los pavimentos flexibles requieren menor inversión inicial, pero una conservación más costosa. Los semirígidos pueden constituir soluciones económicas cuando los materiales de que se dispone para la construcción los hacen convenientes, pues permiten muy apreciables reducciones en los espesores. No hay reglas fijas que permitan establecer el tipo de pavimento conveniente en cada caso y el punto deberá establecerse en cada situación en particular.

Elegido el tipo de pavimento, deberán seleccionarse los materiales que intervendrán en su estructura. Es posible que estos se ofrezcan en abundancia y que el problema estribe en establecer su selección idónea, pero también es posible que carezcan a tal grado que obliguen al proyecto del pavimento en su conjunto a adaptarse a los que existan.

Otro de los factores que intervienen en forma decisiva en los costos de un pavimento y para cuya definición no existen tampoco reglas fijas confiables en lo relativo a las normas de construcción que han de sujetarse los diferentes materiales para cumplir con los requerimientos de un proyecto determinado, es la compactación, ya que, incluye un gran número de incertidumbres importantes que han de resolverse sobre la marcha en base a la experiencia y el sentido común de los proyectistas y constructores.

2.2.4.5. Los requerimientos de conservación

Una gran cantidad de incertidumbres de las que se plantean en la práctica de los pavimentos tiene que ver con su conservación. Los factores que

influyen decisivamente en la vida de los pavimentos y que el proyecto ha de tomarlos en cuenta para su previsión, a fin de dejar a la conservación una tarea razonable son los siguientes:

Los factores climáticos, La intensidad del tránsito; se trata de prever el crecimiento futuro, tanto del número como del tipo de vehículos circulantes.

El futuro comportamiento de las terracerías, sus deformaciones, derrumbes, saturaciones locales, etc.

Las condiciones de drenaje y subdrenaje de la vía terrestre. El proyecto de estos elementos debe considerarse en muchas ocasiones como formando parte del diseño del pavimento, pues forma con él un todo integral inseparable.

La degradación estructural de los materiales constituidos por carga repetida, ya mencionado es otro aspecto importante a reflejarse en los requerimientos de conservación. Aunque existen en la actualidad algunas pruebas orientadoras en relación al comportamiento de los materiales a este respecto, son muchas las dudas que podrán presentarse en cualquier caso particular; es fundamental que sean resueltas con buen juicio y experiencia, pues es un hecho comprobado que los descuidos en este terreno se reflejan rápidamente en una conservación costosa y aún en la necesidad de reconstrucciones.

2.2.4.6. La comodidad

Los problemas y los métodos de los pavimentos deben verse afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad del proyecto especialmente en grandes autopistas y caminos de primer orden. Evidentemente dentro de este requisito quedan incluidos otros muchos, de

los que la seguridad es el más importante; la estética y su efecto en las reacciones psicológicas del conductor merecen también consideración.

Las deformaciones longitudinales de un pavimento, por ejemplo, pueden constituir un atentado contra la comodidad, independientemente de que desde un punto de vista estrictamente mecánico, representen poco o nada de deficiencia estructural o riesgo de falla. En caminos de especificaciones altas, el proyectista deberá elevar su nivel de exigencia, haciendo intervenir en su criterio consideraciones de esta índole, que no figuran en otros caminos más modestos, en que menores velocidades de operación o intensidad de tránsito hacen estos problemas menos críticos.

2.2.5 Teoría de Boussinesq para el cálculo de esfuerzos.

Para el caso de los pavimentos flexibles se estudian únicamente los esfuerzos debidos a las cargas de tránsito.

Existen, hasta el presente, dos criterios principales para tal estudio, la Teoría de Boussinesq y la de Burmister. El segundo citado, considera al suelo formado por dos capas linealmente elásticas, homogéneas e isótropas y que, por razones obvias, es considerada más representativa que la Teoría de Boussinesq, fundamentada en la consideración de un suelo homogéneo, isótropo, linealmente elástico y semi-infinito limitado por una sola frontera plana. Pero dadas las hipótesis involucradas y la verdadera naturaleza de las capas de suelo que constituyen un pavimento flexible, resulta difícil establecer que tan apropiado o preciso sea en un caso dado y aún más difícil, preferir el método de análisis de Burmister sobre el de Boussinesq, que proporciona en general resultados más conservadores. (Badillo, 1998)

Como ya se mencionó al aplicar la Teoría de Boussinesq se utiliza en pavimentos la condición de área circular uniformemente cargada, representando el contacto entre la llanta de los vehículos y la superficie de rodaje.
El caso aparece en la fig. 03

El esfuerzo σ_Z en cualquier punto de la vertical bajada por el centro del círculo cargado puede obtenerse también integrando la ecuación (1) a toda el área circular. El proceso se realiza a continuación con referencia a la Fig. 04

$$\sigma_Z = \frac{3\rho Z^3}{2\pi R^5} \dots\dots\dots\dots (1)$$

Fórmula de Boussinesq para el cálculo de esfuerzos que produce en los puntos de cualquier vertical trazada en el medio, una sola carga vertical concentrada actuante en la superficie horizontal de un medio semi-infinito, homogéneo, isótropo y linealmente elástico; Teoría de la Elasticidad.

Definiendo un $\Delta_i A$ como se muestra en la Fig. 04 se tiene:

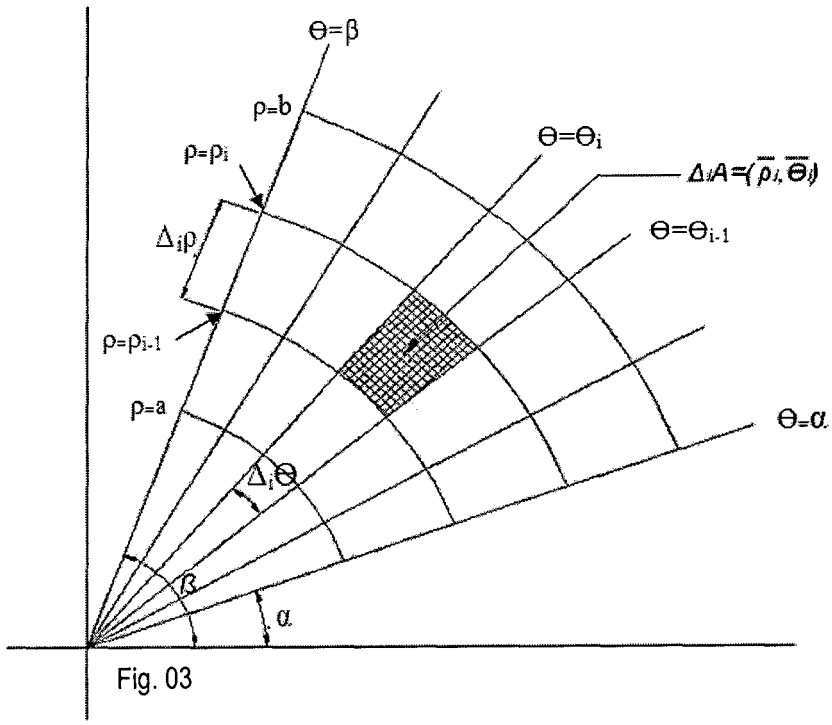


Fig. 03

$$\Delta_i A = \frac{1}{2}\rho_i^2(\theta_i - \theta_{i-1}) - \frac{1}{2}\rho_{i-1}^2(\theta_i - \theta_{i-1})$$

$$\Delta_i A = \frac{1}{2}(\rho_i - \rho_{i-1})(\rho_i + \rho_{i-1})(\theta_i + \theta_{i-1})$$

Haciendo:

$$\bar{\rho}_i = \frac{1}{2}(\rho_i + \rho_{i-1}); \quad \bar{\Delta}_i\rho = (\rho_i + \rho_{i-1}) \quad y \quad \Delta_i\theta = (\theta_i - \theta_{i-1})$$

Entonces:

$$\Delta_i A = \rho_i \Delta_i \rho \Delta_i \theta$$

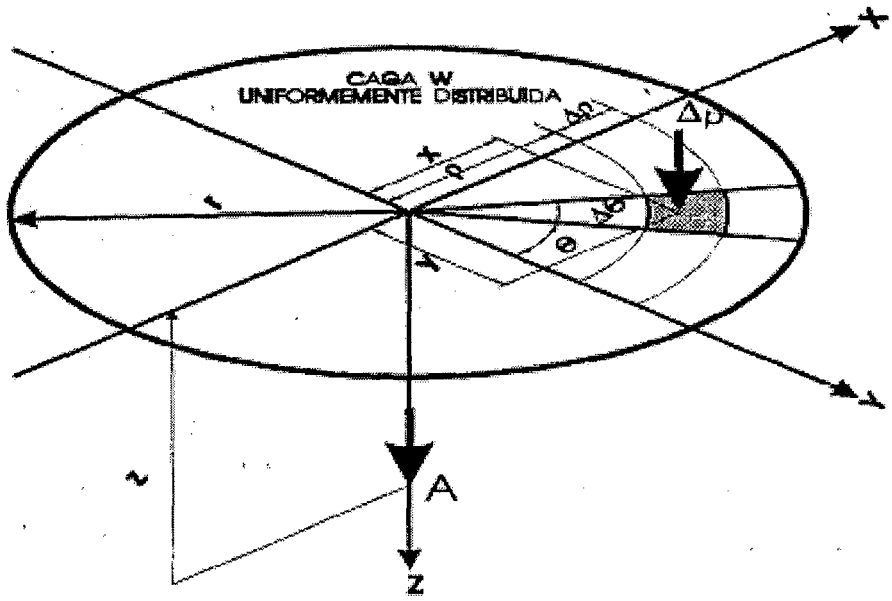


Fig. 04 (Distribución de esfuerzos bajo el centro de una superficie circular uniformemente cargada).

En el área $\Delta A = \rho\Delta\rho\Delta\theta$ actuará una carga $\Delta\rho$

$$\Delta\rho = \omega\rho\Delta\rho\Delta\theta$$

Esa carga, según la ecuación (1) produce a una profundidad "z", en un punto como el A, un esfuerzo vertical $\Delta\rho_Z$:

$$\Delta\sigma_Z = \frac{3\Delta P}{2\pi}\frac{Z^3}{(x^2+y^2+z^2)^{5/2}}$$

Como: $\rho^2 = x^2 + y^2$

Entonces tenemos que:

$$\Delta\sigma_Z = \frac{3\omega}{2\pi}\frac{Z^3}{(\rho^2+z^2)^{5/2}}\rho\Delta\rho\Delta\theta$$

Agrupando.

$$\Delta\sigma_Z = \frac{3\omega}{2\pi}Z^3\frac{\rho}{(\rho^2+z^2)^{5/2}}\Delta\rho\Delta\theta$$

El esfuerzo σ_Z correspondiente a toda el área resultará de llevar a la expresión anterior al límite y de aplicar la definición usual de integral de superficie.

$$\sigma_Z = \iint \frac{3\omega z^3}{2\pi}\frac{\rho}{(\rho^2+z^2)^{3/2}}d\rho d\theta$$

$$\sigma_z = \frac{3\omega z^3}{2\pi}(2\pi)\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^r \frac{\rho}{(\rho^2+z^2)^{3/2}}d\rho$$

$$\sigma_z = \frac{3\omega z^3}{2\pi}(2\pi)\int_0^r \frac{\rho}{(\rho^2+z^2)^{3/2}}d\rho$$

Haciendo: $\mu = \rho^2 + z^2$ tenemos que: $d\mu = 2\rho d\rho$

Sustituyendo:

$$\sigma_z = 3\omega z^3\frac{1}{2}\int_0^r \frac{d\mu}{\mu^{1/2}} = 3\omega z^3\frac{1}{2}\int_0^r \mu^{-3/2}d\mu$$

$$\sigma_Z = 3\omega z^3\frac{1}{2}\frac{\mu^{-1/2}}{-3/2} = 3\omega z^3$$

De acuerdo a la expresión anterior, la ecuación (2), podemos abreviarla de la siguiente manera:

$$\sigma_z = \omega - \omega_0$$

$$\omega_0 = \left[1 - \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{r}{z}\right)^2}\right)^{\frac{3}{2}}\right] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

2.2.6 Consideraciones de tráfico y vehículos

Entre los factores más importantes a ser evaluados en el diseño estructural de un pavimento para carretera están los efectos de tipo de vehículo, volumen de tráfico y modo de operación del vehículo. Al considerar un tipo de vehículo en particular, se deben considerar factores como la configuración especifica del sistema de rodaje, espaciamiento entre ruedas, carga por rueda y presión de inflado de neumáticos.

Incluidas en los efectos del tráfico están las consideraciones de la diversidad de tipos de vehículos que se esperan dentro del período de diseño, el número anticipado de cada tipo de vehículo dentro de un periodo de tiempo dado, el efecto de los movimientos laterales de los vehículos (transversal al pavimento).
El modo de operación del vehículo es principalmente asociado con la velocidad a la que opera el vehículo en el área de pavimento a diseñarse. Al definir la respuesta debido a la velocidad, hay dos consideraciones principales pero independientes. Primera, la variación en la velocidad de operación puede afectar la respuesta de los diferentes componentes materiales del pavimento y por consiguiente el estado de esfuerzos deflexiones y resistencia. Segunda, un vehículo dado puede responder diferente desde el punto de vista de una carga dinámica debida a las oscilaciones dinámicas normales de carga del sistema de rodaje complementada con incremento en los efectos de carga.

