

Factor de seguridad global de la estructura del pavimento

Global factor of safety of the structure of the pavement

Silvio H Rojas Gutiérrez y Gioconda González
Facultad de Ingeniería, ULA,
Mérida, 5101, Venezuela
silviorojas@ula.ve

Resumen

En este artículo se considera la disipación de la energía que ocurre en cada una de las capas que conforma la estructura del pavimento, cuando éste es cargado uniformemente en un área circular equivalente al contacto llanta - pavimento, tomando en cuenta que en cada una de ellas los parámetros que las caracterizan son distintos, y que con la ayuda de la teoría de elasticidad, junto con la definición de espesores equivalentes, se determinan las deformaciones y esfuerzos que se producen en cualquier punto de las subcapas, lo cual permite aplicar el concepto del factor de seguridad en función de la energía máxima que puede disipar los materiales y la energía movilizada en cada uno de ellos.

Palabras claves: pavimento, espesores, energía, factor de seguridad, deformaciones, elasticidad.

Abstrat

In this article the dissipation of the energy is considered that happens in each one of the layers that the structure of the pavement conforms, when this one is uniformly loaded in a circular area equivalent to the contact rim pavement, taking into account that in each one of them the parameters that characterizes them are different, and that with the aid of the elasticity theory, along with the definition of equivalent thick, determine the deformations and efforts that take place in any point of sub-layers, which allows to apply the concept of the factor of safety based on the maxim energy that can dissipate the materials and energy mobilized in each one of them.

Keywords: Pavement, thick, energy, factor of safety, deformations, elasticity.

1. Introducción

La aplicación del concepto de disipación de la energía en capas estrechas es mostrado por el sabio Chen (1975), para fundaciones superficiales, considerando un mecanismo rotacional simple como superficie de falla, en material de Tresca (suelo cohesivo no drenado), definiendo la capacidad última de este suelo como un límite superior. En la referencia indicada, se presenta el estudio de patrones de flujo con cambio de volumen, donde grandes masas de suelos se mueven como cuerpo rígidos (deslizamientos), mientras ocurre deformación solamente en zonas estrechas de material de Coulomb (cohesivo – friccionante).

Las consideraciones teóricas que explican el fenómeno físico que se desarrolla en las capas estrechas, es la base fundamental del concepto de energía desarrollado en este artículo, y que por consiguiente, a continuación se describe brevemente, adaptándolo al problema de interés, como es la estructura del pavimento.

En este sentido, en la figura 1 se muestra dos cuerpos rígidos, separados por una capa estrecha, donde ocurre cierta traslación de la capa superior respecto a la capa inferior, es decir hay un desplazamiento horizontal y uno vertical¹, y que de acuerdo a la teoría de plasticidad, este tipo de comportamiento, corresponde a un material idealmente plástico.

En la figura 1, se observa que existe expansión de volumen plástico durante el corte en la zona estrecha, donde el desplazamiento horizontal (δh) del bloque superior, está acompañado por un desplazamiento vertical (δv). Este comportamiento de separación de las capas, correspondiente al suelo idealmente plástico, lo diferencia del suelo friccionante de Coulomb, en el cual no ocurre ningún desplazamiento vertical.

¹ En movimientos de masas, se pudiera hablar de desplazamiento paralelo y ortogonal al deslizamiento.

Chen (1975), indica: “Este comportamiento permite definir una regla de flujo o concepto de normalidad, donde se requiere que el cambio de velocidad tangencial ($\delta h'$), debe estar acompañado por la velocidad de separación $\delta v'$ ($\delta v' = \delta h' \cdot \tan(\phi)$), siendo ϕ , la fricción del material. Esta condición cinemática de deslizamiento, simplemente define, que el cambio de velocidad relativa ($\delta w'$) en una zona estrecha, limitada por dos planos paralelos, debe formar un ángulo ϕ , con los planos de deslizamientos”. Como se puede ver, en el párrafo anterior no hablamos de velocidad, sino de desplazamiento, ya que en el planteamiento que se formulará más adelante, respecto a las capas de pavimento, la variable tiempo no es considerada.

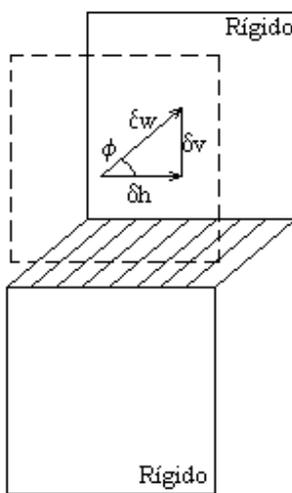


Fig. 1.- Zona estrecha en el contacto de dos masas, cuando el comportamiento corresponde a un suelo idealmente plástico.

En la figura 1, también se aprecia que al separarse las capas, ya no existe contacto entre ellas, lo cual significa que una capa de transición indefinidamente delgada, físicamente no es aceptable, tal como se considera en los análisis límites de taludes o fundaciones, por lo cual se puede entender que es una consideración puramente por conveniencia para uso práctico.

Para evaluar la disipación de energía en esta capa estrecha de transición de cortante plástico, se toma en consideración el modo de deformación en dicha capa, la cual es una combinación de flujo paralelo de corte con extensión normal. La variación de las deformaciones cortantes y normales, las cuales son asumidas ser uniformes dentro de la capa, se expresan a través de:

$$\gamma = \frac{\delta h}{t} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta v}{t} \quad (2)$$

Donde²:

γ : Deformación cortante

ε : Deformación normal

t: espesor de la capa

De lo anterior se determina que la variación de energía en la capa, viene dada por:

$$D = (\tau \cdot \gamma - \sigma \cdot \varepsilon) \cdot t \quad (3)$$

Donde:

D: Variación de disipación de energía por unidad de área

τ : Esfuerzo cortante aplicado a la capa.

σ : Esfuerzo normal a la capa.

Si en la ecuación (3), se sustituye las ecuaciones (1) y (2), resulta:

$$D = (\tau \cdot \delta h - \sigma \cdot \delta v) \quad (4)$$

La definición presentada en la figura 1, para un material idealmente plástico, permite expresar el desplazamiento vertical en función del desplazamiento horizontal, a través del ángulo de fricción:

$$\delta v = \delta h \cdot \tan(\phi) \quad (5)$$

Haciendo uso de esta última ecuación, la variación de la disipación de energía (D), se escribe como:

$$D = \delta h \cdot (\tau - \sigma \cdot \tan(\phi)) \quad (6)$$

Esta última ecuación, muestra como la variación de la disipación de la energía dentro de la capa por unidad de área, es independiente del espesor de la capa. Ésta observación es de importancia, ya que significa que el espesor t de la capa, puede ser tan pequeño, que puede tomar el valor de cero.

