

Los cuencos de deflexión en estructuras de pavimentos flexibles

Deflection Bowls, in the Flexible Pavements' Structures

Carlos Hernando Higuera Sandoval*

Resumen

Las cargas impuestas por el tránsito sobre las estructuras elásticas de pavimento flexible generan los denominados cuencos de deflexión, que inciden en el funcionamiento estructural y funcional de una estructura de pavimento flexible y, por lo tanto, en su vida útil. El objeto del presente trabajo es mostrar el efecto de la carga máxima del camión tipo tractor -remolque C3S3- en la deflexión de una estructura de pavimento flexible y modelar su correspondiente cuenco de deflexión en un sistema de tres dimensiones. El análisis de la deflexión se hace teniendo en cuenta una estructura de pavimento flexible de referencia, constituida por una capa de rodadura asfáltica, una capa de base granular y una capa de subbase granular, apoyado todo el paquete estructural sobre la subrasante. Para la modelación de los cuencos de deflexión se utilizó el programa BISAR 3.0 de la SHELL, que permite calcular los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cualquier punto de la estructura del modelo estructural de pavimento flexible. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones que deben tenerse en cuenta en el diseño estructural y funcional de una estructura de pavimento.

Este artículo hace parte de la investigación sobre el comportamiento de la deflexión en función de los parámetros de diseño de una estructura de pavimento, que viene adelantando el autor en la Escuela de Transporte y Vías, Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial - GRINFRAVIAL-.

Palabras clave: Deflexión, Cuencos de deflexión, Diseño de pavimentos.

Abstract

The loads imposed by traffic on the elastic structures of flexible pavement, generate the denominated deflection bowls, which impact in the structural and functional operation of a flexible pavement structure and therefore in their useful life. The objective is to show the peak load effect of the tractor type truck C3S3 trailer, in the deflection of a flexible pavement structure and to model its corresponding deflection bowl in a three dimensional system. The deflection analysis is made by taking into account a structure of the reference flexible pavement, made up by an asphalt rolled layer, a granular base layer, and a granular sub-base layer, being the whole structural package placed on the subgrade.

For the deflection bowls' modeling, the program used was SHELL'S BISAR 3.0, which allows to calculate the stress, the strains and the deflections in any point of the flexible pavement's structural pattern. Finally, some recommendations are presented that should be taken into account in the structural and functional design of a pavement structure.

This article is part of the investigation on The functional deflection's behavior of the pavement structure design's parameters, that is being developed by the author in the Transport and Roads School, Engineering Faculty of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, in the Research and Development Group in Vial Infrastructure -GRINFRAVIAL-.

Key words: Deflection, Deflection Bowls, Design of Pavements.

* Ingeniero en Transportes y Vías, Especialista en Vías Terrestres, Especialista en Carreteras, Especialista en Transportes Terrestres, Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres, Profesor de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Investigador del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GRINFRAVIAL, chiguera@tunja.uptc.edu.co

1. Introducción

El presente artículo muestra los diferentes procedimientos para calcular la deflexión en un modelo estructural de pavimento flexible. Se analiza de manera sucinta el concepto de deflexión, la utilidad de esta, las características de un cuenco de deflexión, los diferentes métodos utilizados para calcular la deflexión, los equipos más utilizados en nuestro medio para medirla y, finalmente, se presenta una aplicación de las teorías y los procedimientos de cálculo para la modelación del cuenco de deflexión del camión C3S3. Para la modelación se utilizó el programa BISAR 3.0 de la SHELL. Los resultados de la modelación permiten concluir la magnitud de la deflexión que se produce por la aplicación de las cargas estáticas de los vehículos sobre una estructura de pavimento flexible, información muy importante para los ingenieros de diseño de estructuras de pavimento.

2. Concepto de deflexión

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga vertical externa. También se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente la carga es producida por el tránsito vehicular. Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo la aplicación de esta, produciendo una deflexión máxima, sino que también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenco de deflexión [1].

La deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de manera que, en un modelo estructural, si la deflexión es alta, la capacidad estructural del modelo de pavimento es débil o deficiente, y lo contrario, si la deflexión es baja quiere decir que el modelo estructural del pavimento tiene buena capacidad estructural.