2.2.6.1. Rueda sencilla equivalente cargada Vs vehículo estándar

Todos los procedimientos de diseño de pavimentos caen en dos hipótesis básicos que se basan en como consideran los efectos del tráfico y de los vehículos. Estas dos hipótesis son mostradas esquemáticamente en la fig. 05 en la fig. 05(a) el método ilustrado en el diagrama tiene un nivel de tráfico para falla propio pero no obvio. Normalmente este método usa una relación establecida entre espesor de pavimento y una carga por rueda sencilla para varios valores de soporte de subrasante. (MTC, 2001)

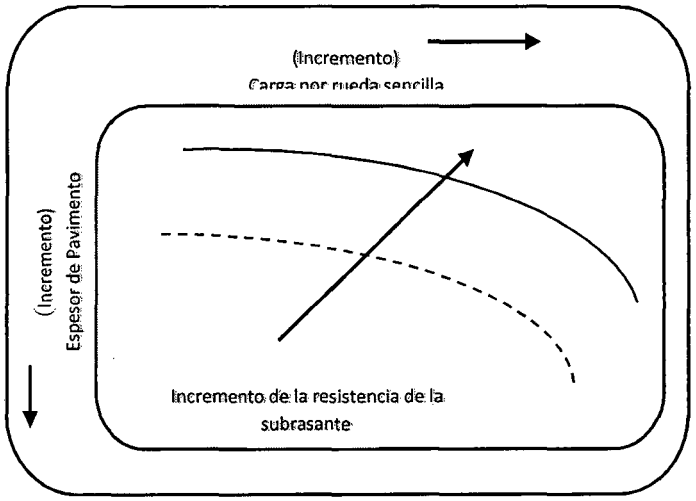


Fig. 05 (a)

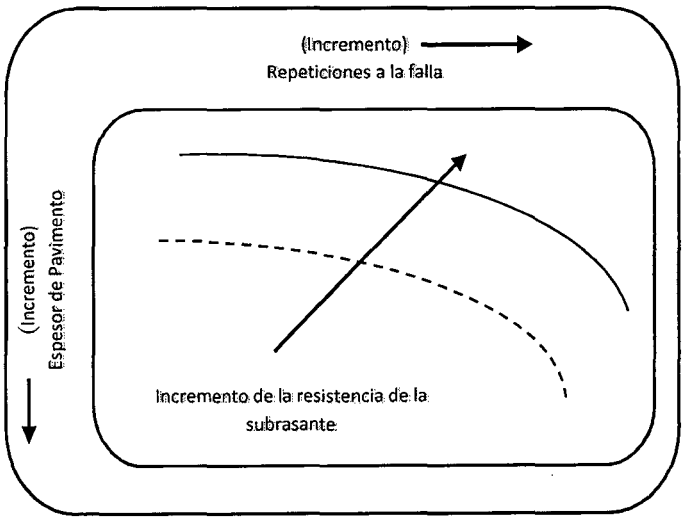


Fig. 05 (b)

La Fig. 05 (b) ilustra la hipótesis que se basa en un tipo de vehículo estándar y normalmente expresa el espesor del pavimento como una función del número de repeticiones del vehículo estándar a la falla para varios tipos de subrasante. Aunque ambos métodos consideran las repeticiones de tráfico y vehículos, la filosofía usada al manejar estos efectos es del todo diferente. Para el procedimiento de la Fig.05 (a) existe la necesidad de idealizar el arreglo múltiple de ruedas en una rueda sencilla equivalentemente cargada. Normalmente en esta hipótesis de diseño solo un vehículo critico o de diseño es usado (por ejemplo el avión más pesado o el que provoca más daño) y los efectos de daño de otro tipo de vehículos son ignorados. Este procedimiento es ampliamente utilizado en aeropuertos.

El procedimiento basado en un tipo de vehículo estándar normalmente requiere de determinar los efectos equivalentes de daño para todos los tipos de vehículos en la mezcla expresado en términos del número de repeticiones del vehículo estándar. Los factores que relacionan la cantidad de daño que provoca un vehículo en particular en relación al daño que produce el vehículo estándar son llamados coeficientes de daño.

Aunque cada hipótesis de diseño de pavimento para camino debe ser vista con criterios previos, lo usual es que se adopte para carreteras el diseño de pavimentos basado en el vehículo estándar.

2.2.7 Coeficiente de daño

Un coeficiente de daño define por pasada causado a una estructura de pavimento por un eje vehicular cualquiera, en relación al daño que causa un eje estándar llamado eje unitario o equivalente el cual produce un daño igual a la unidad en la misma estructura de pavimento. (MTC, 2001)

De acuerdo con las normas vigentes, este daño unitario lo produce un eje sencillo de 8.20 ton con una presión de inflado en sus neumáticos de $5.80 \frac{Kg}{cm^2}$

El daño depende del criterio de la persona que lo califique, de hecho se puede considerar como falla desde la aparición de la primera grieta, o defecto, hasta la destrucción total de la carretera. Por tanto, existen niveles de referencia variables, tanto en la equivalencia de cargas como en la valuación del daño que ocasiona la falla funcional del pavimento.

Para obtener los coeficientes de daño para la variedad de vehículos que existen se necesitan calcular los esfuerzos que producen dichos vehículos a distintas profundidades, para esto se recurre a la teoría de Boussinesq. Posteriormente, con base en el método de diseño de la normas, se calculan los coeficientes de daño para dichos vehículos.

2.2.8 Método de diseño del Instituto de Ingeniería para el cálculo del coeficiente de daño

2.2.8.1. Características

En este método destacan los conceptos de comportamiento de fatiga de las diferentes capas que constituyen la carretera, el criterio de sección estructural de resistencia relativa uniforme y el tratamiento probabilístico para establecer niveles de confianza respecto a la falla.

Además, los conceptos aplicados para evaluar los coeficientes de daño en términos de esfuerzos a diferentes profundidades, constituyen un avance con relación a los factores empleados usualmente, que son de carácter empírico y no toman en cuenta ni las presiones de contacto ni la profundidad de la capa en que se analiza el deterioro.

En el método de diseño se relacionan resistencias críticas en el lugar contra aplicaciones de carga estándar esperadas en la vida de proyecto de la carretera.

2.2.8.2. Campo de aplicación.

El criterio de diseño está limitado al caso típico de las estructuras de pavimentos, donde el espesor de las carpetas de concreto asfáltico rara vez excede de 7.5 cm. y las demás capas de la carretera están constituidas por materiales granulares o suelos finos estabilizados mecánicamente por compactación. En el caso de carpetas asfálticas varían las hipótesis de diseño y deberán tomarse en cuenta los esfuerzos radiales que pueden producir fallas por fatiga a la tensión en el concreto asfáltico. De manera semejante, en el caso de bases y sub- bases estabilizadas con asfalto, cal o cemento, se requiere investigación complementaria.

Para el caso en que se presente deformabilidad perjudicial del terraplén causada por cambios volumétricos, asentamientos o consolidación, el diseño consistirá fundamentalmente en controlar las deformaciones del terraplén mediante técnicas de mecánica de suelos, seguido por recomendaciones sobre el espesor de un pavimento deseable, a fin de transmitir los esfuerzos a las terracerías y suelo de cimentación en condiciones adecuadas. En lugares donde la excesiva deformabilidad no se pueda controlar, es conveniente efectuar el diseño por etapas planeadas de pavimentos más ligeros que los que resultarían para vidas de proyecto prolongadas, ya que en esos casos la falla del pavimento será producida por la deformación de las capas de cimentación y no por el tránsito.

2.2.8.3. Método teórico de comportamiento

Para desarrollar el modelo de comportamiento a fatiga, considerada ésta como deformación permanente acumulada, se supone que la carretera tiene una resistencia relativa uniforme en todas las capas de su estructura y llega a la falla funcional cuando ha soportado el número de cargas estándar especificado para la vida de proyecto. Si la resistencia relativa no es uniforme, la capa con resistencia relativa mínima determina la vida de servicio de la carretera.

Se emplean los conceptos de capacidad de carga en los suelos cohesivos y la teoría de distribución de esfuerzos verticales de Boussinesq deducida para una placa circular flexible de radio a apoyada uniformemente en la superficie de un medio elástico homogéneo e isótropo, para su aplicación al caso de una estructura de capas múltiples, en la cual las gráficas adimensionales esfuerzo - deformación de los materiales son iguales. Se considera el esfuerzo vertical como un indicador adecuado del comportamiento a cargas repetidas de la capa correspondiente. Se supone que las carpetas asfálticas son delgadas y que su duración a la falla depende de la resistencia a la tensión; en carpetas de riegos se desprecia esa resistencia.

La falla por fatiga de una capa en la superficie de la carretera se analiza bajo la hipótesis de que existe una relación lineal entre el logaritmo de la resistencia ($log\ \Delta qs$) y el logaritmo del número acumulado de cargas estándar ($log\ \Sigma L$). La carga estándar o eje equivalente se define como la solicitación de un eje sencillo de 8.20 ton y llantas con presión de contacto de 5.8 $\frac{kg}{cm^2}$.

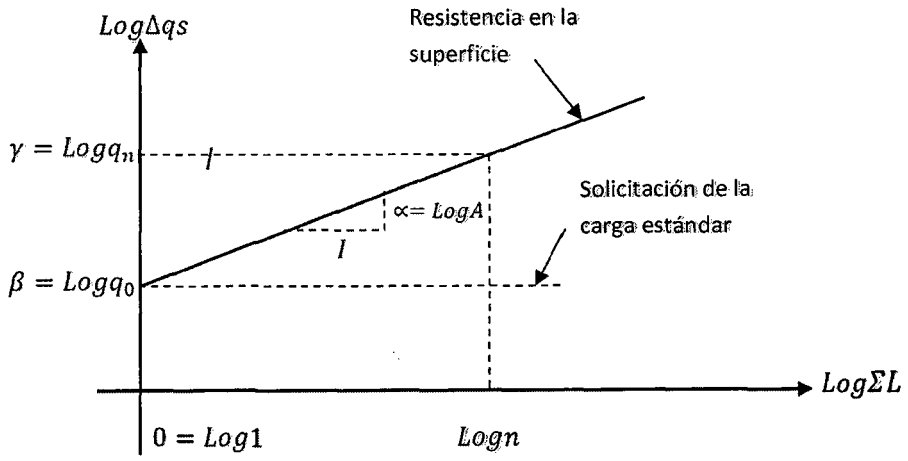


Fig. 06

La ordenada al origen β representa el logaritmo de la resistencia de un material débil que falla a la primera aplicación de la carga estándar, que numéricamente es igual al logaritmo de la solicitación de dicha carga (q_0). Asimismo, la ordenada "y" representa el logaritmo de la resistencia de otro material que falla a "n" aplicaciones de la carga estándar, también puede interpretarse como el logaritmo de una solicitación (q_n) producida por una carga mayor que la estándar: con la cual ocurre la falla a la primera aplicación. Para un material cualquiera, relación entre resistencia y el número de aplicaciones

$$Log\Delta q_z = \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad)$$

O sea.

$$Log\Delta q_i \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots$$

Para una capa a la profundidad z, el concepto se generaliza multiplicando la resistencia a esa profundidad por el coeficiente de influencia de Boussinesq (Fz).