Ahora es de interés escribir la variación de disipación de la energía por unidad de volumen. La figura 2, ilustra un corte simple, el cual se puede considerar ocurrió en una serie de subcapas estrechas de transición, de espesor (Δh), donde cada una de ellas está limitada por líneas horizontales y paralelas. En esas capas la masa de suelo adyacente sufre una traslación, debido a la deformación cortante simple (γ) que sufre la capa, acompañada de la deformación normal ($\varepsilon = \gamma \cdot \tan(\phi)$). Para un espesor total (h) de capa estrecha, el desplazamiento total horizontal y vertical, proporcionado por las subcapas, es el mostrado en la figura 2.

² Chen (1975), estas deformaciones cortante y normal, las expresa tomando en cuenta la velocidad tangencial ($\delta h'$) y normal ($\delta v'$).

La variación de la disipación de energía por unidad de volumen en este caso, se expresa como:

$$D = (\tau \cdot \gamma - \sigma \cdot \gamma \cdot \tan \phi) \quad (7)$$

La ecuación (7) debe cumplir el criterio de fluencia de Coulomb, el cual en este caso se escribe:

$$D = C \cdot \gamma \quad (8)$$

Donde:

C: Cohesión del material.

Lo anterior sencillamente, es igual a decir que el cortante máximo (τ), aplicado en la capa estrecha, debe cumplir la ley de resistencia de Morh-Coulomb ($\tau = C + \sigma \cdot \tan(\phi)$).

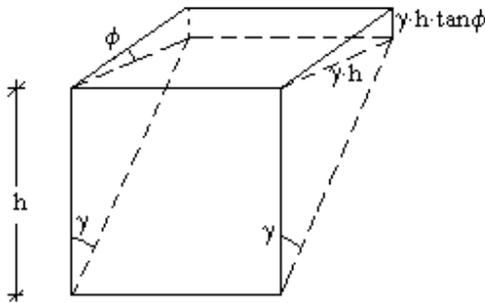


Fig. 2.- Regiones de deformación homogénea en material de Coulomb.

2. Esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento.

Considere la estructura de pavimento flexible, mostrada en la figura 3, conformada por la carpeta, base, y subbase, con sus respectivos espesores, las cuales se apoyan en la subrasante. Cada una de estas subcapas, incluyendo cierto espesor de la subrasante, servirá para disipar la energía transmitida por el camión de carga a través de sus llantas a dicha estructura, y donde cada una de ellas está caracterizada por los parámetros de resistencia cohesión (C_i) y fricción (ϕ_i), conjuntamente con las propiedades elásticas de los materiales definidas por el módulo de elasticidad (E_i) y el coeficiente de poisson (ν_i).

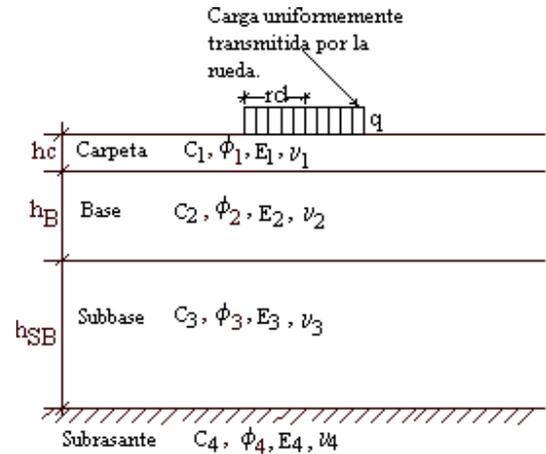


Fig. 3.- Estructura de un pavimento flexible, donde cada capa está caracterizada por los parámetros de resistencia (cohesión y fricción) y las propiedades elásticas del material

Tomando en cuenta que el aporte de carga de una llanta a la llanta más cercana, en un eje de carga, es poco significativo, de acuerdo a los cálculos presentados en el apéndice B, aquí solamente se consideran los esfuerzos y deformaciones producidas por la presión que transmite una llanta, a la estructura del pavimento.

Para conocer los esfuerzos en las subcapas, la estructura del pavimento original indicada en la figura 3, debe transformarse en espesores equivalentes, lo cual ayudará a la estimación de los esfuerzos, de manera de poder hallar las deformaciones cortantes y normales, que intervienen en la ecuación de energía.

Las ecuaciones clásicas de Odemark, para un sistema de dos capas, tal como la presentada en la figura 4, para la determinación de un espesor equivalente, viene dada por:

$$he = hb + 0.9 \cdot ha \cdot \left[\frac{Ea}{Eb} \cdot \frac{(1 - \nu b^2)}{(1 - \nu a^2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Donde:

he: Espesor equivalente, caracterizado con el módulo y coeficiente de poisson de la subcapa "b".

hb, ha: Espesores de las subcapas "b" y capa "a".

Eb, Ea: Módulo de elasticidad de las subcapas "b" y "a".

vb, va: Coeficientes de poisson de las subcapas "b" y "a".

El esfuerzo vertical en la interfase de las dos subcapas, se estima a través de la siguiente expresión:

$$\sigma_v = q \cdot \left[1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{rd}{h_{esf}} \right)^2 \right]^3} \right] \quad (10)$$

Donde el “ h_{esf} ” que debe sustituirse en la ecuación (10), se expresa, como:

$$h_{esf} = 0.9 \cdot ha \cdot \sqrt[3]{\frac{Ea}{Eb}} \quad (11)$$

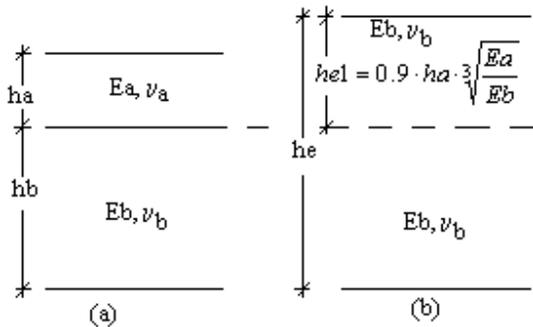


Fig. 4.- Transformación de un sistema de dos capas (a) en un sistema equivalente de una sola capa (b).

Para el sistema multicapa mostrado en la figura 3, convertir ese sistema, en un sistema de una sola capa, requiere aplicar la ecuación 9 tres veces, descomponiendo el sistema tal como se indica en la figura 5.

Los espesores equivalentes de la estructura del pavimento indicados en la figura 5, así como los esfuerzos que se producen en la interfaz de las capas, se obtienen a partir de las ecuaciones (9), (10) y (11), tal como se expresa a continuación:

$$h_{e_SB_B} = h_{SB} + 0.9 \cdot h_B \cdot \left[\frac{E_2}{E_3} \cdot \frac{(1-\nu_3^2)}{(1-\nu_2^2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Donde:

h_{e_SB} : Espesor equivalente del sistema de dos subcapas conformado por la subbase y base.

h_B : espesor de la base.

h_{SB} : Espesor de la subbase.

E_2, E_3 : Módulo de elasticidad correspondientes a la base y subbase respectivamente.

ν_2, ν_3 : Coeficientes de poisson correspondiente a la base y subbase respectivamente.

$$h_{e_B} = 0.9 \cdot h_B \cdot \left[\frac{E_2}{E_3} \cdot \frac{(1-\nu_3^2)}{(1-\nu_2^2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Donde:

h_{e_B} : Espesor equivalente de la base, caracterizado con los parámetros E_3, ν_3 .