El conocimiento de las deflexiones bajo la acción de las cargas es de gran utilidad para el ingeniero de diseño, por cuanto los pavimentos pueden ser concebidos como estructuras con cierta capacidad

para absorber como energía elástica potencial el trabajo de deformación impuesto por cada carga circulante, y dicha energía hace que, una vez retirada la carga, se produzca una recuperación elástica de la deformación impuesta. Es obvio que si dicha capacidad se excede más allá del valor límite que determina las deformaciones recuperables por elasticidad, se desarrollan deformaciones permanentes, que, al acumularse, modifican sustancialmente los perfiles de la calzada, produciendo su falla [2].

3. Utilidad de la deflexión en el diseño de estructuras de pavimentos [1]

La utilidad de la deflexión en el diseño, rehabilitación y conservación de las estructuras de pavimentos son las siguientes:

- Como parámetro de diseño de estructuras nuevas de pavimentos
- Evaluar la capacidad estructural de un pavimento
- Contribuir en el diseño, rehabilitación y evaluación de estructuras de pavimento
- Determinar la capacidad estructural de un pavimento
- Facilitar la identificación de zonas débiles o deterioradas
- Proporcionar información para calcular la vida residual de un pavimento
- Evaluar la transferencia de carga de un pavimento rígido
- Soportar actividades asociadas a los sistemas de gestión de estructuras de pavimentos

4. Características de la deflexión y del cuenco de deflexiones

La deflexión y el cuenco de deflexiones presentan algunas características, a saber:

- La deflexión máxima se presenta en el eje de aplicación de la carga.
- El cuenco de deflexión presenta un valor máximo en el eje de aplicación de la carga y a medida que

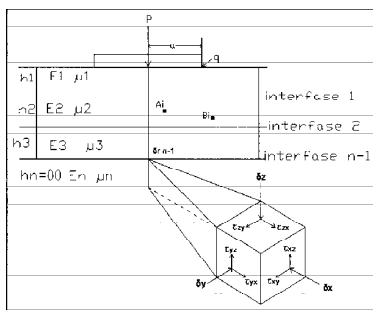
se aleja de este el valor de la deflexión se hace menor, hasta tal punto que tiende a cero.

- Con la información del cuenco de deflexión se puede determinar el parámetro AREA, que permite dar una idea del espesor y la capacidad de soporte del modelo estructural de pavimento.
- Con la deflexión máxima y la deflexión determinada a 25 centímetros del eje de carga es posible determinar el parámetro denominado radio de curvatura, que también da una idea de la capacidad de soporte del modelo estructural.
- La magnitud de la deflexión en estructuras de pavimentos es muy pequeña, generalmente menor a 1,5 milímetros. Para diseño, la deflexión máxima es menor de 1 milímetro.
- Las unidades en que se mide la deflexión son: milímetros o pulgadas y se expresa generalmente en 1/100 de mm o en 1/1000 de pulg.

5. Métodos para calcular la deflexión

5.1 Principio básico. El concepto básico para determinar la deflexión parte de la teoría del modelo elástico de un sistema multicapa. Los pavimentos flexibles son sistemas de capas (ver figura 1) con materiales de alta calidad en la parte superior y no pueden ser representados por una masa homogénea, por tanto, se usan teorías como la de Burmister para calcular los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones.

Figura 1. Sistemas elásticos multicapas



Fuente: YODER, Eldonnd y WITCZAK, Matthew. Principles of pavement design. New York: 1975. p. 25.

Donde:

E_i = Módulo de elasticidad de la capa i

h_i = Espesor de la capa i

μ_i = Relación de Poisson de la capa i

P = Carga aplicada

q = Presión de contacto

a = Radio de carga

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ = Esfuerzos cortantes, el primer subíndice indica el plano en el cual actúa la fuerza, y el segundo, su dirección

δ_x = Esfuerzo actuante en la dirección x

δ_y = Esfuerzo actuante en la dirección y

δ_z = Esfuerzo actuante en la dirección z

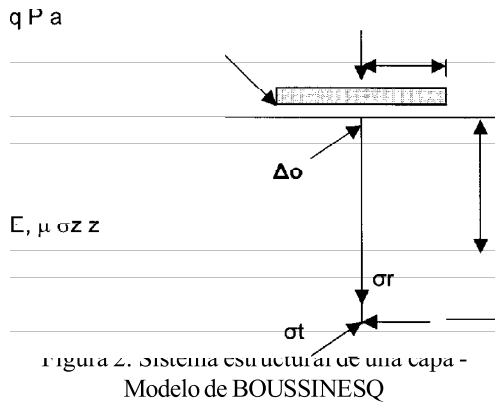
A_i, B_i = Puntos cualquiera de la masa de suelo