La expresión c

$$\sigma_i \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad)$$

En donde A es una constante que debe de determinarse experimentalmente. El coeficiente de Boussinesq para una profundidad z es:

Para la carga estándar:

$$F_z = 1 - \frac{Z^2}{(15^2 + Z^2)^{3/2}} = 1 - \left(1 + \frac{225}{Z^2}\right)^{-3/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

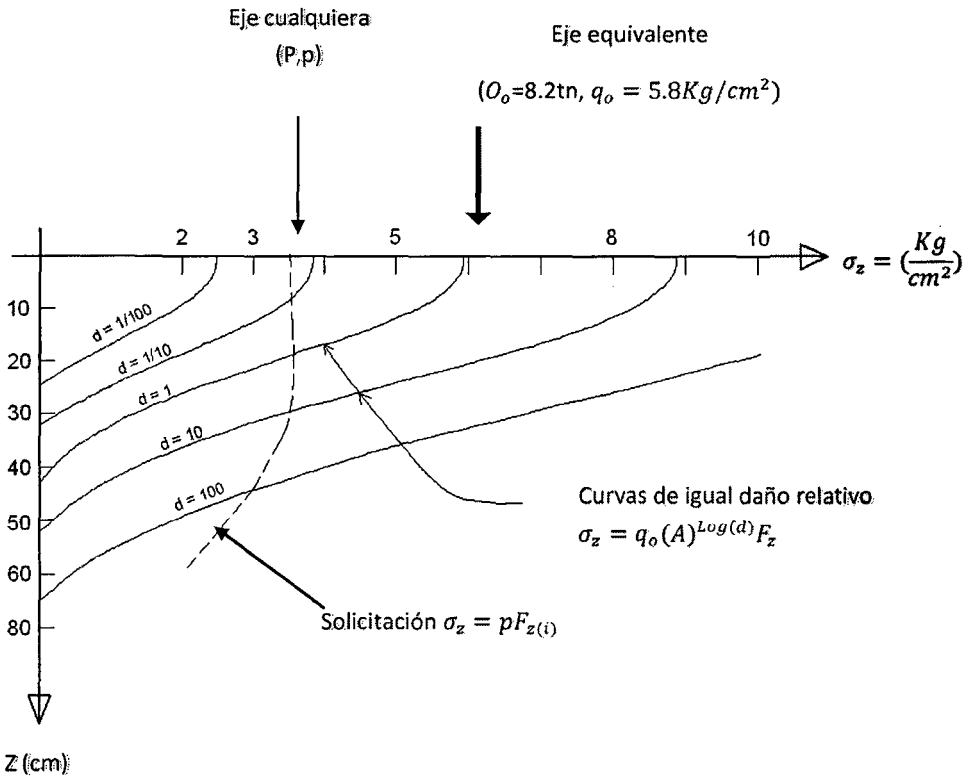
Para una carga (i), cualquiera de radio a_i

$$F_z = 1 - \frac{Z^2}{(a_i^2 + Z^2)^{3/2}} = 1 - \left(1 + \frac{a_i^2}{Z^2}\right)^{-3/2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

Dado que las carreteras están sujetas a la acción de cargas diferentes en cuanto a magnitud y presión de contacto, es necesario ponderar su efecto multiplicando el número de cargas de cada tipo por su correspondiente coeficiente de daño, para establecer un patrón de referencia en términos de cargas estándar o equivalentes. De acuerdo con el modelo desarrollado, dos cargas producen el mismo daño a la profundidad z cuando sus esfuerzos verticales a esa profundidad son iguales. Para obtener el coeficiente de daño d_i producido por un eje cualquiera de peso P y presión de contacto p, con relación al eje equivalente se aplica la ecuación (6) igualando los esfuerzos verticales a la profundidad z la expresión que resulta es:

$$Logd_i = \frac{Log\sigma_{z(i)} - Log\sigma_{z(eq)}}{LogA} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

$$Logd_i = \frac{Log(pF_{z(i)}) - Log(5.8F_z)}{LogA} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$



Es importante hacer notar que el coeficiente de daño varía con la profundidad, variación que depende de las características del eje considerado.

Para ejes simples, la carga puede caracterizarse por una placa circular de radio:

$$a_z = \sqrt{\frac{1000P}{2\pi p}} \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

Para ejes tándem o tridem la ecuación anterior sigue siendo válida para las capas superficiales, en donde se supone que cada uno de los ejes del conjunto doble o triple actúa independientemente; pero no para las

profundas, en donde existe interacción entre los esfuerzos producidos por dichos ejes. En este caso se ha determinado empíricamente que el radio equivalente para los ejes tandem es:

$$a_z = \sqrt{\frac{1111P}{4\pi p}} \ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

Para ejes tridem, el radio equivalente para capas profundas se establece tentativamente como:

$$a_z = \sqrt{\frac{1111P}{4\pi p}} \ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

En las ecuaciones (11), (12) y (13), P es la carga total en toneladas del conjunto de ejes (simples, tándem o tridem), p es la presión de inflado (o de contacto) en kg/cm2 y a_i es el radio en cm.

2.2.9 Datos del Expediente Técnico de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo Puente Santa Rosa - Sachapite

2.2.9.1. Descripción de la vía

La carretera Puente Santa Rosa - Sachapite está ubicada en el Departamento de Huancavelica, es parte de la carretera Huancavelica – Huancayo que es la vía principal que conecta la sierra central.

El tramo se inicia en el Km 00+000 Puente Santa rosa, que es la parte más baja (3601 m.s.n.m.) para llegar a Sachapite, ubicado en el Km 12+000 y cuya altitud es de 4106 m.s.n.m. *(ver planos en anexos)*

La carretera en este tramo tendrá la siguiente sección:

Berma derecha : 1.20 m
Berma izquierda : 1.20 m
Calzada : 6.60 m
Cuneta : 1.00 m

2.2.9.2. Análisis de trafico

En el siguiente cuadro se muestran los volúmenes y clasificación de tráfico vehicular, las cuales se han tomado en cuenta para el diseño de pavimento de la carretera Puente Santa Rosa – Sachapite (tráfico normal, generado y el proyectado).

Tramo	Buses de 2 ejes	Buses de 3 ejes	Camiones de 2 ejes	Camiones de 3 ejes
Puente Santa Rosa – Sachapite	3	1	17	7
Total	3	1	17	7

La tasa de crecimiento anual determinado en el estudio de tráfico para el diseño ha sido del 3%.

Bajo estas consideraciones, se calculó el EAL, obteniéndose los siguientes resultados de número de repeticiones acumuladas.

Tramo	5 Años	10 Años	20 Años
Puente Santa Rosa – Sachapite	204,888	453,224	1'224,415

2.2.9.3. Espesor de capas de la estructura de pavimento

Se tomó la sección del Km 00+000 al Km 12+000, tramo Puente santa Rosa – Sachapite, el cual se encuentra ejecutado, los espesores han sido diseñados para un periodo de 10 años, y es como se muestra:

Carretera Huancavelica – Huancayo	Km 00+000 al Km 12+000
Carpeta TSB (cm)	2.5
Base granular (cm)	20
Sub-Base granular (cm)	25

2.2.10 Consideraciones para el cálculo de coeficiente de daño

Daño

El factor principal que afecta a la estructura de pavimento tanto en la superficie como en sus capas inferiores, es el tráfico quien le aplica cargas con su peso y presión de inflado.

En la actualidad, el peso de los vehículos incluyendo su carga de transporte ha aumentado considerablemente pasando en ocasiones, de la carga permisible por eje sencillo simple (7.00 Ton), eje sencillo dual (11.00 Ton), ejes tándem (18.00 Ton.) y por eje tridem (25.00 Ton.), pudiéndose esto atribuir a las ventajas que ofrecen los fabricantes en cuanto a capacidad de carga de transporte se refiere y a la optimización de la carga por viaje.

Así mismo con el uso excesivo de la llanta radial para vehículos de carga y transporte de pasajeros las presiones de inflado que antes eran de $5.8\ Kg/cm^2 \cong (82\ Lbs/plg^2)$, hoy en día llegan hasta $7.73\ Kg/cm^2 \cong (110\ Lbs/plg^2)$.

2.3 HIPÓTESIS

Hipótesis de investigación

El índice medio diario anual (IMDA) influye significativamente en el deterioro de pavimento flexible de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo puente Santa Rosa – Sachapite.

2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

En el trabajo de investigación se considera lo siguiente

- **Agregado:** Un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria, o la roca triturada usado para ser mezclado en diferente tamaño.

- **Base:** Es la capa de espesor diseñado, constituyente de la estructura del pavimento, destinado fundamentalmente a distribuirá transmitir las cargas originadas por el tránsito a las capas subadyacentes y sobre la cual se coloca la carpeta de rodadura
- **Calzada:** Zona de la carretera destinada a la circulación de vehículos, con ancho suficiente para acomodar un cierto número de carriles para el movimiento de los mismos, excluyéndolos hombros laterales
- **Carpeta o superficie de rodamiento:** La parte superior de un pavimento, por lo general de pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular.
- **Deflexión:** El desplazamiento vertical temporal de un pavimento proveniente de la aplicación de cargas de las ruedas de los vehículos.
- **Berma:** Las áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.
- **Pavimento:** La estructura integral de las capas de Subrasante, sub base, base y carpeta colocado encima de la rasante y destinada a sostener las cargas vehiculares.
- **Subrasante:** Capa de terreno de una carretera, que soportara la estructura del pavimento y que extienda hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.
- **Transito:** Circulación de personas y vehículos por calle, carreteras, etc.

2.5 VARIABLES DE ESTUDIO

El presente estudio considera dentro de las variables

2.5.1. Variable Independiente.

Determinación y evaluación de los coeficientes de daños en el tramo Puente Santa Rosa – Sachapite de la carretera Huancavelica – Huancayo

2.5.2. Variables Dependientes

- Análisis y comparación entre el coeficiente de daño producido por un eje equivalente o unitario y los producidos por los vehículos pesados.
- Obtención del coeficiente de daño producido por vehículos pesados en la estructura del pavimento.
- Análisis y comparación entre el coeficiente de daño producido por un eje equivalente o unitario y los producidos por los vehículos pesados

2.5.3. Variables Intervinientes

Formula de Boussinesq (cálculo de esfuerzos)

Las normas intervinientes serán controlados de acuerdo a las normas vigentes.

2.6 DEFINICIÓN OPERATIVA DE VARIABLE E INDICADORES

2.6.1. Variable independiente.

Un coeficiente de daño define el daño por pasada causado a una estructura de pavimento por un eje vehicular cualquiera.

2.6.2. Variables Dependientes

- Valor numérico que representa la carga transmitida al pavimento por los vehículos.
- Son los esfuerzos que producen dichos vehículos a distintas Profundidades
- Relación que permite evaluar el tipo de daño en el pavimento para determinados vehículos

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 ÁMBITO DE ESTUDIO

El departamento de Huancavelica se encuentra en el centro-sur del Perú, que limita:

Por el norte	: Departamento de Junín
Por el sur	: Departamento de Ica
Por el este	: Departamento de Ayacucho
Por el Noroeste	: Departamento de Lima

3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo al fin que persigue: APLICADA; porque ya existe enfoques teóricos a cerca de las variables.

Así como también se utiliza el tipo sustantivo: Descriptivo-explicativo, que nos permitirá describir las variables y por ende nos ayudara a la explicación de dichas variables, para el mejor entendimiento del problema de investigación.

3.3 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio de investigación arribo hasta un nivel explicativo; porque los estudios correlaciónales tienden a explicar el comportamiento de los fenómenos, así mismo siempre tienden a llegar a una explicación o sustentación.

3.4 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El estudio utilizo los métodos Descriptivo y no experimental.

Descriptivo porque nos permitirá describir a cada una de las variables de estudio, sin alterarla.

No experimental porque se estudia el problema y se analiza sin recurrir a laboratorio.

3.5 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La investigación será fundamentalmente teórica, aplicando la Fórmula de Boussinesq para el cálculo de esfuerzos que produce en los puntos de cualquier vertical trazada en el medio, una sola carga vertical concentrada actuante en la superficie horizontal de un medio semi- infinito, homogéneo, isótropo y linealmente elástico; Teoría de la Elasticidad.

Para obtener los coeficientes de daño para la variedad de vehículos que existen se necesitan calcular los esfuerzos que producen dichos vehículos a distintas profundidades, para esto se recurre a la teoría de Boussinesq, posteriormente, con base en el método de diseño de la normas, se calculan los coeficientes de daño para dichos vehículos.

El diseño de la investigación se grafica de la siguiente manera:

M ----------O ----------A----------E

M = Muestra

O = Observación

A = A n á l i s i s

E = Evaluación

3.6 POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

POBLACIÓN.- Nuestra población está conformada por el tramo Puente Santa Rosa – Sachapite.

MUESTRA.- Se está tomando como muestra los espesores diseñados para el tramo señalado anteriormente.

MUESTREO.- Se considera un muestreo aleatorio simple.

3.7 TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las técnicas para la recolección de datos que se han de utilizar en la ejecución del presente trabajo de investigación serán:

TÉCNICA	INSTRUMENTO
Técnica de análisis documental	Libros y archivos.
Evaluación	Desarrollo de los esfuerzos producidos
Observación	Resultados obtenidos

3.8 PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la recolección de datos se tuvo en cuenta los siguientes pasos:

- Se estructuro los instrumentos de recolección de datos.
- Se sometió a la evolución por expertos (validez subjetiva).
- Se aplicó los instrumentos como prueba piloto (validez objetiva).
- Se aplicó los instrumentos de recolección de datos previa coordinación con las autoridades.
- Por último se organizó los datos captados para su análisis estadístico correspondiente.

3.9 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

- Medidas de tendencia central
- Medidas de dispersión

Análisis e interpretación de datos

- Tabulación de datos
- Interpretación de cuadros estadísticos
- Gráficos estadísticos.

3.10 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

- Modelo hermenéutico. Se procedió al análisis, discusión e interpretación en función a la teoría obtenida en la investigación, reflejando de esta manera la hipótesis planteada.
- Modelo estadístico. Para inferir los resultados a través de la aplicación de la estadística descriptiva e inferencial.

CAPITULO IV: RESULTADOS

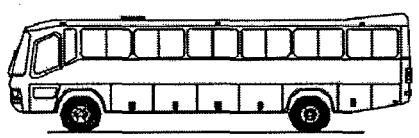
4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 Configuración de vehículos con distintas cargas

Para la obtención del coeficiente de daño se hará el análisis para dos casos: vehículo vacío y vehículo con peso permisible de acuerdo al Reglamento Nacional de Vehículos.