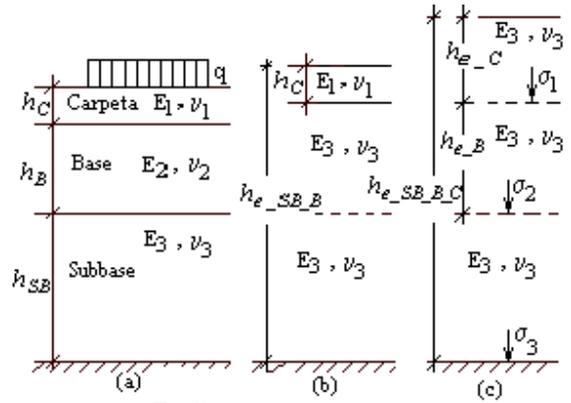


Fig. 5.- Espesores equivalentes de la estructura del pavimento. (a): Estructura original

(a): Estructura original

(b): Espesor equivalente ($h_{e_SB_B}$) base-subbase, determinado a partir de la subbase.

(c) Espesores equivalentes (h_{e_C}), (h_{e_B}) y $h_{e_SB_B_C}$, para la carpeta, base y subbase.

$$h_{e_C} = 0.9 \cdot h_C \cdot \left[\frac{E_1}{E_3} \cdot \frac{(1-\nu_3^2)}{(1-\nu_1^2)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Donde:

h_{e_C} : Espesor equivalente de la carpeta, caracterizado con los parámetros (E_3, ν_3).

$$h_{e_SB_B_C} = h_{SB} + h_{e_B} + h_{e_C} \quad (15)$$

Donde:

$h_{e_SB_B_C}$: Espesor equivalente de toda la estructura del pavimento, caracterizado con los parámetros E_3, ν_3 .

Los esfuerzos verticales σ_{v1} , σ_{v2} y σ_{v3} , correspondientes a la interfase carpeta-base, base-subbase y subbase-subrasante, se obtienen a partir de la ecuación (10), y donde la altura h_{esf} que interviene para cada esfuerzo se expresa como:

Para la interfase carpeta-base:

$$h_{esf} = 0.9 \cdot h_C \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} \quad (16)$$

Para la interfase base-subbase:

$$h_{esf} = 0.9 \cdot (h_{e_C} + h_B) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} \quad (17)$$

Para la interfase subbase-subrasante:

$$h_{esf} = 0.9 \cdot (h_{e_C} + h_{e_B} + h_{SB}) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_4}} \quad (18)$$

La evaluación de las ecuaciones de la 12 a la 18, permitirá encontrar las alturas de pavimento equivalente, que se sustituirán en las expresiones de los esfuerzos, presentadas en el apéndice A.

Las deformaciones cortantes y normales, que se producen en cada una de las subcapas de la estructura del pavimento, se estimarán aplicando la siguiente ecuación matricial presentada por Wittek (1990):

$$\{\varepsilon\} = [T]^T \cdot [D]^{-1} \cdot [T] \cdot \{\sigma\} \quad (19)$$

Donde:

$\{\varepsilon\}$: Vector de deformaciones.

$[T]$: Matriz de rotación de los ejes (x',y',z') a (x, y, z).

$[T]^T$: Traspuesta de la matriz de rotación.

$[D]^{-1}$: Matriz inversa de las propiedades del material.

$\{\sigma\}$: Vector de esfuerzos.

En cuanto a la matriz de las propiedades del material, se considerará un comportamiento elástico isotrópico, en cada una de las capas, por lo cual aplicando las leyes de Hooke, resulta:

$$D = \begin{bmatrix} (J1) & (J2) & (J2) & (0) & (0) & (0) \\ (J2) & (J1) & (J2) & (0) & (0) & (0) \\ (J2) & (J2) & (J1) & (0) & (0) & (0) \\ (0) & (0) & (0) & (J3) & (0) & (0) \\ (0) & (0) & (0) & (0) & (J3) & (0) \\ (0) & (0) & (0) & (0) & (0) & (J3) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Donde:

$$J1 = \frac{E_i \cdot (1 - \nu_i)}{1 - \nu_i - 2 \cdot \nu_i^2} \quad (20.1)$$

$$J2 = \frac{E_i \cdot \nu_i}{1 - \nu_i - 2 \cdot \nu_i^2} \quad (20.2)$$

$$J3 = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)} \quad (20.3)$$

Siendo:

E_i, ν_i : Módulo de elasticidad y coeficiente de poisson de determinada subcapa.

Las traspuestas de los vectores de deformación $\{\varepsilon\}^T$ y del vector de esfuerzos $\{\sigma\}^T$ se escriben como:

$$\{\varepsilon\}^T = \{(\varepsilon_x) (\varepsilon_y) (\varepsilon_z) (\gamma_{xy}) (\gamma_{yz}) (\gamma_{zx})\} \quad (21)$$

$$\{\sigma\}^T = \{(\sigma_x) (\sigma_y) (\sigma_z) (\tau_{xy}) (\tau_{yz}) (\tau_{zx})\} \quad (22)$$

Donde:

ε_x, σ_x : Deformación normal y esfuerzo normal en la dirección "x".

ε_y, σ_y : Deformación normal y esfuerzo normal en la dirección "y".

ε_z, σ_z : Deformación normal y esfuerzo normal en la dirección "z".

γ_{xy}, τ_{xy} : Deformación cortante y esfuerzo cortante en el plano "x" en dirección "y".

γ_{yz}, τ_{yz} : Deformación cortante y esfuerzo cortante en el plano "y" en dirección "z".

γ_{zx}, τ_{zx} : Deformación cortante y esfuerzo cortante en el plano "z" en dirección "x".

Para tener una misma nomenclatura de referencia de las ecuaciones (21) y (22) con respecto a las ecuaciones que determinan los esfuerzos en cualquier punto de las subcapas, y que son presentadas en el apéndice A, nosotros aquí, tomaremos la dirección "x" como la dirección (θ) y la dirección "y" como la dirección "r", ambas indicadas en la figura 8 de dicho apéndice. De esta forma se tiene:

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_x \quad \sigma_\theta = \sigma_x \quad (23)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_y \quad \sigma_r = \sigma_y \quad (24)$$

$$\gamma_{z\theta} = \gamma_{zx} \quad \tau_{z\theta} = \tau_{zx} \quad (25)$$

$$\gamma_{zr} = \gamma_{zy} \quad \tau_{zr} = \tau_{zy} \quad (26)$$

$$\gamma_{\theta r} = \gamma_{xy} \quad \tau_{\theta r} = \tau_{xy} \quad (27)$$

Para ser un poco didáctico respecto a la matriz de rotación de ejes $[T]$, se hará referencia a la figura 6, la cual muestra dos sistemas de referencia (x,y,z) y (x',y',z'), donde se observa un plano inclinado (x',y') que forma un ángulo de buzamiento (β) con respecto al plano horizontal (x, y). La dirección (α) de la línea de intersección del plano inclinado con el plano horizontal, medido desde el eje (y) hasta el eje (x'), puede variar desde 0° a 360°. Después de aplicar algunas relaciones trigonométricas, se logra proyectar en las direcciones (x',y',z'), las componentes de esfuerzos o deformaciones, orientadas en las direcciones (x,y,z). Es decir: $\{\sigma'\} = [T]\{\sigma\}$ ó $\{\varepsilon'\} = [T]\{\varepsilon\}$. La matriz $[T]$ se demuestra viene dada por:

$$T = \begin{bmatrix} (\ell_1^2) & (m_1^2) & (0) & (2\ell_1 m_1) & (0) & (0) \\ (\ell_2^2) & (m_2^2) & (n_2^2) & (2\ell_2 m_2) & (2m_2 n_2) & (2n_2 \ell_2) \\ (\ell_3^2) & (m_3^2) & (n_3^2) & (2\ell_3 m_3) & (2m_3 n_3) & (2n_3 \ell_3) \\ (\ell_1 \ell_2) & (m_1 m_2) & (0) & (\ell_1 m_2 + \ell_2 m_1) & (m_1 n_2) & (n_2 \ell_1) \\ (\ell_2 \ell_3) & (m_2 m_3) & (n_2 n_3) & (\ell_2 m_3 + \ell_3 m_2) & (m_2 n_3 + m_3 n_2) & (n_2 \ell_3 + n_3 \ell_2) \\ (\ell_3 \ell_1) & (m_3 m_1) & (0) & (\ell_1 m_3 + \ell_3 m_1) & (m_1 n_3) & (n_3 \ell_1) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Donde:

$$\ell_1 = \sin(\alpha) \quad m_1 = \cos(\alpha) \quad (28.1)$$

$$\ell_2 = \cos(\beta) \cos(\alpha) \quad m_2 = -\cos(\beta) \sin(\alpha) \quad (28.2)$$

$$n_2 = -\sin(\beta)$$

$$\ell_3 = \cos(\beta) \cos(\alpha) \quad m_3 = -\cos(\beta) \sin(\alpha) \quad (28.3)$$

$$n_3 = -\sin(\beta)$$

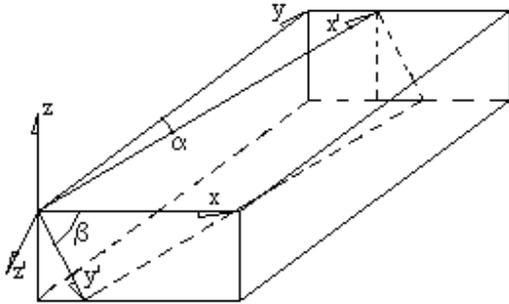


Fig. 6.- Relaciones entre el sistema fijo global (x, y, z) y el sistema de coordenadas de un plano inclinado (x', y', z') .

3. Planteamiento de la ecuación de energía en el sistema multicapa

Con la ayuda de lo expresado en la introducción de este artículo, aquí se hace un planteamiento basado en los conceptos de incremento de energía interna y disipación de energía presentados por Roscoe et al (1963), Rojas y De Barcia (2002), las cuales ocurrirán en cada una de las subcapas que constituyen la estructura del pavimento. Las hipótesis son las siguientes:

1. La estructura del pavimento se considera, constituido por tres subcapas de comportamiento estrecho como lo indicado al comienzo.
2. Cada subcapa recibe un incremento de la energía interna, proporcionada por los esfuerzos normales

que se producen dentro de la misma $(\sigma_\theta \cdot \epsilon_\theta + \sigma_r \cdot \epsilon_r + \sigma_z \cdot \epsilon_z)$.

3. En cada subcapa se disipa cierta cantidad de energía, la cual es directamente proporcional a los parámetros de resistencia cohesiva y friccionante, así como también a la deformación cortante (γ) que se produce dentro y en las interfases de cada una de ellas.
4. Estas distorsiones cortantes (γ) , solamente movilizan cierta resistencia cohesiva y friccionante, de la total que pueda aportar cada material.
5. La energía movilizada en cada subcapa se estima a través de un factor de seguridad (FS), el cual es considerado ser el mismo para cada una de ellas.

De acuerdo a los puntos anteriores, a continuación se escribe la ecuación de energía que permitirá encontrar el factor (FS) global de la estructura del pavimento.

$$E_{\text{int}} = E_{\text{disp}} \quad (29)$$

Donde:

E_{int} : Energía interna transmitida a toda la estructura del pavimento.

E_{disp} : Energía total disipada en todas las subcapas y sus interfases.

La energía interna, se considera es función de las deformaciones promedio y esfuerzos promedio, que se estiman ocurren dentro de los espesores de la carpeta, base, subbase y subrasante, respectivamente, así como también de cierta energía interna recuperable dentro de cada subcapa. Para ello se propone la siguiente expresión:

$$E_{\text{int}} = q \cdot \epsilon_{z-1} + \sigma_{\theta-1} \cdot \epsilon_{\theta-1} + \sigma_{r-1} \cdot \epsilon_{r-1} + \sigma_{z-2} \cdot \epsilon_{z-2} \\ + \sigma_{\theta-2} \cdot \epsilon_{\theta-2} + \sigma_{r-2} \cdot \epsilon_{r-2} + \sigma_{z-3} \cdot \epsilon_{z-3} \\ + \sigma_{\theta-3} \cdot \epsilon_{\theta-3} + \sigma_{r-3} \cdot \epsilon_{r-3} + \sigma_{z-4} \cdot \epsilon_{z-4} + \\ \sigma_{\theta-4} \cdot \epsilon_{\theta-4} + \sigma_{r-4} \cdot \epsilon_{r-4} - U_1 - U_2 - U_3 - U_4$$

(30)

Donde:

q : Esfuerzo transmitido por la llanta a la estructura del pavimento.

$\epsilon_{z-1}, \epsilon_{z-2}, \epsilon_{z-3}, \epsilon_{z-4}$: Deformaciones verticales³.

$\epsilon_{\theta-1}, \epsilon_{\theta-2}, \epsilon_{\theta-3}, \epsilon_{\theta-4}$: Deformaciones tangenciales.

$\epsilon_{r-1}, \epsilon_{r-2}, \epsilon_{r-3}, \epsilon_{r-4}$: Deformaciones radiales.

$\sigma_{z-1}, \sigma_{z-2}, \sigma_{z-3}, \sigma_{z-4}$: Esfuerzos verticales.

$\sigma_{\theta-1}, \sigma_{\theta-2}, \sigma_{\theta-3}, \sigma_{\theta-4}$: Esfuerzos tangenciales.

$\sigma_{r-1}, \sigma_{r-2}, \sigma_{r-3}, \sigma_{r-4}$: Esfuerzos radiales.

³ Los subíndices 1,2,3 y 4, se refiere a la carpeta, base, subbase y subrasante.

U_1, U_2, U_3, U_4 : Energía interna por unidad de volumen, recuperable.