Las hipótesis de un sistema multicapa, para el estado de esfuerzos, deformaciones y deflexiones son:

- Existe un comportamiento lineal entre los esfuerzos y las deformaciones, ley de Hooke.
- Las propiedades del material de cada capa son homogéneas, es decir, las propiedades de un punto A_i son las mismas de un punto B_i .
- Condición de isotropía: las propiedades de un punto A_i son las mismas en cualquier orientación o dirección.
- Existencia de fricción entre dos capas de pavimento.
- Cada capa posee un espesor finito, excepto la capa más baja; además, todas las capas son infinitas en las direcciones horizontales.
- Las propiedades de los materiales de cada capa quedan definidos por dos propiedades principales: módulo de elasticidad (E) y relación de Poisson (μ).
- La carga es estática y vertical: en realidad es dinámica y en las curvas tiene una componente tangencial.
- Una presión uniforme (q) es aplicada en la superficie, en un área circular de radio a.

5.2 Modelos estructurales [3]. Existen diversos procedimientos para determinar la deflexión de un modelo estructural, ya sea de una capa, bicapa, tricapa o multicapa. Los procedimientos se describen a continuación:

5.2.1 Sistemas estructurales de una capa. Un sistema estructural de una capa se representa esquemáticamente, tal como se muestra en la figura 2.



Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- Δo = Deflexión en la superficie
- P = Carga aplicada
- q = Presión de contacto
- a = Radio de carga
- σz, σr, σt = Esfuerzo vertical, radial y tangencial
- z = Profundidad
- E = Módulo de elasticidad de la fundación
- μ = Relación de Poisson

Para determinar la deflexión en el eje de carga del sistema a una profundidad z, se utilizan las siguientes expresiones de cálculo:

$$\Delta z = \frac{(1 + \mu)qa}{E} \left[\frac{a}{(a^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{1 - 2\mu}{a} \left[(a^2 + z^2)^{1/2} - z \right] \right]$$

$$\Delta z = \frac{q}{E} \left[2(1 - \mu^2)(a^2 + z^2)^{3/2} - \frac{(1 + \mu)z^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}} + (\mu + 2\mu^2 - 1)z \right]$$

Cuando la relación de Poisson es igual a: m = 0,5, la deflexión en el eje de carga se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta z = \frac{3qa^2}{2E(a^2 + z^2)^{3/2}}$$

La deflexión en la superficie Do, (z = 0), se determina por la siguiente expresión:

$$\Delta o = \frac{2(1 - \mu^2)qa}{E}$$

5.2.2 Teoría de dos capas [4]. Son sistemas estratificados (ver figura 3), con los materiales de más alta calidad en la parte superior de la estructura, por lo que no se pueden representar con la teoría de una capa. Burmister dio solución a los sistemas de dos capas y posteriormente esta solución se extendió a sistemas tricapa y luego con el desarrollo de las computadoras se aplicó a sistemas multicapa.

Un caso puntual de un sistema de dos capas típico es aquel en el que se coloca una capa asfáltica de espesor pleno, directamente sobre la subrasante. Si un pavimento está compuesto de tres capas, por ejemplo, una capa asfáltica, una base granular y la subrasante, es necesario combinar la capa de base y la subrasante en una sola para poder calcular los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la capa asfáltica, o combinar la capa asfáltica y la granular para calcular los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la subrasante.

Un sistema estructural bicapa se puede esquematizar como se indica en la figura 3.