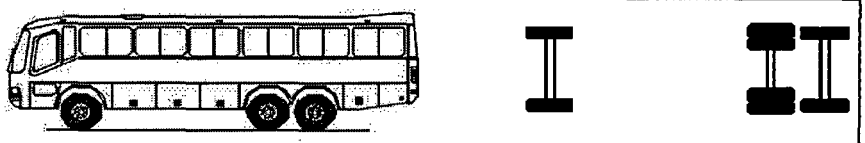
Los tipos de vehículos pesados considerados para el análisis, son los usados en el cálculo del IMDA del Expediente Técnico de Construcción de la Carretera Huancavelica-Huancayo, se muestra a continuación estos vehículos con sus respectivas cargas:

VEHÍCULO B2



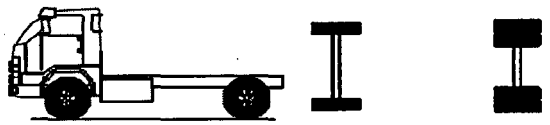
Tipo de solicitación	Peso				Peso bruto (Tn)
	Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores			
		1°	2°	3°	
Peso de vehículo con carga permisible	7	18	---	---	25
Peso de vehículo sin carga	3.5	7	---	---	10.5

VEHÍCULO B3



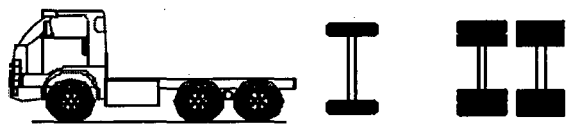
Tipo de solicitación	Peso				Peso bruto (Tn)
	Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores			
		1°	2°	3°	
Peso de vehículo con carga permisible	7	18	---	---	25
Peso de vehículo sin carga	4	8	---	---	12

VEHÍCULO C2



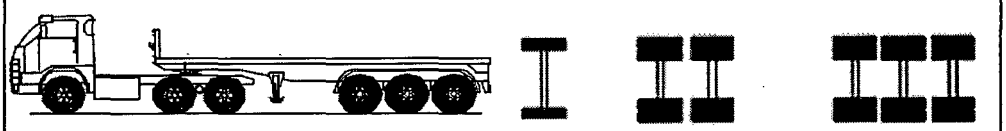
Tipo de solicitación	Peso				Peso bruto (Tn)
	Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores			
		1°	2°	3°	
Peso de vehículo con carga permisible	7	18	---	---	25
Peso de vehículo sin carga	3.5	3	---	---	6.5

VEHÍCULO C3



Tipo de solicitación	Peso				Peso bruto (Tn)
	Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores			
		1°	2°	3°	
Peso de vehículo con carga permisible	7	18	---	---	25
Peso de vehículo sin carga	4	4.5	---	---	8.5

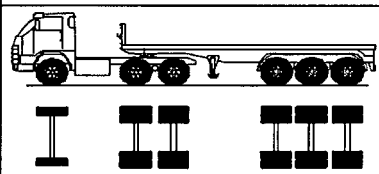
VEHÍCULO T3S3



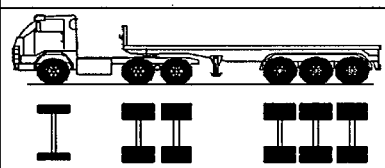
Tipo de solicitación	Peso				Peso bruto (Tn)
	Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores			
		1°	2°	3°	
Peso de vehículo con carga permisible	6	18	24	---	48
Peso de vehículo sin carga	4	4	4	---	12
Peso de vehículo con carga no permisible	7	18	27	---	52

A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo de los esfuerzos y el coeficiente de daño correspondiente al vehículo T3S3; Se toma este vehículo en el análisis ya que según el Reglamento Nacional de Vehículos su configuración vehicular lleva la carga máxima, así también, se hace el análisis excediendo el peso máximo permisible.

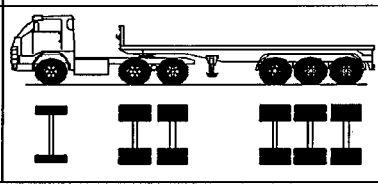
PESO DE VEHÍCULO CON CARGA PERMISIBLE

Configuración Vehicular	Descripción grafica de los Vehículos	Peso Maximo (Tn)					Peso bruto maximo (Tn)
		Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores				
			1°	2°	3°	4°	
T3S3		6	18	24	---	---	48
	PRESION DE INFLADO	7.73	7.73	7.73			

PESO DE VEHÍCULO SIN CARGA

Configuración Vehicular	Descripción grafica de los Vehículos	Peso Maximo (Tn)					Peso bruto (Tn)
		Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores				
			1°	2°	3°	4°	
T3S3		4	4	4	---	---	12

PESO DE VEHÍCULO CON CARGA NO PERMISIBLE

Configuración Vehicular	Descripción grafica de los Vehículos	Peso Maximo (Tn)					Peso bruto (Tn)
		Eje Delantero	Conjunto de ejes posteriores				
			1°	2°	3°	4°	
T3S3		7	18	27	---	---	52

4.1.2 Esfuerzos en la estructura del pavimento.

Eje Unitario o Equivalente

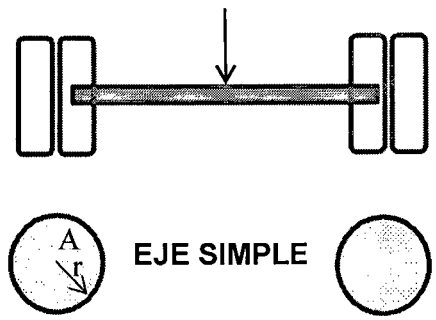
Calculo de esfuerzos producidos por un eje unitario o equivalente:

Carga en el conjunto :$P = 8.20\ Ton$

Presión de inflado :$p = 5.80 \frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.

8.20 Tn



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{8.20}{2} = 4.10\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{4.10}{5.80} = 706.90$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = 15\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 5.80 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 5.774 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 2.459 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.771 \frac{Kg}{cm^2}$$

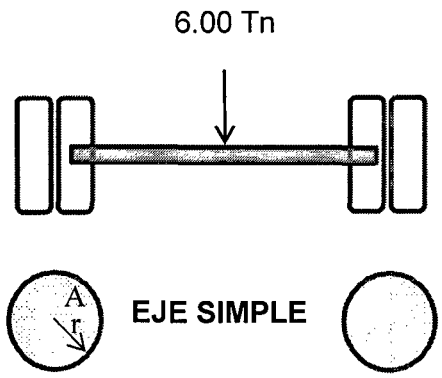
Vehículo T3S3 con carga permisible

a) Eje Simple

Carga en el conjunto $:P = 6.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.730 \frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{6.00}{2} = 3.00\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{3.00}{7.73} = 388.10$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = 15\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.648 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 2.159\frac{Kg}{cm^2}$$

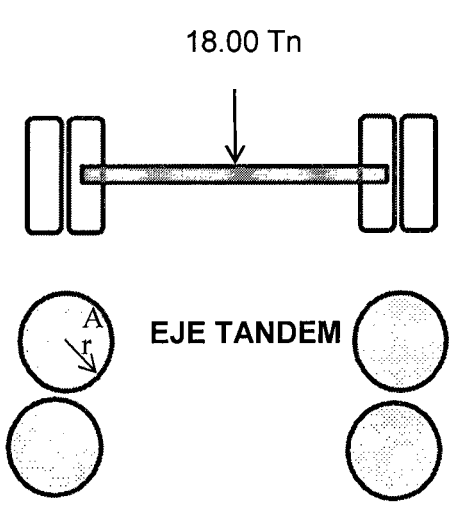
$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.594\frac{Kg}{cm^2}$$

b) Eje Tandem

Carga en el conjunto $:P = 18.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{18.00}{4} = 4.50\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{4.50}{7.73} = 582.15$$

$$A = \pi r^2\ \rightarrow r = 13.61\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.648\frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 2.888\frac{Kg}{cm^2}$$

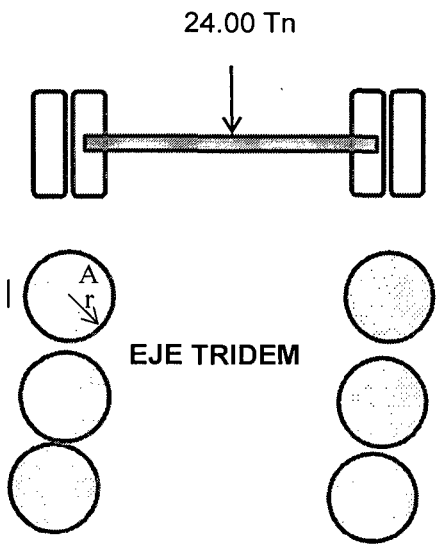
$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.863\frac{Kg}{cm^2}$$

c) Eje Tridem

Carga en el conjunto $:P = 24.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{24.00}{6} = 4.00\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{4.00}{7.73} = 517.46$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = 12.83\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.676 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 2.664 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.775 \frac{Kg}{cm^2}$$

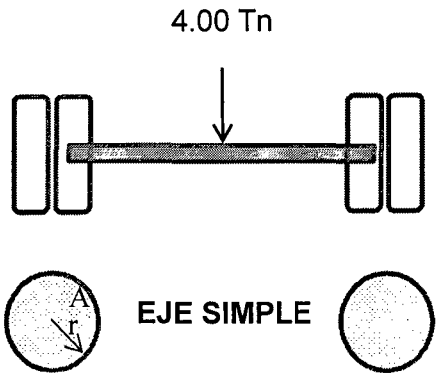
Vehículo T3S3 sin carga

a) Eje Simple

Carga en el conjunto :$P = 4.00\ Ton$

Presión de inflado :$p = 7.730 \frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{4.00}{2} = 2.00\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{2.00}{7.73} = 258.73$$

$$A = \pi r^2\ \rightarrow r = 9.08\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.585 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 1.564 \frac{Kg}{cm^2}$$

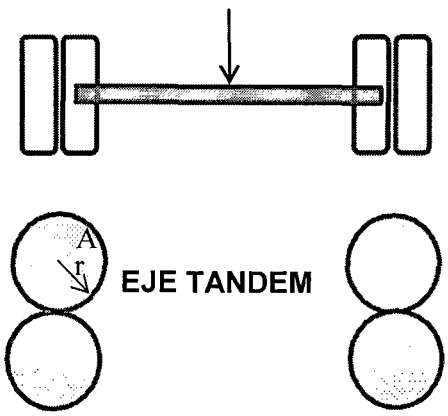
$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.405 \frac{Kg}{cm^2}$$

b) Eje Tandem

Carga en el conjunto $:P = 4.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.730 \frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{4.00}{4} = 1.00\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{1.00}{7.73} = 129.37$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = 6.42\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.36 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.856\frac{Kg}{cm^2}$$

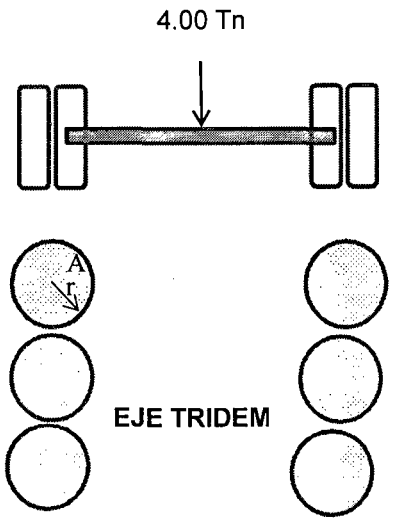
$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.207\frac{Kg}{cm^2}$$

c) Eje Tridem

Carga en el conjunto $:P = 4.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.730\frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{4.00}{6} = 0.67\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{1.00}{7.73} = 86.24$$

$$A = \pi r^2\ \rightarrow r = 5.24\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.113\frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.589\frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.139\frac{Kg}{cm^2}$$

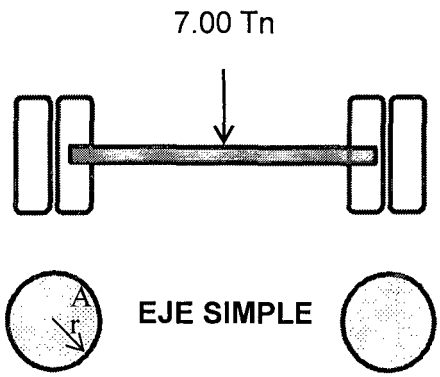
Vehículo T3S3 con carga no permisible

a) Eje Simple

Carga en el conjunto $:P = 7.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{7.00}{2} = 3.50\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{3.50}{7.73} = 452.78$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = 12.01\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.665 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 2.421 \frac{Kg}{cm^2}$$

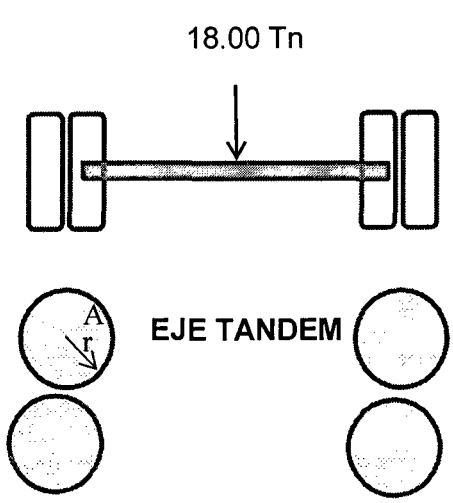
$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.686 \frac{Kg}{cm^2}$$

b) Eje Tandem

Carga en el conjunto $:P = 18.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.730 \frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{18}{4} = 4.50\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{4.50}{7.73} = 582.15$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = 13.61\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.684 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 2.888 \frac{Kg}{cm^2}$$

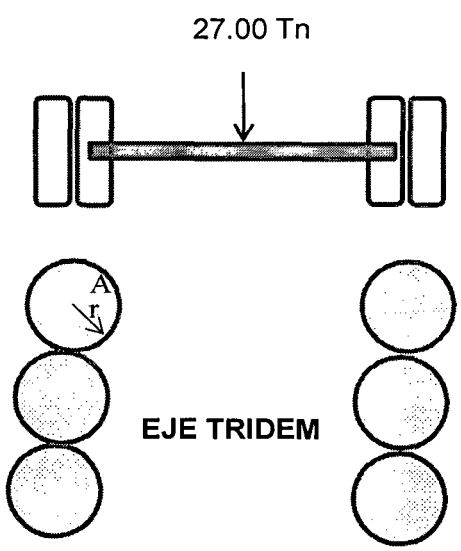
$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.863 \frac{Kg}{cm^2}$$

c) Eje Tridem

Carga en el conjunto $:P = 27.00\ Ton$

Presión de inflado $:p = 7.730 \frac{Kg}{cm^2}$

Considerando la carga en un semi eje y que el sistema dual genera un solo círculo de carga.