La energía interna recuperable (Rojas y De Barcia (2002)) puede ser estimada en este caso, a través de las siguientes ecuaciones:

$$U_1 = \frac{m_1}{2.3 \cdot (1 + e_1)} \cdot (\sigma_{z_{-1}} + \sigma_{\theta_{-1}} + \sigma_{r_{-1}}) \quad (30.1)$$

$$U_2 = \frac{m_2}{2.3 \cdot (1 + e_2)} \cdot (\sigma_{z_{-2}} + \sigma_{\theta_{-2}} + \sigma_{r_{-2}}) \quad (30.2)$$

$$U_3 = \frac{m_3}{2.3 \cdot (1 + e_3)} \cdot (\sigma_{z_{-3}} + \sigma_{\theta_{-3}} + \sigma_{r_{-3}}) \quad (30.3)$$

$$U_4 = \frac{m_4}{2.3 \cdot (1 + e_4)} \cdot (\sigma_{z_{-4}} + \sigma_{\theta_{-4}} + \sigma_{r_{-4}}) \quad (30.4)$$

Donde:

m_1, m_2, m_3, m_4 : Pendiente de la línea de expansión de la carpeta, base, subbase y subrasante, al suprimir el estado de esfuerzos, en la estructura del pavimento.

e_1, e_2, e_3, e_4 : Relación de vacíos que se alcanza en la carpeta, base, subbase y subrasante, al suprimir el estado de esfuerzos.

La energía total que es disipada en la estructura del pavimento, a través de cada una de las subcapas, junto con el aporte de cierto espesor de la subrasante, puede estimarse, tomando en cuenta la teoría de capas estrechas, mencionada al inicio. En este sentido se propone:

$$E_{disp} = \left[\frac{\sigma_{z_{-1}} \cdot \tan(\phi_1) + C_1}{FS} - \tau_{rz_{-1}} \right] \cdot \gamma_{zr_{-1}} + \frac{C_{1_2}}{FS} \cdot \gamma_{zr_{-1_2}} + \left[\frac{\sigma_{z_{-2}} \cdot \tan(\phi_2) + C_2}{FS} - \tau_{rz_{-2}} \right] \cdot \gamma_{zr_{-2}} + \frac{C_{2_3}}{FS} \cdot \gamma_{zr_{-2_3}} + \left[\frac{\sigma_{z_{-3}} \cdot \tan(\phi_3) + C_3}{FS} - \tau_{rz_{-3}} \right] \cdot \gamma_{zr_{-3}} + \frac{C_{3_4}}{FS} \cdot \gamma_{zr_{-3_4}} + \left[\frac{\sigma_{z_{-4}} \cdot \tan(\phi_4) + C_4}{FS} - \tau_{rz_{-4}} \right] \cdot \gamma_{zr_{-4}} \quad (31)$$

Donde:

$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$: Angulos de fricción de la carpeta, base, subbase y subrasante, respectivamente.

C_1, C_2, C_3, C_4 : Cohesión de la carpeta, base, subbase y subrasante, respectivamente.

C_{1_2} : Cohesión que existe en la interfase carpeta-base.

C_{2_3} : Cohesión que existe en la interfase base-subbase.

C_{3_4} : Cohesión que existe en la interfase subbase-subrasante.

$\tau_{rz_{-1}}, \tau_{rz_{-2}}, \tau_{rz_{-3}}, \tau_{rz_{-4}}$: Esfuerzos tangenciales promedio que se producen en los espesores de la carpeta, base, subbase y subrasante, respectivamente.

$\gamma_{zr_{-1}}, \gamma_{zr_{-2}}, \gamma_{zr_{-3}}, \gamma_{zr_{-4}}$: Distorsiones cortantes promedio que se generan en los espesores de la carpeta, base, subbase y subrasante, respectivamente.

$\gamma_{zr_{-1_2}}$: Distorsión cortante que se genera en la interfase carpeta-base.

$\gamma_{zr_{-2_3}}$: Distorsión cortante que se genera en la interfase base-subbase.

$\gamma_{zr_{-3_4}}$: Distorsión cortante que se genera en la interfase subbase-subrasante.

FS: Factor de seguridad global de la estructura del pavimento.

4. Aplicación práctica

Con la ayuda de los datos indicados para la figura 7, que caracterizan la estructura del pavimento a través de sus parámetros de resistencia cohesión y fricción, conjuntamente con su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, se desea encontrar las deformaciones que se producen en cada subcapa, así como el factor de seguridad global de la estructura del pavimento. Es importante resaltar, que el espesor dado para la base y subbase, puede en una primera aproximación ser obtenido por cualquier método empírico, donde se tome en cuenta el CBR de cada una de ellas y el número de ejes equivalentes de 8.2 ton. Igualmente el espesor de la carpeta puede ser supuesto también inicialmente. El número de ejes equivalentes de 8.2 ton, en este problema se tomó igual a $N_{diseño} = 2 \times 10^6$.

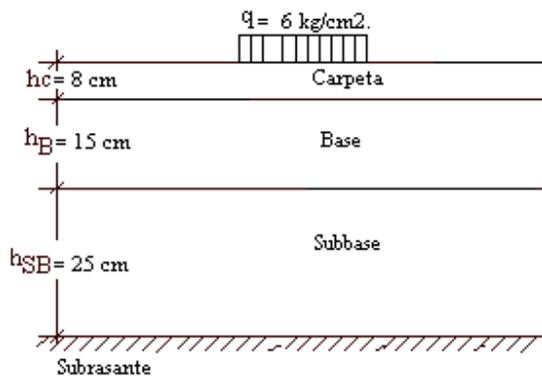


Fig. 7.- Caracterización de la estructura del pavimento a través de los parámetros de resistencia, módulo de elasticidad y coeficiente de poisson, de cada una de las capas.

Datos:

Carpeta:

$C_1 = 50 \text{ kg/cm}^2$ $\phi_1 = 20^\circ$
 $E_1 = 55000 \text{ kg/cm}^2$ $\nu_1 = 0.25$
 Interfase carpeta – base:
 $C_{1,2} = 10 \text{ kg/cm}^2$

Base:

$C_2 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ $\phi_2 = 30^\circ$
 $E_2 = 8000 \text{ kg/cm}^2$ $\nu_2 = 0.35$

Interfase base-subbase:

$C_{2,3} = 0.9 \text{ kg/cm}^2$

Subbase:

$C_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ $\phi_3 = 25^\circ$
 $E_3 = 2000 \text{ kg/cm}^2$ $\nu_3 = 0.45$

Interfase subbase-subrasante:

$C_{3,4} = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

Subrasante:

$C_4 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ $\phi_4 = 0^\circ$
 $E_4 = 800 \text{ kg/cm}^2$ $\nu_4 = 0.50$

También es importante chequear las deformaciones y esfuerzos que se generan en la carpeta y en la subrasante, aplicando algunas ecuaciones clásicas, de máximas deformaciones y esfuerzos.