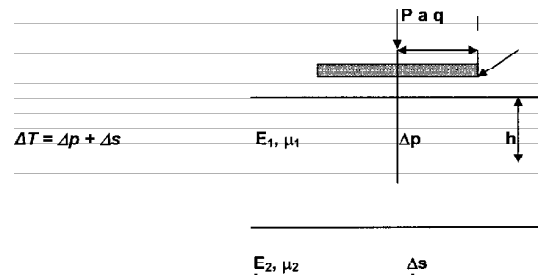


Figura 3. Sistema estructural de dos capas
Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- P = Carga aplicada
- a = Radio de carga
- q = Presión de contacto
- E₁ = Módulo de elasticidad de la capa i
- μ₁ = Relación de Poisson de la capa i
- h = Espesor de la capa superior
- ΔT = Deflexión total del modelo estructural
- Δp = Deflexión en la primera capa
- Δs = Deflexión en la subrasante

• **Fórmulas de Palmer y Barber para calcular la deflexión de un sistema bicapa**

Las expresiones matemáticas para calcular la deflexión son las siguientes, y sus variables están definidas previamente:

- Deflexión en la superficie del pavimento, ΔT:

$$\Delta T = \frac{1.5qa}{E_2} \left[\frac{a \left(1 - \frac{E_2}{E_1} \right)}{\sqrt{a^2 + h^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3}} + \frac{E_2}{E_1}} \right]$$

- Deflexión en la primera capa, Δp:

$$\Delta p = \frac{1.5qa}{E_1} \left[1 - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3}}} \right]$$

- Deflexión en la subrasante, Δs:

$$\Delta s = \frac{1.5qa^2}{E_2 \left[a^2 + h^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3} \right]^{1/2}}$$

• **Fórmulas de Odemark para calcular el desplazamiento vertical de un sistema bicapa**

Las expresiones matemáticas para calcular la deflexión son las siguientes:

- Deflexión en la superficie del pavimento, ΔT:

$$\Delta T = \frac{1.5qa}{E_2} \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0.9^2 \left(\frac{h}{a} \right)^2}} \right) \frac{E_2}{E_1} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0.9^2 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3}}} \right]$$

- Deflexión en la subrasante, Δs:

$$\Delta s = \frac{1.5qa}{E_2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 0.9^2 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3}}} \right]$$

- Deflexión en la primera capa, Δp:

$$\Delta p = \Delta T - \Delta s$$

5.2.3 Teoría de tres capas. Los sistemas estructurales tricapa son los más usuales y generalmente están constituidos por una capa superior de concreto asfáltico y una capa intermedia de base granular, apoyadas sobre una capa de subrasante. Un sistema estructural tricapa puede esquematizarse como se indica en la figura 4.

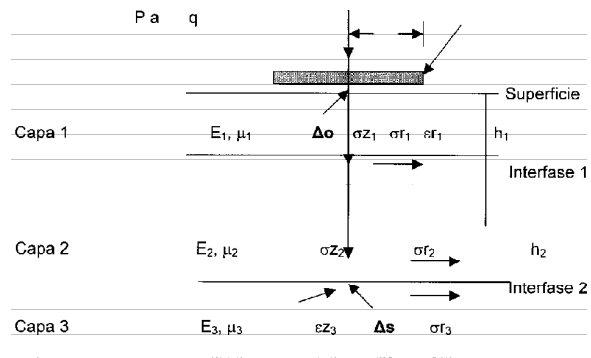


Figura 4. Sistema estructural tricapa

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- P = Carga aplicada
- a = Radio de carga
- q = Presión de contacto
- σz₁ = Esfuerzo vertical en la interfase 1
- σz₂ = Esfuerzo vertical en la interfase 2

σ_{r_1} = Esfuerzo horizontal de tracción en la base de la capa 1
 σ_{r_2} = Esfuerzo horizontal de tracción en la base de la capa 2
 σ_{r_3} = Esfuerzo horizontal de tracción sobre la capa 3
 ϵ_{r_1} = Deformación horizontal radial de tracción en la base de la capa 1
 ϵ_{z_3} = Deformación vertical de compresión sobre la subrasante
 μ_i = Relación de Poisson de la capa i
 E_i = Módulo de elasticidad de la capa i.
 ΔT = Deflexión total en la superficie del modelo estructural
 ΔS = Deflexión en la subrasante

Las expresiones para calcular las deflexiones de un modelo estructural de tres o más capas son las siguientes:

• **Fórmula de Palmer-Barber generalizada**

- Cálculo de la deflexión en la superficie de la estructura, Δ_0 : la deflexión en la superficie de un modelo estructural de tres o más capas está dada por Δ_0 y su expresión de cálculo es la siguiente:

$$\Delta_0 = \frac{2qa(1-\mu^2)}{E_n} \left[\frac{1 - \left(\frac{E_n}{\hat{E}}\right)}{\left[1 + \left(\frac{h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1}}{a}\right)^2 \left(\frac{\hat{E}}{E_n}\right)^2\right]^{3/2}} + \frac{E_n}{\hat{E}} \right]$$

- Cálculo del módulo equivalente, \hat{E} : el módulo equivalente se determina por la siguiente expresión:

$$\hat{E} = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3$$

Donde:
 \hat{E} = Módulo equivalente del modelo estructural
 E_i = Módulo de elasticidad de la capa i
 n = Número de capas
 h_i = Espesor de la capa i

• **Fórmulas de Odemark para calcular la deflexión en la capa subrasante, ΔS**

- Deflexión en la subrasante, Δs : la deflexión en la subrasante de un modelo estructural de tres o más capas está dada por Δs y su expresión de cálculo es la siguiente:

$$\Delta s = \frac{P}{2E_n h_e \sqrt{1 + \frac{a}{h_e}}}$$

Siendo:

$$P = \Pi a^2 q \quad h_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}}$$

Donde:

E_i = Módulo de elasticidad de la capa i
 E_n = Módulo de elasticidad de la capa n
 n = Número de capas
 h_i = Espesor de la capa i
 a = Radio de carga
 P = Carga
 μ = Relación de Poisson

5.3 Formas de determinar la deflexión [3]. Existen tres formas básicas para determinar la deflexión en la superficie y en la subrasante de un modelo estructural:

- Utilización de ábacos. En la literatura de mecánica de pavimentos se presentan ábacos para determinar la deflexión de un modelo estructural, ya sea por medio de figuras, tablas y algunas ecuaciones básicas. Con el desarrollo de los computadores y la elaboración de los programas de cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, su utilización quedó restringida para la enseñanza de los diferentes métodos de cálculo. En el libro de Yoder y Witczak [5] se presentan los ábacos para determinar las deflexiones de los modelos estructurales de una, dos y tres capas.
- Utilización de fórmulas. La utilización de fórmulas

para determinar las deflexiones de un modelo estructural es muy frecuente, pues se facilita mucho con las herramientas computacionales existentes; herramientas que además permiten realizar estudios de sensibilidad de manera rápida, debido a que se pueden programar en hojas de cálculo y manejar los resultados para ser presentados en forma de gráficos de diferente forma.

- Utilización de programas o herramientas computacionales. Actualmente existen diferentes programas que permiten calcular los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones de un sistema multicapa de estructuras de pavimentos. Entre los más conocidos en nuestro medio son:
 - El DEPAV, desarrollado por la Universidad del Cauca en Colombia.
 - El BISAR 3.0, desarrollado por la casa SHELL y de gran utilización a escala mundial.
 - El EVERSERIES, módulo EVERSTRS, desarrollado por el Departamento de Transporte del estado de Washington de los Estados Unidos.
 - El KENPAVE, módulo KENLAYER, desarrollado por la Universidad de Kentucky de los Estados Unidos.

En el mundo existen muchos programas para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones. El pionero de estos es el ALIZE III, y posteriormente se desarrollaron otros, como el MODULUS, el ELSYM y muchos más que se pueden consultar en la literatura de mecánica de pavimentos.

Equipos para medir la deflexión. Los primeros equipos para medir las deflexiones de una estructura de un pavimento fueron desarrollados en los años cincuenta del siglo XX y, gracias a que el desarrollo tecnológico ha avanzado a pasos agigantados, en la actualidad se cuenta con equipos de alto rendimiento, alta tecnología y de gran exactitud. Los equipos más comunes utilizados en nuestro medio para medir la deflexión son los siguientes (una descripción de ellos se puede consultar en [6]):

- La viga Benkelman

- El deflectógrafo Lacroix
- El deflectómetro de impacto - (Falling Weight Deflectometer - FWD)

6. Modelación del cuenco de deflexión producido por el camión C3S3 en un pavimento flexible

Con el objeto de visualizar y de tener idea de la magnitud de la deflexión que se produce en un modelo estructural de referencia de un pavimento flexible, se modeló el camión C3S3 (según la clasificación de los vehículos del Ministerio de Transporte), teniendo en cuenta su dimensionamiento y cargas por eje, que se especifican en la Resolución 13791 de 1988 del Ministerio de Transporte.