Carga del sistema dual indicado

$$P = \frac{27}{6} = 4.50\ ton$$

$$p = \frac{P}{A} \rightarrow A = \frac{P}{p}$$

$$A = \frac{4.50}{7.73} = 582.15$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = 13.61\ cm$$

De la teoría de Boussinesq para el caso del área circular uniformemente cargada.

$$\sigma_z = \omega * \omega_0$$

Donde:

ω = Carga uniformemente repartida (Presión de inflado)

$$\omega_0 = 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1}\right]^{\frac{3}{2}}$$

Para el caso de z=0 el esfuerzo es en la superficie de contacto según la expresión anterior se considera la presión de inflado de los neumáticos, tomando en cuenta que el cociente r/z tiende a infinito, por consiguiente la expresión ω obtiene un valor unitario.

$$Para\ z = 0\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.73 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 2.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 7.684 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 22.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 2.888 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$Para\ z = 47.5\ cm \rightarrow\ \sigma_z = 0.863 \frac{Kg}{cm^2}$$

4.1.3 Calculo de coeficientes de daño

4.1.3.1 Vehículo T3S3 con carga permisible.

Un coeficiente de daño vehicular lo conforma la suma de los daños que producen cada uno de los conjuntos o arreglos del vehículo a una cierta profundidad.

De acuerdo con el criterio de diseño, el daño está dado por:

$$\text{Log}\, d_i = \frac{\text{Log}\, \sigma_{z(i)} - \text{Log}\, \sigma_{z(eq)}}{\text{Log}\, A}$$

d_i = Daño que produce un eje cualquiera con relación al eje equivalente.

$\sigma_{z(i)}$ = Esfuerzo vertical a la profundidad Z que produce el eje del que se quiere obtener el daño.

$\sigma_{z(eq)}$ = Esfuerzo vertical a la profundidad Z que produce el eje unitario o equivalente.

A = Constante experimental = 1.5

Para Z = 0 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 5.80 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = 0.708$$

$$d_1 = 5.11$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.708$$

$$d_2 = 10.221$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.708$$

$$d_3 = 15.331$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 0 cm

$$dt_{(z=0)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=0)} = 30.663$$

Para Z = 2.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 5.77 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = 0.693$$

$$d_1 = 4.934$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.705$$

$$d_2 = 10.137$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.702$$

$$d_3 = 15.331$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 2.5 cm

$$dt_{(z=2.5)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=2.5)} = 30.181$$

Para Z = 22.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 2.46 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = -0.321$$

$$d_1 = 0.477$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.397$$

$$d_2 = 4.988$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.197$$

$$d_3 = 4.725$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 22.50 cm

$$dt_{(z=22.50)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=22.50)} = 10.19$$

Para Z = 47.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 0.77 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = -0.642$$

$$d_1 = 0.228$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.279$$

$$d_2 = 3.802$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.014$$

$$d_3 = 3.101$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 47.50 cm

$$dt_{(z=47.50)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=47.50)} = 7.131$$

4.1.3.2 Vehículo T3S3 sin carga

Un coeficiente de daño vehicular lo conforma la suma de los daños que producen cada uno de los conjuntos o arreglos del vehículo a una cierta profundidad.

De acuerdo con el criterio de diseño, el daño está dado por:

$$\text{Log}\, d_i = \frac{\text{Log}\, \sigma_{z(i)} - \text{Log}\, \sigma_{z(eq)}}{\text{Log}\, A}$$

d_i = Daño que produce un eje cualquiera con relación al eje equivalente.

$\sigma_{z(i)}$ = Esfuerzo vertical a la profundidad Z que produce el eje del que se quiere obtener el daño.

$\sigma_{z(eq)}$ = Esfuerzo vertical a la profundidad Z que produce el eje unitario o equivalente.

A = Constante experimental = 1.5

Para Z = 0 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 5.80 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = 0.708$$

$$d_1 = 5.11$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.708$$

$$d_2 = 10.221$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.708$$

$$d_3 = 15.331$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 0 cm

$$dt_{(z=0)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=0)} = 30.663$$

Para Z = 2.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 5.77 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = 0.673$$

$$d_1 = 4.708$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.599$$

$$d_2 = 7.936$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.0.514$$

$$d_3 = 9.801$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 2.5 cm

$$dt_{(z=2.5)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=2.5)} = 22.445$$

Para Z = 22.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 2.46 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = -1.116$$

$$d_1 = 0.077$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = -2.604$$

$$d_2 = 0.005$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = -3.526$$

$$d_3 = 0.001$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 22.50 cm

$$dt_{(z=22.50)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=22.50)} = 0.082$$

Para Z = 47.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 0.77 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = -1.589$$

$$d_1 = 0.026$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\mathrm{Log}(d_2/2) = -3.244$$

$$d_2 = 0.001$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\mathrm{Log}(d_3/3) = -4.225$$

$$d_3 = 0.0002$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 47.50 cm

$$dt_{(z=47.50)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=47.50)} = 0.027$$

4.1.3.3 Vehículo T3S3 con carga no permisible

Un coeficiente de daño vehicular lo conforma la suma de los daños que producen cada uno de los conjuntos o arreglos del vehículo a una cierta profundidad.

De acuerdo con el criterio de diseño, el daño está dado por:

$$\mathrm{Log}\, d_i = \frac{\mathrm{Log}\, \sigma_{z(i)} - \mathrm{Log}\, \sigma_{z(eq)}}{\mathrm{Log}\, A}$$

d_i = Daño que produce un eje cualquiera con relación al eje equivalente.

$\sigma_{z(i)}$ = Esfuerzo vertical a la profundidad Z que produce el eje del que se quiere obtener el daño.

$\sigma_{z(eq)}$ = Esfuerzo vertical a la profundidad Z que produce el eje unitario o equivalente.

A = Constante experimental = 1.5

Para Z = 0 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 5.80 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = 0.708$$

$$d_1 = 5.11$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.708$$

$$d_2 = 10.221$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.708$$

$$d_3 = 15.331$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 0 cm

$$dt_{(z=0)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=0)} = 30.663$$

Para Z = 2.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 5.77 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = 0.698$$

$$d_1 = 4.994$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.705$$

$$d_2 = 10.137$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.705$$

$$d_3 = 15.205$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 2.5 cm

$$dt_{(z=2.5)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=2.5)} = 30.336$$

Para Z = 22.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 2.46 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log}\, d_1 = -0.038$$

$$d_1 = 0.916$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.397$$

$$d_2 = 4.988$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.397$$

$$d_3 = 7.482$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 22.50 cm

$$dt_{(z=22.50)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=22.50)} = 13.385$$

Para Z = 47.50 cm

$$\sigma_{z(eq)} = 0.77 \frac{Kg}{cm^2}$$

Eje Simple

$$\text{Log } d_1 = -0.289$$

$$d_1 = 0.514$$

Eje Tandem

Se analiza como dos ejes sencillos

$$\text{Log}(d_2/2) = 0.279$$

$$d_2 = 3.802$$

Eje Tridem

Se analiza como tres ejes sencillos

$$\text{Log}(d_3/3) = 0.279$$

$$d_3 = 5.703$$

El daño total del vehículo T3S3 a la profundidad Z = 47.50 cm

$$dt_{(z=47.50)} = d_1 + d_2 + d_3$$

$$dt_{(z=47.50)} = 10.019$$

4.1.3.4 Resultados de esfuerzos (Vehículo T3S3)

VEHÍCULO T3S3 CON CARGA PERMISIBLE			
Eje	Simple	Tandem	Tridem
Peso (Tn)	3.	4.50	4.00
Área (cm2)	388.10	582.15	517.46
Radio (cm)	11.	13.61	12.83
Profundidad (cm)	ESFUERZOS (Kg/cm2)		
0.00	7.	7.73	7.73
2.50	7.6	7.684	7.676
22.50	2.1	2.888	2.664
47.50	0.5	0.863	0.775

VEHÍCULO T3S3 SIN CARGA			
Eje	Simple	Tandem	Tridem
Peso (Tn)	2.	1.00	0.67
Area (cm2)	258.73	129.37	86.24
Radio (cm)	9.	6.42	5.24
Profundidad (cm)	ESFUERZOS (Kg/cm2)		
0.00	7.	7.73	7.73
2.50	7.5	7.360	7.113
22.50	1.5	0.856	0.589
47.50	0.4	0.207	0.139

VEHÍCULO T3S3 CON CARGA NO PERMISIBLE			
Eje	Simple	Tandem	Tridem
Peso (Tn)	3.	4.50	4.50
Area (cm2)	452.78	582.15	582.15
Radio (cm)	12.	13.61	13.61
Profundidad (cm)	ESFUERZOS (Kg/cm2)		
0.00	7.	7.73	7.73
2.50	7.6	7.684	7.684
22.50	2.4	2.888	2.888
47.50	0.6	0.863	0.863

4.1.3.5 Resultados de coeficiente de daño (Vehículo T3S3)

Tipo de Eje	Nº de Ejes	Presión (Kg/cm2)
Simple	1	7.73
Tandem	2	7.73
Tridem	3	7.73
Σ	6	

COEFICIENTE DE DAÑO, VEHÍCULO T3S3 CON CARGA PERMISIBLE				
Carga (Tn)	Z = 0	Z = 2.5	Z = 22.5	Z = 47.5
6	5.11	4.93	0.48	0.23
18	10.22	10.14	4.99	3.80
24	15.33	15.11	4.72	3.10
48	30.66	30.18	10.19	7.13

Tipo de Eje	Nº de Ejes	Presión (Kg/cm2)
Simple	1	7.73
Tandem	2	7.73
Tridem	3	7.73
Σ	6	

COEFICIENTE DE DAÑO, VEHÍCULO T3S3 SIN CARGA				
Carga (Tn)	Z = 0	Z = 2.5	Z = 22.5	Z = 47.5
4	5.11	4.71	0.08	0.03
4	10.22	7.94	0.00	0.00
4	15.33	9.80	0.00	0.00
12	30.66	22.44	0.08	0.03

Tipo de Eje	Nº de Ejes	Presión (Kg/cm2)
Simple	1	7.73
Tandem	2	7.73
Tridem	3	7.73
Σ	6	

COEFICIENTE DE DAÑO, VEHÍCULO T3S3 CON CARGA PERMISIBLE				
Carga (Tn)	Z = 0	Z = 2.5	Z = 22.5	Z = 47.5
6	5.11	4.93	0.48	0.51
18	10.22	10.14	4.99	3.80
24	15.33	15.11	4.72	5.70
52	30.66	30.34	13.39	10.02

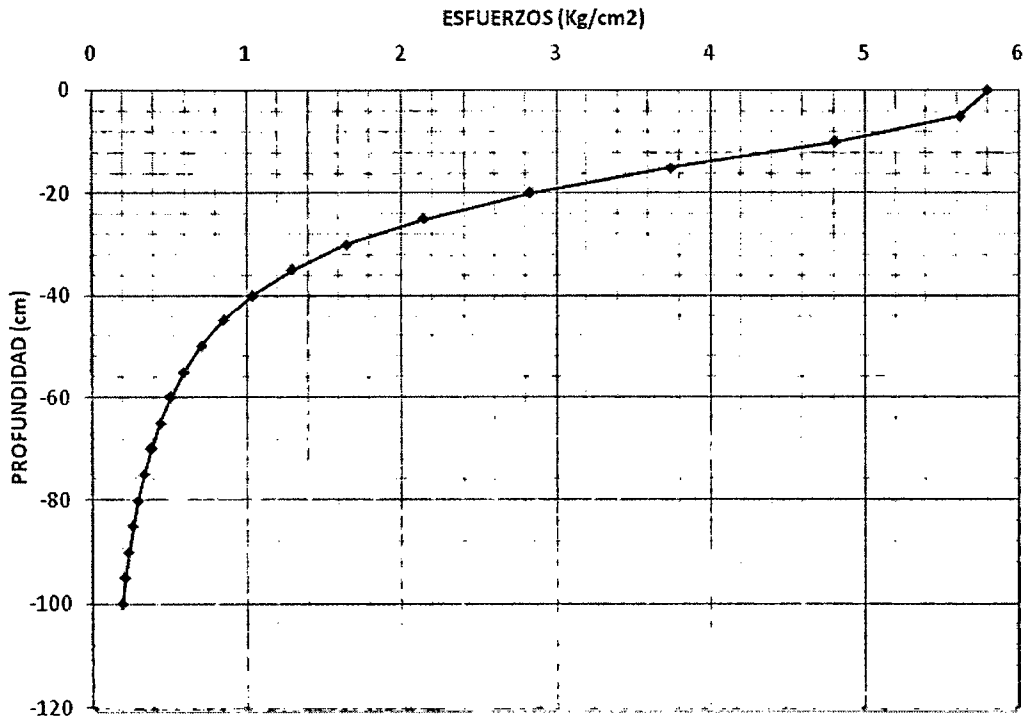
4.1.3.6 Variación de esfuerzos de acuerdo a la profundidad