Solución:

- Determinación de los espesores equivalentes de la estructura del pavimento, a partir de lo presentado en la figura 5, y con la aplicación de las ecuaciones (12), (13), (14) y (15). Estos espesores equivalentes resultaron, en los siguientes valores:

$$\begin{aligned} h_{e_SB_B} &= 45.76 \text{ cm} \\ h_{e_B} &= 20.76 \text{ cm} \\ h_{e_C} &= 20.59 \text{ cm} \\ h_{e_SB_B_C} &= 66.35 \text{ cm} \end{aligned}$$

Para facilitar, la indicación simbólica de las alturas, con las cuales se estiman los esfuerzos, escribiremos la siguiente nomenclatura:

$$\begin{aligned} z_1 &= h_{e_C} \\ z_2 &= h_{e_C} + h_{e_B} \\ z_3 &= h_{e_SB_B_C} \\ z_4 &= h_{_SR} + z_4'' \end{aligned}$$

$$z_4'' = 0.9 \cdot h_{e_SB_B_C} \cdot \left[\frac{E_3}{E_4} \cdot \frac{(1-\nu_4^2)}{(1-\nu_3^2)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Todo el espesor ($h_{e_SB_B_C}$) equivalente (z_4'') en parámetros de la subrasante (E_4, ν_4) puede hallarse aplicando la ec. (13), sustituyendo: h_B por ($h_{e_SB_B_C}$); E_2 por E_3 ; E_3 por E_4 ; ν_2 por ν_3 y ν_3 por ν_4 , resultando un espesor $h_{e_SB_B_C} = 79.40 \text{ cm}$. También se debe indicar, que para la estimación de los esfuerzos en la subrasante, se tomó un espesor de 60 cm de material de subrasante ($h_{_SR}$), como aporte de resistencia, que ayuda a disipar energía.

- Determinación de los esfuerzos en el centro y en la interfase de cada una de las subcapas. Aquí se aplican las ecuaciones presentadas en el apéndice A, para una presión de inflado de 6 kg/cm^2 (85 lb/pulg^2) y un radio de contacto de 12 cm, obtenido entre el valor correspondiente a una carga por rueda de 2125 kg y una carga de 3250 kg, de acuerdo a la figura 10. Los resultados son los siguientes:

Centro de la carpeta

$$\begin{aligned} \sigma_{z,1} &= 5.33 \text{ kg/cm}^2 & \sigma_{\theta,1} &= -0.403 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{r,1} &= 1.61 \text{ kg/cm}^2 & \tau_{rz,1} &= 3.31 \text{ kg/cm}^2 \\ z &= z_1/2 \end{aligned}$$

Interfase carpeta - base

$$\begin{aligned} \sigma_{z,1} &= 2.70 \text{ kg/cm}^2 & \sigma_{\theta,1} &= -0.229 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{r,1} &= 0.14 \text{ kg/cm}^2 & \tau_{rz,1} &= 1.01 \text{ kg/cm}^2 \\ z &= z_1 \end{aligned}$$

Centro de la base

$$\begin{aligned} \sigma_{z,2} &= 1.46 \text{ kg/cm}^2 & \sigma_{\theta,2} &= -0.074 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{r,2} &= 0.028 \text{ kg/cm}^2 & \tau_{rz,2} &= 0.388 \text{ kg/cm}^2 \\ z &= z_1 + (z_2 - z_1)/2 \end{aligned}$$

Interfase base - subbase

$$\begin{aligned} \sigma_{z,2} &= 0.884 \text{ kg/cm}^2 & \sigma_{\theta,2} &= -0.045 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{r,2} &= -0.009 \text{ kg/cm}^2 & \tau_{rz,2} &= 0.174 \text{ kg/cm}^2 \\ z &= z_2 \end{aligned}$$

Centro de la subbase

$$\sigma_{z,3} = 0.544 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_{\theta,3} = -0.009 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{r_3} = 0.005 \text{ kg/cm} \quad \tau_{rz_3} = 0.083 \text{ kg/cm}^2$$

$$z = z_2 + (z_3 - z_2)/2$$

Interfase subbase - subrasante

$$\sigma_{z_3} = 0.366 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_{\theta_3} = -0.006 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{r_3} = 1.04 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^2 \quad \tau_{rz_3} = 0.046 \text{ kg/cm}^2$$

$$z = z_3$$

Centro de la subrasante

$$\sigma_{z_4} = 0.139 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_{\theta_4} = 0.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{r_4} = 8.98 \times 10^{-4} \text{ kg/cm} \quad \tau_{rz_4} = 0.015 \text{ kg/cm}^2$$

$$z = z_3 + (z_4 - z_3)/2$$

- Determinación de los vectores de deformación en cada una de las capas, aplicando la ec. 19. En este caso es necesario conocer las matrices de rotación [T] y de las propiedades del material [D], donde para la primera se considera un ángulo de orientación de las capas ($\alpha = 0$) y un ángulo de buzamiento $\beta = 0$ y para la segunda conocemos el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de cada capa. Los resultados de las deformaciones son los siguientes:

Centro de la carpeta

$$\epsilon_{z_1} = 9.15 \times 10^{-5} \quad \epsilon_{\theta_1} = -3.89 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_{r_1} = 6.895 \times 10^{-6} \quad \gamma_{rz_1} = 1.51 \times 10^{-4}$$

$$\gamma_{rz_{1-2}} = 4.57 \times 10^{-5} \quad (\text{valor obtenido})^4$$

Centro de la base

$$\epsilon_{z_2} = 1.84 \times 10^{-4} \quad \epsilon_{\theta_2} = -7.42 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_{r_2} = -5.70 \times 10^{-5} \quad \gamma_{rz_2} = 1.37 \times 10^{-4}$$

$$\gamma_{rz_{2-3}} = 6.31 \times 10^{-5} \quad (\text{valor obtenido})^3$$

Centro de la subbase

$$\epsilon_{z_3} = 2.73 \times 10^{-4} \quad \epsilon_{\theta_3} = -1.28 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_{r_3} = -1.18 \times 10^{-4} \quad \gamma_{rz_3} = 1.20 \times 10^{-4}$$

$$\gamma_{rz_{3-4}} = 6.67 \times 10^{-5} \quad (\text{valor obtenido})^3$$

Centro de la subrasante

$$\epsilon_{z_4} = 1.73 \times 10^{-4} \quad \epsilon_{\theta_4} = -8.74 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_{r_4} = -8.57 \times 10^{-5} \quad \gamma_{rz_4} = 2 \times 10^{-5}$$

- Determinación del factor de seguridad global (FS), aplicando la ec. (29), (30) y (31). En este problema estamos considerando que la energía interna recuperable en cada una de las capas es cero, para lo cual resulta **FS = 3.516**. Valor que se considera apropiado para una estructura expuesta permanentemente a daños y deterioro de sus materiales, en corto tiempo.

Cuando se suman los valores de la tabla B3⁵ del apéndice B, a los valores de los esfuerzos dados anteriormente, el factor de seguridad disminuye un poco, a un valor **FS = 3.335**, reflejándose el peso de la llanta más cercana, a la considerada. Si se hubiese considerado los valores de la energía interna recuperable, el factor de seguridad hubiese sido mayor, debido a la menor disipación de la energía.