La modelación pretende mostrar el efecto de la aplicación de un sistema de carga en un modelo estructural de referencia y ver su incidencia, de manera que se pueda analizar su efecto en las estructuras de pavimento y estudiar el comportamiento de cada una de las variables que inciden en el funcionamiento mecánico de un pavimento. En otras palabras, se quiere motivar el estudio de la deflexión debido a su importancia en el diseño, rehabilitación y gestión de las carreteras.

6.1 Características geométricas del camión C3S3. El camión C3S3 está constituido por una unidad tractora de dos ejes (un eje simple direccional de llanta sencilla y un eje tándem de llanta doble) y un semirremolque constituido por un eje trídem de llanta doble, tal como se especifica en la figura 5. El número de ejes simples es de seis, tres en la unidad tractora y tres en el semirremolque, y el número de llantas es de 22.

El ancho del camión entre ejes es de 2,04 metros y la distancia entre el eje direccional y el último eje del semirremolque es de 14,69 metros. Las distancias entre los diversos tipos de ejes se indican en la figura 6.

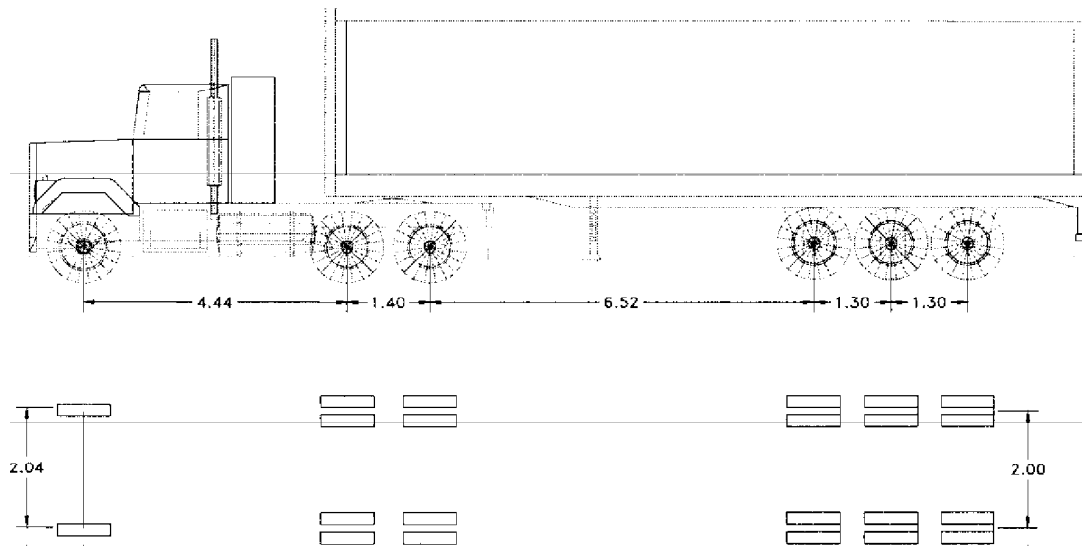


Figura 5. Esquema general del camión C3S3

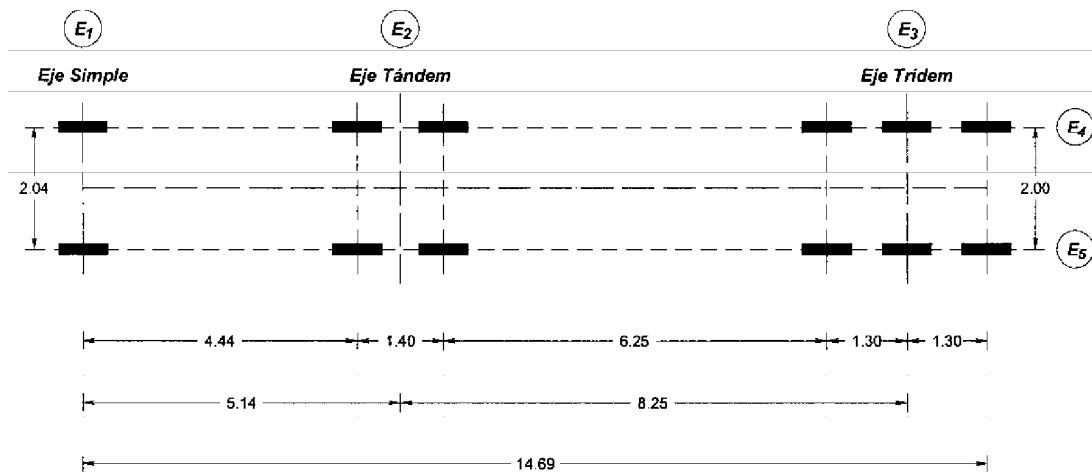


Figura 6. Esquema y dimensionamiento del camión C3S3 - Resolución 13791 de 1988.

Medidas en metros
Fuente: Elaboración propia.