VARIACIÓN DE ESFUERZOS DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD

$Presion = 5.80\frac{Kg}{cm^2}$ $Peso = 4.10\ Ton$ $Area\ de\ contacto = 706.90cm^2$ $Radio = 15.00cm$ $W = 5.80\frac{Kg}{cm^2}$

Z (cm)	σ
0	5.800
-5	5.617
-10	4.810
-15	3.749
-20	2.830
-25	2.143
-30	1.650
-35	1.296
-40	1.039
-45	0.848
-50	0.703
-55	0.592
-60	0.504
-65	0.434
-70	0.378
-75	0.331
-80	0.293
-85	0.261
-90	0.234
-95	0.210
-100	0.190

EJE UNITARIO



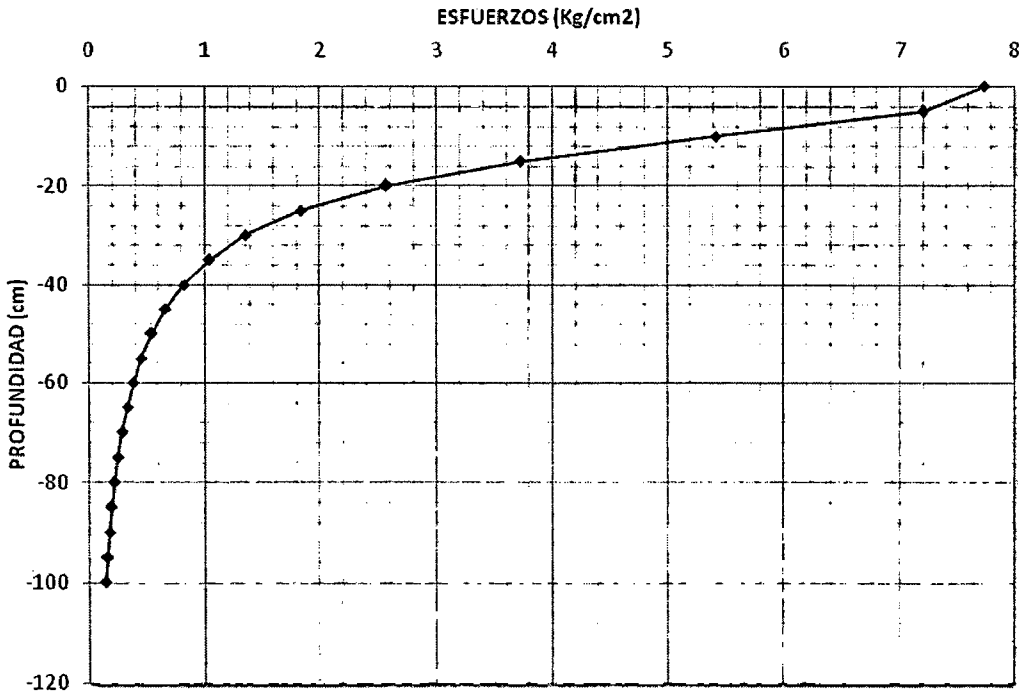
VARIACIÓN DE ESFUERZOS DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD

$Presion = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$ $Peso = 3.00\,Ton$ $Area\ de\ contacto = 388.10cm^2$ $Radio = 11.11cm$ $W = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$

Z (cm)	σ
0	7.730
-5	7.196
-10	5.417
-15	3.721
-20	2.568
-25	1.832
-30	1.356
-35	1.037
-40	0.816
-45	0.657
-50	0.540
-55	0.450
-60	0.381
-65	0.327
-70	0.283
-75	0.248
-80	0.219
-85	0.194
-90	0.174
-95	0.156
-100	0.141

VEHÍCULO T3S3 CON CARGA PERMISIBLE

Eje Simple



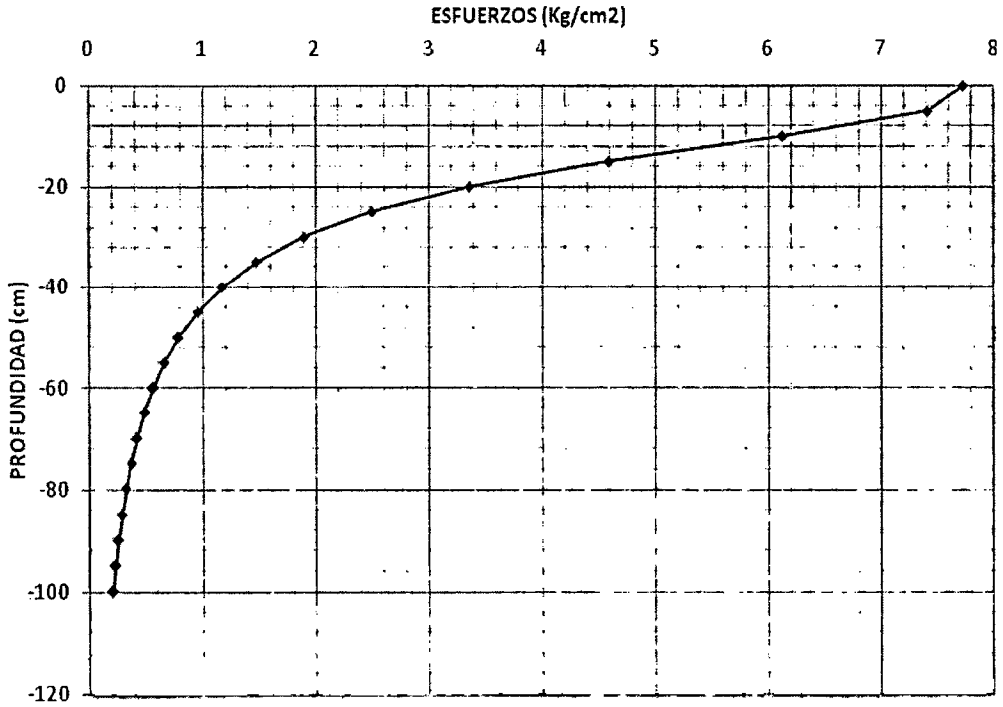
VARIACIÓN DE ESFUERZOS DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD

$Presion = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$ $Peso = 4.50\,Ton$ $Area\ de\ contacto = 582.15cm^2$ $Radio = 13.61cm$ $W = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$

Z (cm)	σ
0	7.730
-5	7.413
-10	6.126
-15	4.591
-20	3.363
-25	2.494
-30	1.893
-35	1.472
-40	1.172
-45	0.951
-50	0.786
-55	0.660
-60	0.561
-65	0.482
-70	0.419
-75	0.367
-80	0.324
-85	0.288
-90	0.258
-95	0.232
-100	0.210

VEHÍCULO T3S3 CON CARGA PERMISIBLE

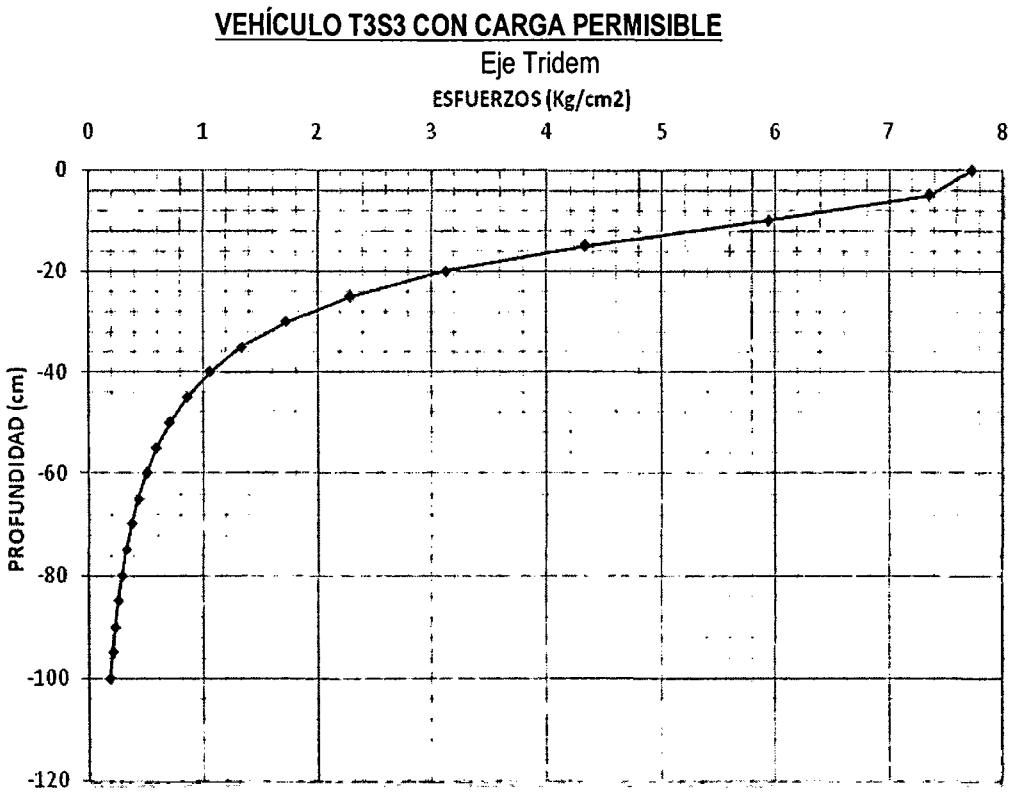
Eje Tandem



VARIACIÓN DE ESFUERZOS DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD

$Presion = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$ $Peso = 4.00\,Ton$ $Area\ de\ contacto = 517.46cm^2$ $Radio = 12.83cm$ $W = 7.73\frac{Kg}{cm^2}$

Z (cm)	σ
0	7.730
-5	7.360
-10	5.935
-15	4.339
-20	3.122
-25	2.288
-30	1.722
-35	1.333
-40	1.057
-45	0.856
-50	0.706
-55	0.591
-60	0.502
-65	0.431
-70	0.374
-75	0.328
-80	0.289
-85	0.257
-90	0.230
-95	0.207
-100	0.187



24

4.2 DISCUSIÓN

La estructura del pavimento de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo Puente Santa – Sachapite, ha sido diseñada siguiendo la metodología de diseño de la AASTHO, tomando en cuenta los parámetros básicos siguientes:

- Demanda del tránsito medida en números de ejes equivalentes para el período de diseño del pavimento.

- Tipo de subrasante sobre el cual se asienta el pavimento

Un pavimento flexible como es el del presente caso, si no es adecuadamente mantenido se deteriora lenta e imperceptiblemente durante los primeros 8 a 10 años de su vida dependiendo del tránsito, normas de diseño, condiciones climáticas, métodos constructivos y materiales empleados. Después de ese "período de gracia" se deteriora mucho más rápidamente y sin un mantenimiento oportuno, se desintegra.

Teniendo en cuenta el análisis del tráfico (acápite 2.2.9.2), el vehículo de diseño es el C3, con un peso bruto de 25 toneladas de carga permisible y de 8.5 toneladas sin carga. El espesor de la estructura de pavimento es de 47.5 cm, con un espesor de carpeta asfáltica de 2.5 cm (acápite 2.2.9.3).

Sin embargo, debido a que en la actualidad se tienen vehículos del tipo T3S3 transitando por la referida vía, que provocan serios daños a la superficie de rodadura (tal como puede observarse en el anexo D), es obvio que existe la necesidad de controlar el peso de carga, siendo el peso vehicular promedio muy por encima de lo permitido lo que al calcular los coeficientes de daño, estos producen un daño considerablemente grande a la estructura del pavimento, con relación a los permisibles.

Consecuentemente los Coeficientes de Daño (CD) obtenidos distan mucho del producido por un eje unitario o equivalente, tal como se muestran en los cuadros 1, 2, 3, 4 y 5 en el Anexo C.

Para el caso del vehículo B2 (Cuadro 1 - Anexo C) con carga permisible según RNV y presión de inflado según el AASHTO, se produce un CD igual a 2 en la superficie de pavimento al igual que a una profundidad de 2.5 cm, esto implica que no exceden al producido por un eje unitario o equivalente, en las subsiguientes profundidades el CD se incrementa y por tanto será causante de mayor daño; al elevarse la presión de inflado y con la misma carga permisible, el CD se incrementa aproximadamente 10 veces en la superficie de rodadura al igual que a una profundidad de 2.5 cm, esto implica que este vehículo causará mayor daño del producido por un eje unitario o equivalente, lo mismo ocurre al considerar igual presión de inflado y sin carga.