- Chequeo de las deformaciones en la carpeta y subrasante, a través de algunas leyes conocidas de fatiga y deformación.

Para la carpeta

$$\epsilon_{t_admissible} = 3.48 \cdot 10^{-3} \cdot (N_diseño)^{-0.204}$$

La cual para $N_{diseño} = 2 \times 10^6$, resulta :

$$\epsilon_{t_admissible} = 1.804 \times 10^{-4} \quad \text{valor mucho mayor a } \epsilon_{\theta_1} = -3.89 \times 10^{-5} \quad \text{ó } \epsilon_{r_1} = 6.895 \times 10^{-6}, \text{ obtenidos anteriormente.}$$

Para la subrasante

$$\epsilon_{z_admissible} = 1.8 \cdot 10^{-2} \cdot (N_diseño)^{-0.25}$$

Evaluando, resulta $\epsilon_{t_admissible} = 4.79 \times 10^{-4}$, valor mayor $\epsilon_{z_3} = 1.61 \times 10^{-4}$.

$$\sigma_{z_admissible} = \frac{0.007 \cdot E_{subrasante}}{1 + 0.7 \cdot \log(N_diseño)}$$

Evaluando se obtiene $\sigma_{z_admissible} = 1.04 \text{ kg/cm}^2$, siendo mayor que $\sigma_{z_3} = 0.366 \text{ kg/cm}^2$.

De acuerdo a estos valores admisibles, la estructura inicial indicada en la figura 7, pudiera modificarse, bien sea, disminuyendo sus espesores de las capas o haciendo menos exigentes el material que constituye esas capas.

5. Conclusión

Hemos visto como la aplicación del concepto de energía, a permitido deducir una ecuación que ayuda a evaluar la estructura de un pavimento. El planteamiento, ha sido hecho tomando en cuenta el incremento de energía interna y la energía que se disipa en la estructura del pavimento. Además se toma en cuenta la energía recuperable de las capas, cuando se suprime el estado de esfuerzos.

Creemos que lo planteado es de interés, ya que en otras metodologías existentes para el diseño de pavimentos, son ajenas al manejo de este concepto de energía y a la determinación de un factor de seguridad.

Se ha presentado un artículo, donde se aplica la teoría de elasticidad, para el cálculo de esfuerzos y

⁴ Valor obtenido con los esfuerzos correspondientes a la interfase.

⁵ En la tabla no se indican los esfuerzos en los centros de cada subcapa.

deformaciones en tres direcciones ortogonales de un elemento dentro de la estructura del pavimento. En este sentido, se han modificado las ecuaciones de Boussinesq para carga puntual, para hacerlas extensivas a la aplicación de una carga circular.

Se resolvió un problema, donde se presenta una estructura inicial caracterizada por sus respectivos espesores, parámetros de resistencia y propiedades elásticas. Se evaluó la seguridad de la estructura, encontrando un factor de seguridad para la misma, de 3.52, valor que se considera apropiado para este tipo de obra. También se ha comparado las deformaciones en la carpeta y en la subrasante, con valores admisibles permitidos, hallándose que el diseño es aceptable, y que tal vez pudiéramos disminuir espesores ó cambiar las propiedades de los materiales, de manera de acercarnos a las deformaciones admisibles, sin embargo esto no es conveniente, ya que el factor de seguridad se reducirá.

Agradecimiento

A la Señora Magaly Varona, por su gran profesionalismo, eficacia e inteligencia.

Referencias

Chen W., (1975), Limit Analysis and Soil Plasticity, Elsevier, Amsterdam .

Wittke W., (1990), Rock Mechanics, Springer – Verlag.
Rojas G. y De Barcia E., (2002), Modelo de comportamiento teórico en suelos, Ciencia Ingeniería, ULA.

Apéndice A

Los esfuerzos generados por una carga puntual en un punto del semi-espacio de Boussines, son presentados aquí. La figura 8, ilustra el semi-espacio de Boussines, a través de un sistema de coordenadas tridimensional, definidos por los ejes x, y, z, indicándose los esfuerzos normales y cortantes que actúan en las respectivas caras de un elemento, ubicado a cierta profundidad (z). Estos esfuerzos son generados por la carga puntual Q, cuyo punto de acción es origen del sistema.

La simbología presentada en la figura 8, se describe a continuación.

σ_z : Esfuerzo vertical en el elemento

σ_r : Esfuerzo radial en el elemento

σ_θ : Esfuerzo tangencial al elemento

τ_{rz} : Esfuerzo cortante actuando en las caras z y r.

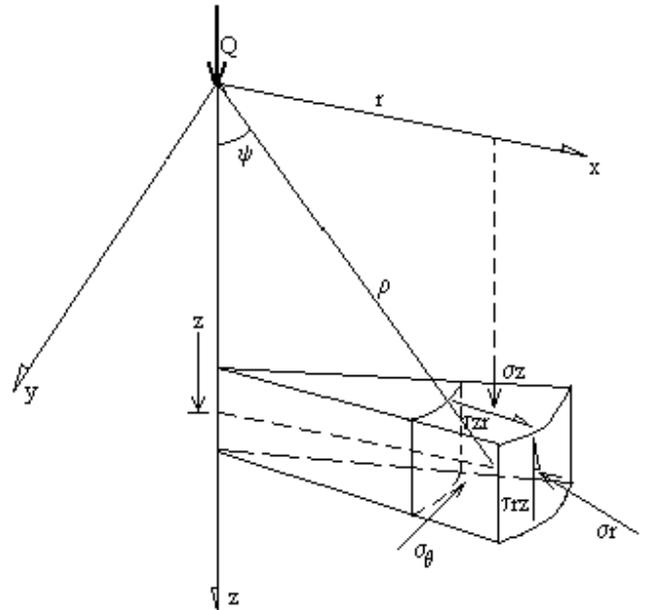


Fig. 8.- Esfuerzos producidos por una carga puntual en un punto del semi-espacio de Boussines.

Las expresiones de dichos esfuerzos vienen dadas por:

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{z^3}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}} \quad (32)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot r^2 \cdot z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{r^2 + z^2 + z \cdot \sqrt{r^2 + z^2}} \right] \quad (33)$$

$$\sigma_\theta = - \frac{Q}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \left[\frac{\frac{z}{(r^2 + z^2)^{3/2}}}{\frac{1}{r^2 + z^2 + z \cdot \sqrt{r^2 + z^2}}} \right] \quad (34)$$

$$\tau_{rz} = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{r \cdot z^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (35)$$

Las cuatro ecuaciones anteriores, son ampliadas en este artículo, para la estimación de esfuerzos producidos en un elemento de suelo, por una carga circular aplicada en la superficie, la cual representa la carga en la llanta del camión. En este sentido, si la ecuación (32) se escribe como diferencial, resultaría:

$$d\sigma_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot r^2 \cdot z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{r^2 + z^2 + z \cdot \sqrt{r^2 + z^2}} \right] \cdot dQ \quad (36)$$