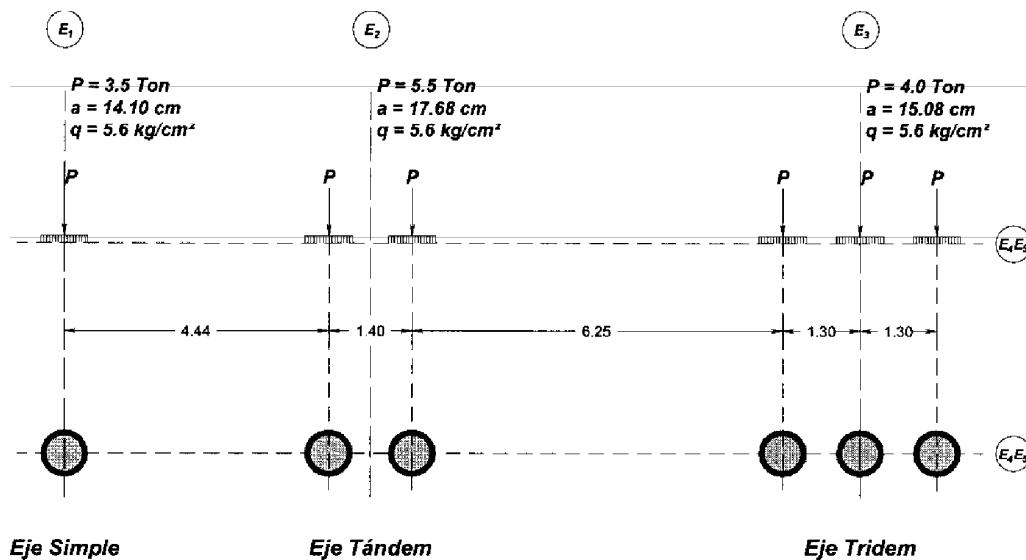
6.2 Modelación del sistema de carga de camión C3S3.

La modelación del sistema de carga del camión C3S3 se realizó teniendo en cuenta las cargas máximas por tipo de ejes que se especifican en la Resolución 13791 de 1988 y sus modificaciones mediante Resolución 2501 del 22 de febrero de 2002. La carga estipulada para el eje simple direccional es de 7 toneladas o 3,5 t/llanta, para el eje tándem es de 22 toneladas o 2,75 t/llanta y para el eje trídem es de 24 toneladas o 2,0 t/llanta.

Para modelar el sistema de carga se pasó del sistema dual de carga al sistema simple, con el fin de facilitar la modelación y el cálculo de los

cuentos de deflexión del sistema de carga considerado. En la figura 7 se muestra en detalle el sistema de carga transformado para el camión C3S3; los parámetros de carga son los siguientes: para el eje simple: $P = 3,5$ t, $a = 14,10$ cm y $q = 5,6$ kg/cm²; para el eje tándem: $P = 5,5$ t, $a = 17,68$ cm y $q = 5,6$ kg/cm² y para el eje trídem: $P = 4,0$ t, $a = 15,08$ cm y $q = 5,6$ kg/cm².

La modelación del sistema de carga del camión C3S3 se realizó con ayuda del programa BISAR 3.0 de la SHELL, el cual permite considerar un sistema de cargas con sus propiedades, que representan las cargas del camión C3S3.



25

Figura 7. Modelación del sistema de carga del camión C3S3 con las cargas máximas según la Resolución 13781 de 1988.