A una profundidad de 22.5 cm sucede casi lo mismo que en la superficie de pavimento, en las sucesivas capas inferiores de la estructura de pavimento el CD disminuye, pero no llegando al producido por el eje unitario o equivalente para el caso de un vehículo con carga permisible y con presión de inflado igual a 7.73 kg/cm^2; para el caso de un vehículo sin carga o vacío y presión de inflado igual al caso anterior el CD obtenido es inferior al causado por el eje unitario o equivalente.

En el análisis de los siguientes vehículos los CD producidos dan un esquema similar al descrito para el primer vehículo.

Para el caso del vehículo T3S3 (Cuadro 5 – Anexo C) con carga no permisible los CD obtenidos superan en todas las capas de la estructura de pavimento al producido por el eje unitario o equivalente, excepto a una profundidad de 22.5 cm y 47.5 cm para el caso vacío, en estas capas los daños son menores a 1.

Los esfuerzos obtenidos en la superficie de contacto hasta la profundidad de 2.5 cm, para distintos tipos de vehículos superan en todos los casos al esfuerzo

calculado para el eje unitario, teniendo mucha incidencia la presión de inflado de las llantas.

Al correlacionar los resultados de los Coeficientes de Daño producidos entre un eje equivalente y los producidos por los vehículos pesados, se observa que los primeros son superados en todos los casos cuando se trata de vehículos con carga permitida y no permitida.

Con estos resultados se prevé que la carpeta asfáltica no cumplirá con su periodo de diseño.

Durante la inspección realizada a la vía asfaltada Huancavelica – Huancayo, tramo Puente Santa Rosa - Sachapite, se pudo observar una serie de daños ocasionados en la estructura del pavimento que ha sido culminada hace año y medio, sin embargo los daños ocasionados por los vehículos tipo C3 (que es el que se pudo verificar durante la inspección, ver foto), se están haciendo cada vez peores.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los resultados de los coeficientes de daño para un vehículo bajo carga máxima, la vida de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo Puente Santa Rosa – Sachapite probablemente sería menor que la proyectada, debido a la mayor cantidad de ejes equivalentes que sobre el pasarían. Aun cuando el trafico mezclado esperado este correcto, al diseñar con los coeficientes de daño para vehículos vacíos y con cargas permisibles al convertirlos a ejes equivalentes, no se estarían considerando todos los ejes equivalentes que produce la carga extra de los vehículos con carga mayor a la permisible.

2. Las causas que proceden de la presión de inflado y la explotación excesiva de la capacidad de carga de los vehículos, viene a ser los factores de principal perjuicio a la estructura de pavimento de una carretera.

3. En lo que respecta al parque automotor, el aumento de vehículos es considerable, lo cual conlleva a que una carretera presente fallas antes de cumplir con su vida de diseño.

4. En muchas carreteras de nuestro país, el peso vehicular promedio está muy por encima de lo permitido, por lo que al calcular los Coeficientes de Daño, estos producen un daño considerablemente a la estructura del pavimento, con relación a los permisibles.

5. Lo anterior nos lleva a analizar la hipótesis de diseño que se refiere a que la carretera más económica es aquella que tiene una resistencia

6. relativa uniforme en todas sus capas y llega a una falla funcional cuando ha soportado el número de aplicaciones de carga equivalente (ΣL) especificadas para la vida del proyecto.

7. Según la inspección realizada de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo Puente Santa Rosa – Sachapite presenta varios tipos de fallas como son:

- Falla por fisuras y grietas: fatigamiento, reflejadas, longitudinales y transversales.
- Deterioro superficial: parches deteriorados, baches en carpetas asfálticas, ahuellamiento, exudaciones, desgaste, pérdida de áridos, ondulaciones y deformación transversal.
- Otros deterioros: descenso de la berma, surgencia, finos y agua, separación entre berma y pavimento.

8. Con respecto a los trabajos realizados en el sector Puente Santa Rosa – Sachapite, alguna de las técnicas empleadas en la reparación de pavimento no fue la adecuada ya que no emplearon los criterios adecuados al tipo de falla con su solución respectiva y los trabajos efectuados tiene que tener mayor inspección.

9. Es necesario determinar primero la causa que produjo el daño en el pavimento, para poder realizar una reparación correcta, pudiendo evitar así una recurrencia.

10. Aun no se toma conciencia de que hacer mantención o conservación de pavimentación es mucho más barato que reparar el mismo pavimento; además se puede ofrecer más serviciabilidad y confortabilidad a los conductores.

11. Los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluye que son confiables ya que se siguió una metodología que está respaldada por muchas investigaciones.

RECOMENDACIONES

1. Aunque la carga máxima por eje esta normalizado por el Reglamento Nacional de Vehículos, es obvio que existe una necesidad de controlar el peso de carga y aplicar la tolerancia cero en todos los vehículos que circulan por nuestras carreteras.

2. Para efectos de diseño, aun cuando no exista un control del peso de vehículos permisible en el Reglamento Nacional de Vehículos es recomendable la utilización de vehículos bajo carga promedio, que viene a ser una mejor opción y obtener con ello un diseño más real de una estructura de pavimento. De lo contrario existiendo un control de peso en los vehículos de carga, los Coeficientes de Daño para solicitaciones de carga permisible, son recomendables. Cabe aclarar que el Coeficientes de Daño obtenido bajo carga máxima, no es representativo para realizar el diseño de una estructura de pavimento, pero establecen una idea de la explotación excesiva de las carreteras en nuestra región y en todo el país.

3. Tan pronto ha sido determinada la necesidad de hacer reparaciones, estos deben hacerse inmediatamente, ya que los pavimentos continúan deteriorándose día a día, produciendo así una conducción peligrosa.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Juárez Badillo Eulalio, Rico Rodríguez Alfonso, "Mecánica de Suelos", Tercera Edición, Volumen II, Editorial Limusa, México 1998.

2. Braja M. Das, "Principios de la Ingeniería de Cimentaciones", International Thomson Editores, Cuarta Edición 2001.

3. Expediente Técnico: "Rehabilitación de la Carretera Izcuchaca - Huancavelica, tramo Puente Santa Rosa - Sachapite"

4. Ley Nº 27181, Ley General de Transporte y Tránsito Terrestre.

5. D.S. Nº 034-2001-MTC, Reglamento Nacional de Vehículos.

6. Manual del Método de Diseño del Instituto de Ingeniería para el cálculo del coeficiente de daño en pavimentos flexibles.

7. Manual de Diseño de Pavimentos Flexibles del Instituto del Asfalto y AASTHO.

8. Jose Rafael Menendez Acurio "Ingeniería de pavimentos"

9. Nicholas J. Garber, Lester A. Hoel, "Ingeniería de Tránsito y carreteras", Tercera Edición, Universidad de Virginia, México 2004.

ANEXOS

ANEXO A

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVO	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Problema General ¿En qué medida la determinación de los daños producidos por los vehículos en la estructura del pavimento de la carretera Huancavelica - Huancayo, tramo Puente Santa Rosa - Sachapite, en el Departamento de Huancavelica, permitirá evaluar los coeficientes de los daños y prever si el pavimento cumplirá con su periodo de diseño?	**Objetivo General** Evaluar el coeficiente de daño que se producirá al transitar vehículos pesados en la estructura de un pavimento flexible, con este valor prever si éste cumplirá con su periodo de diseño. **Objetivos Específicos** - Obtener los esfuerzos a diferentes profundidades en las diversas capas de la estructura de pavimento flexible. - Obtener el coeficiente de daño producido por vehículos pesados en la estructura de pavimento. - Análisis y comparación entre el coeficiente de daño producido por un eje equivalente o unitario y los producidos por los vehículos pesados.	**Antecedentes internacionales** Se tiene conocimiento de un trabajo elaborado en Colombia denominado "Diagnóstico de vía existente y diseño del pavimento flexible de la vía nueva mediante parámetros obtenidas en la fase 1 de la vía Acceso al Barrio Ciudadela del Café – Vía La Badea", en el cual emplean la Teoría de Boussinesq para calcular el estado de esfuerzos en una masa de suelo a cualquier profundidad y determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento. **Antecedentes nacionales** No se pudo determinar los trabajos existentes en este contexto. **Antecedentes locales** Existen algunos trabajos aislados sobre el particular del tema pero aun no registrados.	**Hipótesis Ho:** El índice medio diario anual (IMDA) influye significativamente en el deterioro de pavimento flexible de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo puente Santa Rosa – Sachapite. **Hipótesis H1:** El índice medio diario anual (IMDA) no influye significativamente en el deterioro de pavimento flexible de la carretera Huancavelica – Huancayo, tramo puente Santa Rosa – Sachapite	**Variable Dependiente.** Determinación y evaluación de los coeficientes de daños en el tramo Puente Santa Rosa – Sachapite de la carretera Huancavelica - Huancayo **Variable independiente.** - Análisis y comparación entre el coeficiente de daño producido por un eje equivalente o unitario y los producidos por los vehículos pesados. - Obtención del coeficiente de daño producido por vehículos pesados en la estructura del pavimento. - Análisis y comparación entre el coeficiente de daño producido por un eje equivalente o unitario y los producidos por los vehículos pesados	**Tipo de investigación** Aplicada. **Nivel de investigación** Explicativo **Diseño de investigación.** Explicativo – correlacional **M ---- O ---- A ----- E** M : Muestra O: Observación. A: Análisis. E: Evaluación. **Población y muestra** **Población.-** Nuestra población está conformada por el tramo Puente Santa Rosa – Sachapite. **Muestra.-** Se está tomando como muestra los espesores diseñados para el tramo señalado anteriormente.

ANEXO B

RESUMEN FINAL DE ESFUERZOS

TIPO DE VEHÍCULO		B2		B3		C2		C3		T3S3		
VEHÍCULO CON CARGA PERMISIBLE	Eje	Simple	Simple	Simple	Tandem	Simple	Simple	Simple	Tandem	Simple	Tandem	Tridem
	Peso (Tn)	3.50	5.50	3.50	4.00	3.50	5.50	3.50	4.50	3.00	4.50	4.00
	Área (cm2)	452.78	711.51	452.78	517.46	452.78	711.51	452.78	582.15	388.10	582.15	517.46
	Radio (cm)	12.01	15.05	12.01	12.83	12.01	15.05	12.01	13.61	11.11	13.61	12.83
	Prof. (cm)	ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		
	0.00	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73
	2.50	7.66	7.70	7.66	7.68	7.66	7.70	7.66	7.68	7.65	7.68	7.68
	22.50	2.42	3.29	2.42	2.66	2.42	3.29	2.42	2.89	2.16	2.89	2.66
	47.50	0.69	1.03	0.69	0.78	0.69	1.03	0.69	0.86	0.59	0.86	0.78
VEHÍCULO SIN CARGA	Eje	Simple	Simple	Simple	Tandem	Simple	Tandem	Simple	Tandem	Simple	Tandem	Tridem
	Peso (Tn)	1.75	3.50	2.00	2.00	1.75	1.50	2.00	1.13	2.00	1.00	0.67
	Área (cm2)	226.39	452.78	258.73	258.73	226.39	194.05	258.73	145.54	258.73	129.37	86.24
	Radio (cm)	8.49	12.01	9.08	9.08	8.49	7.86	9.08	6.81	9.08	6.42	5.24
	Prof. (cm)	ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		ESFUERZOS (Kg/cm2)		
	0.00	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73
	2.50	7.56	7.66	7.59	7.59	7.56	7.51	7.59	7.41	7.59	7.36	7.11
	22.50	1.40	2.42	1.56	1.56	1.40	1.23	1.56	0.95	1.56	0.86	0.59
	47.50	0.36	0.69	0.40	0.40	0.36	0.31	0.40	0.23	0.40	0.21	0.14

VEHÍCULO CON CARGA	Eje	Simple	Tandem	Tridem
	Peso (Tn)	3.50	4.50	4.50
	Área (cm2)	452.78	582.15	582.15
	Radio (cm)	12.01	13.61	13.61
	Prof. (cm)	ESFUERZOS (Kg/cm2)		
	0.00	7.73	7.73	7.73
	2.50	7.66	7.68	7.68
	22.50	2.42	2.89	2.89
	47.50	0.69	0.86	0.86

ANEXO C

RESUMEN FINAL DE COEFICIENTES DE DAÑO

VEHÍCULO CON CARGA PERMISIBLE

B2

Tipo de eje	Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
Simple	7	5.11	4.99	0.92	0.51
Simple	11	5.11	5.11	5.23	5.28
Σ	18	10.22	10.11	6.15	5.80

B3

Tipo de eje	Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
Simple	7	5.11	4.99	0.92	0.51
Tandem	16	10.22	10.07	3.15	2.07
Σ	23	15.33	15.07	4.07	2.58

G2

Tipo de eje	Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
Simple	7	5.11	4.99	0.92	0.51
Simple	11	5.11	5.11	5.23	5.28
Σ	18	10.22	10.11	6.15	5.80

G3

Tipo de eje	Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
Simple	7	5.11	4.99	0.92	0.51
Tandem	18	10.22	10.14	4.99	3.80
Σ	25	15.33	15.13	5.90	4.32

T3S

Tipo de eje	Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
Simple	6	5.11	4.93	0.48	0.23
Tandem	18	10.22	10.14	4.99	3.80
Tridem	24	15.33	15.11	4.72	3.10
Σ	48	30.66	30.18	10.19	7.13