Para un área circular de radio "rd" tal como se muestra en la figura 9, cargada uniformemente con un esfuerzo q, un diferencial de carga dQ se puede expresar como:

$$dQ = q \cdot dA \quad (37)$$

Donde:

dA: Diferencial de área ubicado a una distancia "r" a partir del centro.

$$dA = r \cdot dr \cdot d\theta \quad (38)$$

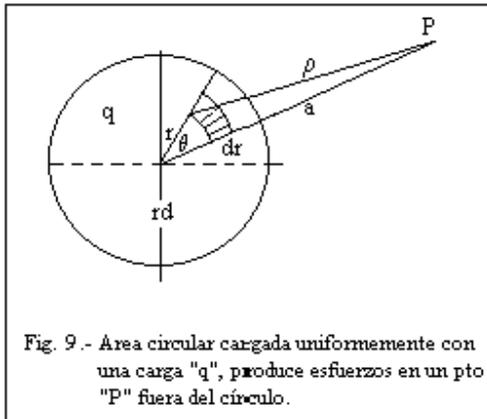
Sustituyendo la ecuación (38) en (37), se obtiene:

$$dQ = q \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (39)$$

Remplazando la ecuación (39) en (36), se obtiene:

$$d\sigma_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot r^2 \cdot z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{r^2 + z^2 + z \cdot \sqrt{r^2 + z^2}} \right] \cdot q \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \quad (40)$$

La solución de esta última ecuación, se resuelve entre sus respectivos límites, tal como se indica:



$$\sigma_r = \frac{q}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} d\theta \int_0^{rd} \left[\frac{3 \cdot r^2 \cdot z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{r^2 + z^2 + z \cdot \sqrt{r^2 + z^2}} \right] \cdot r \cdot dr \quad (41)$$

Si esta ecuación se escribe en forma de sumatoria, se tiene:

$$\sigma_r = \frac{q}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_0^{2 \cdot \pi} \sum_0^{rd} \left[\frac{3 \cdot r^2 \cdot z}{(r^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{r^2 + z^2 + z \cdot \sqrt{r^2 + z^2}} \right] \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta \quad (42)$$

Una observación importante respecto a las expresiones de los esfuerzos anteriores es la siguiente: Si el punto "P" de la figura 9 ubicado a cierta profundidad "z", se encuentra fuera del área circular, el radio ρ indicado, vendrá dado por $\rho^2 = r^2 + a^2 + z^2 - 2 \cdot a \cdot r \cdot \cos(\theta)$. Sin embargo si el punto "P" coincide con el centro del círculo, "a" se hace cero y el radio ρ , se determina por $\rho^2 = r^2 + z^2$. En nuestro análisis el punto de interés es el centro del círculo.

De manera similar, aplicando la ecuación (42) a los esfuerzos tangencial σ_θ , vertical σ_z y cortante τ_{rz} , se encuentra:

$$\sigma_\theta = -\frac{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot q}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_0^{2 \cdot \pi} \sum_0^{rd} \left[\frac{z}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{1}{r^2 + z^2 + z \cdot \sqrt{r^2 + z^2}} \right] \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta \quad (43)$$

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot q}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_0^{2 \cdot \pi} \sum_0^{rd} \left[\frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \right] \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta \quad (44)$$

$$\tau_{rz} = \frac{3 \cdot q}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_0^{2 \cdot \pi} \sum_0^{rd} \left[\frac{r \cdot z^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \right] \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta \theta \quad (45)$$

Apéndice B

La figura 10, muestra la planta de una combinación permitida de un camión de carga, producidos por Carrocerías Chama, donde se indica el número de ejes, dimensiones y carga por rueda. En las tablas B1, B2, B3 y B4, se presentan los esfuerzos que producen algunas ruedas cercanas al punto "P" ubicado en la rueda 1 del eje 2 de la figura 9, calculados a partir de las ecuaciones 42, 43, 44 y 45, para un espesor de carpeta de ($h_c = 8$ cm), un espesor de base de ($h_B = 15$ cm) y un espesor de subbase de ($h_{SB} = 25$ cm).

Tabla B1.-Influencia de la Rueda R2 de los Ejes 3 y 1 en P. (a = 134.4 cm)

Esfuerzo Kg/cm ²	Interfase Carpeta-base	Interfase Base-Subbase	Interfase Subbase-subrasante
σ_z	4.96×10^{-4}	0.004	0.014
σ_θ	0.022	0.008	0.0012
σ_r	-0.026	-0.012	-0.004
τ_{rz}	2.64×10^{-4}	8.96×10^{-4}	0.0016

Tabla B3.-Influencia de la Rueda R2 del eje 2 en P. (a = 18.7 + 18.7) cm

Esfuerzo Kg/cm ²	Interfase Carpeta-base	Interfase Base-Subbase	Interfase Subbase-subrasante
σ_z	0.124	0.229	0.191
σ_θ	0.026	-0.009	-0.003
σ_r	-0.081	-0.02	-0.002
τ_{rz}	0.052	0.046	-0.024

Tabla B2.-Influencia de la Rueda R1 de los Ejes 3 y 1 en P (a = 135.7 cm).

Esfuerzo Kg/cm ²	Interfase Carpeta-base	Interfase Base-Subbase	Interfase Subbase-subrasante
σ_z	6.19×10^{-4}	0.004	0.013
σ_θ	0.021	0.008	0.001
σ_r	-0.026	-0.013	-0.004
τ_{rz}	2.52×10^{-4}	8.57×10^{-4}	0.002

Tabla B4.-Influencia de la Rueda R1 del eje 2 en P. (a = 0.00 cm)

Esfuerzo Kg/cm ²	Interfase Carpeta-base	Interfase Base-Subbase	Interfase Subbase-subrasante
σ_z	2.699	0.884	0.366
σ_θ	-0.229	-0.045	-0.006
σ_r	0.140	-0.009	1.04×10^{-4}
τ_{rz}	1.006	0.174	0.046

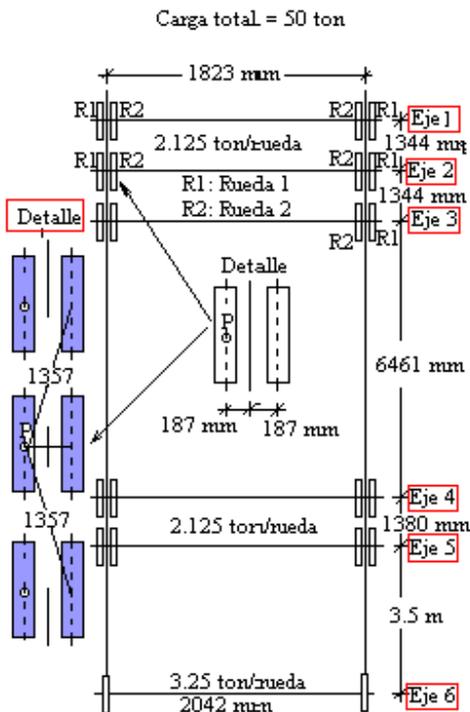


Fig. 10.- Planta indicando la carga por rueda y distancia entre ejes.