Vista lateral

Medidas en metros

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Modelo estructural del pavimento. Para la modelación de los cuencos de deflexión del camión C3S3, se consideró el modelo estructural de pavimento flexible constituido por una capa de concreto asfáltico, una capa de base granular y una capa de subbase granular, apoyado todo el conjunto en la subrasante, tal como se indica en la figura 8.

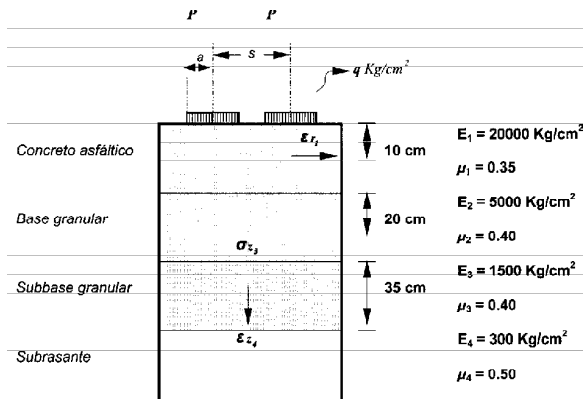


Figura 8. Modelo estructural de referencia para la modelación del cuenco de deflexión del camión C3S3.

6.4 Cuenco de deflexión del camión C3S3. El cuenco de deflexión generado por la carga estática del camión C3S3 se presenta en las figuras 9 a la 13; de ellas se destaca lo siguiente:

6.4.1 Análisis del cuenco de deflexión por tipo de eje de manera aislada

- En las figuras 9, 10 y 11 se muestran de manera aislada los cuencos de deflexión del eje E1, E2 y E3 del camión C3S3, los cuales permiten ver la manera como se deforma la estructura del pavimento flexible en sentido transversal para cada tipo de eje del camión considerado. Como resultado de esta modelación es importante mencionar que el efecto de las cargas del camión C3S3 genera en sentido transversal del pavimento un amplio cuenco de deflexión, presentándose su valor máximo en el eje de carga del sistema de cada uno de los tipos de ejes considerados del vehículo. Se aclara que para la modelación de los cuencos de los ejes tándem y trídem

se utilizó solo una parte de ellos, para simplificar su cálculo. Los valores máximos de la deflexión por cada tipo de eje, que se presentan en las figuras 9, 10 y 11, corresponden a un análisis, de manera aislada, de cada uno de los tipos de ejes considerados del camión C3S3.

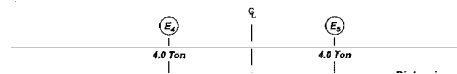
- En la figura 12 se muestra la modelación de los ejes E4 y E5 y el perfil de deflexión en sentido longitudinal del camión C3S3. El perfil de deflexión presenta tres sectores bien definidos, de acuerdo con el tipo de ejes que constituyen el camión de referencia.

- Para las condiciones de carga del camión C3S3 y las condiciones de la estructura de referencia del pavimento flexible y las condiciones estáticas de carga, la deflexión máxima que se presenta en sentido longitudinal (ejes E4 y E5) son las siguientes: en el eje simple direccional es de 0,889 mm, en el eje tándem es de 1,489 mm y en el eje trídem es de 1,399 mm. Estas deflexiones demuestran que las estructuras de pavimentos se deforman en sentido vertical ante la aplicación de las cargas generadas por el tránsito. De ahí la importancia de conocer la magnitud de la deflexión para poder analizar el efecto de la tracción en la base de las capas asfálticas, la deformación de la estructura del pavimento y la deformación y los esfuerzos verticales en la subrasante.

- El cuenco de deflexión generado por la carga del camión C3S3 cubre un área mayor al área del camión, o sea que afecta la estructura del pavimento, prácticamente, en la totalidad del carril de circulación del camión. Esta apreciación es de gran importancia para el análisis del comportamiento estructural de los pavimentos.

6.4.2 Análisis del cuenco de deflexión generado por los ejes del camión C3S3

- El cuenco de deflexión generado por las cargas de los diferentes tipos de ejes del camión C3S3 se presenta en tres dimensiones en la figura 13. El objetivo de esta figura es sensibilizar a los ingenieros sobre el efecto de las cargas en una estructura de pavimento flexible. La figura 13 fue elaborada para



ERROR: ioerror
OFFENDING COMMAND: colorimage

STACK:

-savelevel-