VEHÍCULO CON CARGA NO PERMISIBLE

T3S

Tipo de eje	Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
Simple	7	5.11	4.99	0.92	0.51
Tandem	18	10.22	10.14	4.99	3.80
Tridem	27	15.33	15.20	7.48	5.70
Σ	52	30.66	30.34	13.39	10.02

VEHÍCULO SIN CARGA

B2

Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
3.5	5.11	4.60	0.04	0.01
7	5.11	4.99	0.92	0.51
10.5	10.22	9.60	0.96	0.53

B3

Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
4	5.11	4.71	0.08	0.03
8	10.22	9.42	0.15	0.05
12	15.33	14.12	0.23	0.08

G2

Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
3.5	5.11	4.60	0.04	0.01
3	5.11	4.46	0.02	0.01
6.5	10.22	9.07	0.06	0.02

G3

Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
4	5.11	4.71	0.08	0.03
4.5	10.22	8.27	0.01	0.00
8.5	15.33	12.97	0.09	0.03

T3S3

Carga (Tn)	Profundidad Z (cm) 0	2.5	22.5	47.5
4	5.11	4.71	0.08	0.03
4	10.22	7.94	0.00	0.00
4	15.33	9.80	0.00	0.00
12	30.66	22.44	0.08	0.03

ANEXO D

COMPARACIÓN DE COEFICIENTES DE DAÑO

CUADRO N° 01

VEHÍCULO B2		Profundidad (cm)			
		0	2.5	22.5	47.5
Coeficiente de daño	P (permisible), p = 5.8 kg/cm²	2.00	2.00	3.23	4.73
	P (permisible), p = 7.73 kg/cm²	10.22	10.11	6.15	5.80
	P (vacío), p = 7.73 kg/cm²	10.22	9.60	0.96	0.53

CUADRO N° 02

VEHÍCULO B3		Profundidad (cm)			
		0	2.5	22.5	47.5
Coeficiente de daño	P (permisible), p = 5.8 kg/cm²	3.00	2.99	2.39	2.21
	P (permisible), p = 7.73 kg/cm²	15.33	15.07	4.07	2.58
	P (vacío), p = 7.73 kg/cm²	15.33	14.12	0.23	0.08

CUADRO N° 03

VEHÍCULO C2		Profundidad (cm)			
		0	2.5	22.5	47.5
Coeficiente de daño	P (permisible), p = 5.8 kg/cm²	2.00	2.00	3.23	4.73
	P (permisible), p = 7.73 kg/cm²	10.22	10.11	6.15	5.80
	P (vacío), p = 7.73 kg/cm²	10.22	9.07	0.06	0.02

CUADRO N° 04

VEHÍCULO C3		Profundidad (cm)			
		0	2.5	22.5	47.5
Coeficiente de daño	P (permisible), p = 5.8 kg/cm²	3.00	3.00	3.33	3.64
	P (permisible), p = 7.73 kg/cm²	15.33	15.13	5.90	4.32
	P (vacío), p = 7.73 kg/cm²	15.33	12.97	0.09	0.03

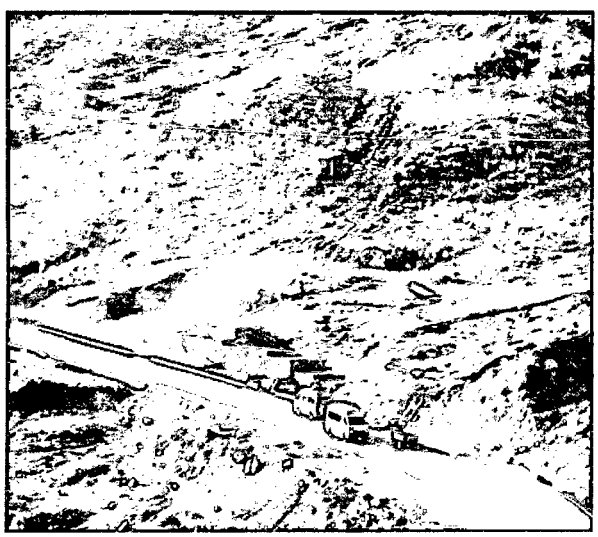
CUADRO N° 05

VEHÍCULO T3S3		Profundidad (cm)			
		0	2.5	22.5	47.5
Coeficiente de daño	P (permisible), p = 5.8 kg/cm²	6.00	5.99	5.82	6.04
	P (permisible), p = 7.73 kg/cm²	30.66	30.18	10.19	7.13
	P (vacío), p = 7.73 kg/cm²	30.66	22.44	0.08	0.03
	P (no permisible), p = 7.73 kg/cm²	30.66	30.34	13.39	10.02

ANEXO E

GALERÍA DE FOTOS

Inicio de inspección, tramo Km 72+000 vamos a representar como punto de inicio 00+00 al km 12+000



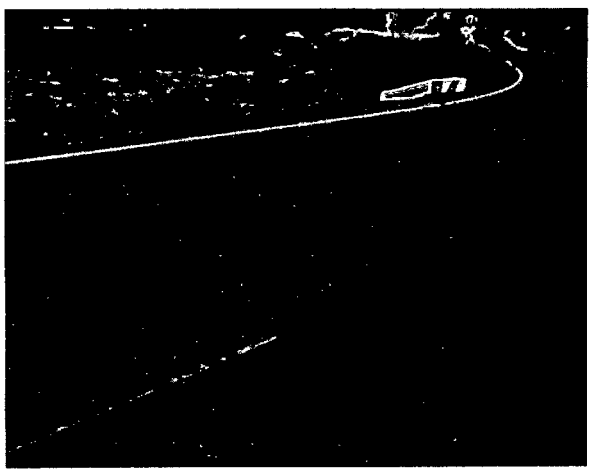
Vehículos menores que generalmente transitan por la vía.

Vista panorámica del tramo a inspeccionar.

Desgaste de la estructura del pavimento.

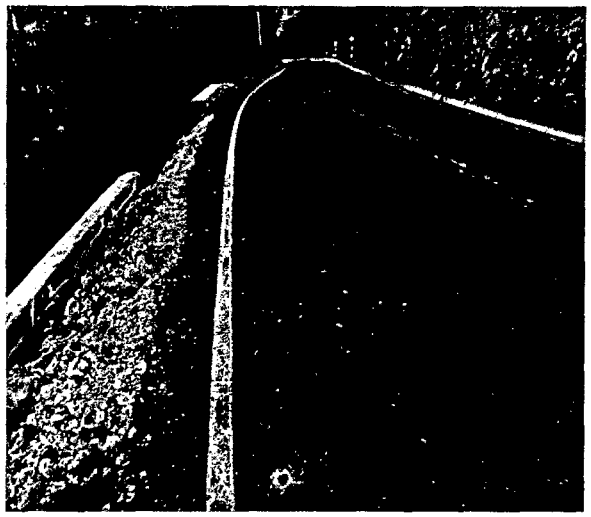
Km 04+600. Nótese el espesor de la carpeta asfáltica.

Espesor del pavimento menor de 2.5 cm.

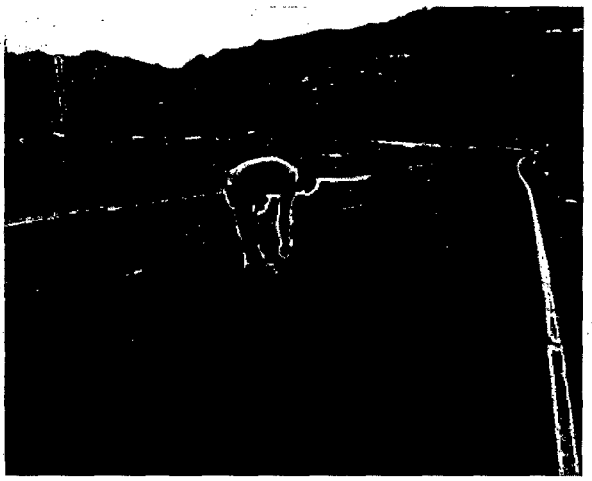


Pavimento refaccionado.

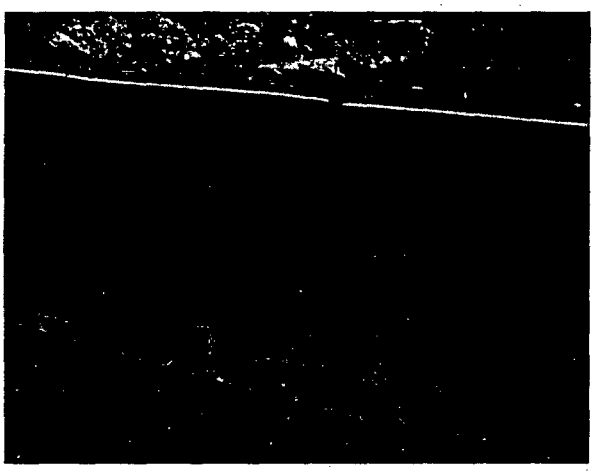
Pavimento con fracturas.



Existencia de ahuellamiento localizada sobre la trayectoria de los neumáticos de los vehículos.



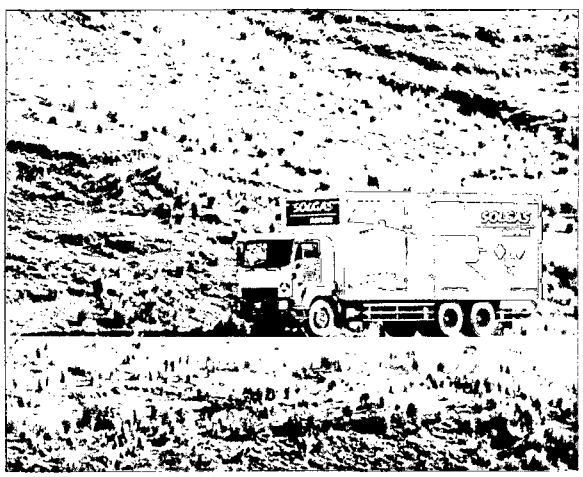
Pavimento con fracturas.



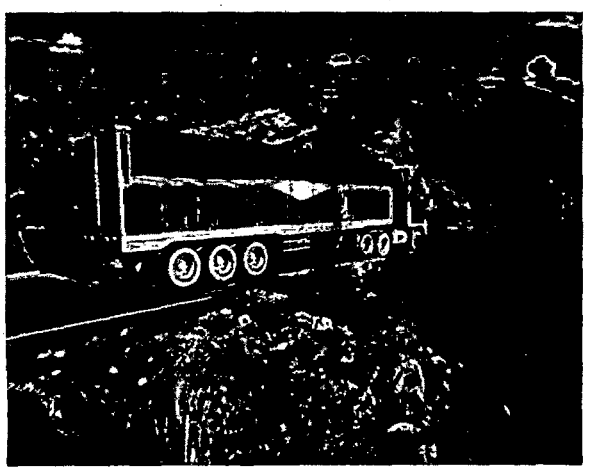
Pavimento con fracturas

Vehículo de eje simple que transita por la vía Huancavelica – Huancayo.

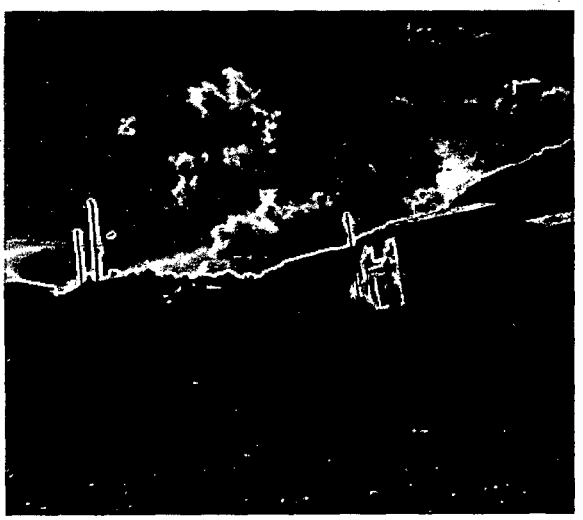
Vehículo de eje simple que transita por la vía Huancavelica – Huancayo.



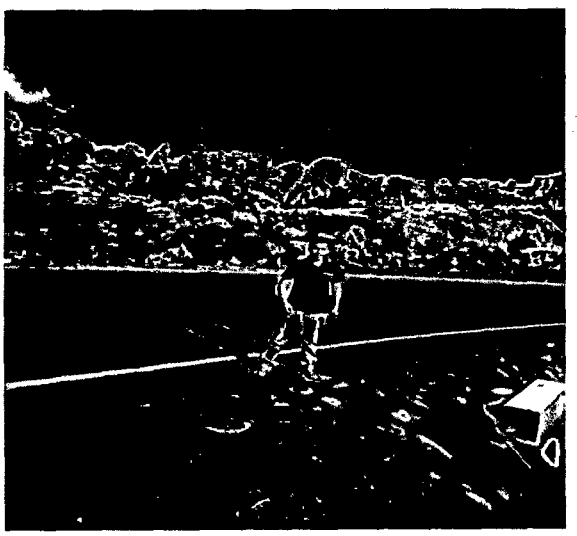
Vehículo de eje tandem que transita por la vía Huancavelica – Huancayo.



Vehículo de eje tridem que transita por la vía Huancavelica – Huancayo.



Centro Poblado de Sachapite Km. 12+000



Piedra de bosques de Sachapite

ANEXO F

PLANOS