

**DESARROLLO DE SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS
RÍGIDOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA PCA**

TESIS DE GRADO

PRESENTADO POR:

JEFFERSON HARLEY CASTRO MEZA

DIRECTOR: ARMANDO OROBIO



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD INGENIERIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA – EICG

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. PROBLEMA	2
3.1 DESCRIPCIÓN	2
3.2 FORMULACIÓN	3
4. OBJETIVO	3
4.1 General	3
4.2 Específicos	3
5. JUSTIFICACIÓN	4
6. MARCO TEORICO	5
6.1 ESTADO DEL ARTE	5
6.2 ANTECEDENTES	12
7. METODOLOGIA DE DISEÑO PCA	11
7.1 Factores de diseño	11
7.2 Procedimiento de diseño	28
7.3 Recomendaciones barras de acero juntas	29
8. DESARROLLO DE SOFTWARE	33
8.1 Fundamento teórico del código	33
8.2 Paso a paso del programa	37
9. CONCLUSIONES	52
10. RECOMENDACION	52
11. LIMITACION	52
REFERENCIAS	53
BIBLIOGRAFIA	53

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Figura 3. Ecuaciones para análisis de fatiga.</i>	9
<i>Figura 4. Ecuaciones para análisis de erosión.</i>	9
<i>Figura 3. Estructura de pavimento rígido.</i>	11
<i>Figura 4. Resistencia a la flexión del hormigón.</i>	13
<i>Figura 5. Correlaciones de ensayos con el valor de k.</i>	15
<i>Figura 6. Hoja de cálculo para metodología PCA.</i>	19
<i>Figura 7. Nomograma para análisis de fatiga.</i>	23
<i>Figura 8. Nomograma para análisis de erosión, sin berma.</i>	26
<i>Figura 9. Nomograma para análisis de erosión, con berma</i>	28

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla. 1: Valor de k con base sin tratar.</i>	14
<i>Tabla 2: Valor de k con base tratada.</i>	14
<i>Tabla 3: Esfuerzo equivalentes sin berma</i>	21
<i>Tabla 4: Esfuerzo equivalentes con berma</i>	22
<i>Tabla 5: Factor de erosión, con dovela y sin berma</i>	25
<i>Tabla 6: Factor de erosión, sin dovela y sin berma</i>	25
<i>Tabla 7: Factor de erosión, con dovela y con berma</i>	27
<i>Tabla 8: Factor de erosión, sin dovela y con berma</i>	27
<i>Tabla 9. Recomendación para las barras de anclaje</i>	30
<i>Tabla 10. Recomendaciones para la selección de los pasadores de carga</i>	31

1. RESUMEN

Considerando el aumento de la construcción y diseños de pavimentos rígidos en los últimos años y también teniendo en cuenta la amplia utilización a nivel nacional del método de diseño de pavimentos rígidos de la Portland Cement Association versión de 1984, se desarrolló un software que permite dimensionar los espesores de las estructuras de este tipo de pavimentos con este método. El código del programa se realizó en Matlab y se exportó a ejecutable de Windows, en la interfaz de usuario se puede introducir los diferentes parámetros que permiten efectuar los análisis de fatiga y de erosión para obtener así el dimensionamiento de la estructura de pavimento. Esta herramienta será de gran utilidad en el medio ya que no tendrá ningún costo, permitirá evaluar fácilmente los cambios en los parámetros y tendrá una mayor precisión al momento de calcular el espesor, ya que actualmente se conocen las ecuaciones de diseño de la metodología desarrollada de la PCA.

2. INTRODUCCION

En nuestro país y en la mayoría de países latinoamericanos, el diseño de las estructuras de pavimentos rígidos es realizado utilizando las recomendaciones establecidas en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) edición de 1993, la cual corresponde a una metodología empírica, que tiene sus fundamentos principalmente en la prueba AASHO Road Test (American Association of State Highway Officials), desarrollada en la década de 1960.

Otro método muy conocido, adoptado y con bases mecanicistas es el desarrollado por la Portland Cement Association (PCA) edición 1984, el cual es usado mediante tablas de diseño y nomogramas. Por lo anterior se considera importante desarrollar un software que agilice el trabajo del ingeniero civil utilizando la metodología PCA, ya que actualmente se cuenta con las ecuaciones que describe el comportamiento de las cartas de diseño.

3. PROBLEMA

3.1. DESCRIPCION

La metodología de diseño para pavimentos rígidos creada en Estados Unidos por la Portland Cement Association (PCA) y publicada en 1984, es mecanicista a diferencia de la AASHTO, y también la más usada en el medio, dicha metodología es usada por los ingenieros mediante unas cartas de diseño (tablas y nomogramas), ya que las ecuaciones no fueron publicadas por la PCA en el artículo. También la PCA desarrollo un programa, el cual es un software privado, de alto costo y se encuentra en el idioma inglés.

La universidad de Illinois, publico en el 2001 una investigación donde se encuentran las ecuaciones por las cuales se desarrollaron las cartas de diseño, desarrollando también un software que con los sistemas operativos actuales no funciona correctamente, por problemas de compatibilidad.

La mayoría de los ingenieros Latinoamericanos encargados del diseño de pavimentos rígidos, en la actualidad hacen sus cálculos manualmente o utilizan un utilizan programas solamente para resolver los nomogramas, demorándose mucho tiempo en estos cálculos que podrían ser automatizados y manejados de una manera integral, ya que la herramienta computacional que existente es de alto costo y se encuentra en Ingles; creándose así, una brecha tecnológica entre las grandes empresas y las empresas de consultoría de pequeño o mediano tamaño; también se presenta una dependencia de los software privados creados por los países desarrollados.

Por tal razón es necesario desarrollar un software de versión libre que se encuentre en español y ayude al ingeniero civil de américa latina en el diseño de pavimentos rígidos; convirtiendo el mercado del diseño de pavimentos en un campo más competente.

3.2. FORMULACION

¿Cómo a partir de las investigaciones realizadas por la universidad de Illinois acerca del artículo de la PCA, se podría desarrollar un programa para el diseño de pavimentos rígidos?

4. OBJETIVO

4.1. GENERAL

- Desarrollar un programa para el diseño de pavimentos rígidos por el método de la PCA.

4.2. ESPECIFICOS

- Generar un código en Matlab para el desarrollo de la interfaz de usuario GUI y la solución de las ecuaciones.
- Crear una interfaz de usuario con archivo ejecutable.
- Crear un manual de usuario para dar a conocer el funcionamiento del software y así facilitar su manejo.

5. JUSTIFICACION

Actualmente se han desarrollado tres programas para encontrar el espesor del pavimento rígido. PCAPAV el programa desarrollado por los creadores de la metodología PCA el cual es un software privado de difícil acceso para la pequeña consultoría debido al costo y al idioma que maneja. El otro programa utilizado es el PCAWIN creado en la universidad de Illinois en el año 2001, las investigaciones realizadas por esta universidad permitieron hallar las ecuaciones por las cuales se desarrollaron las tablas y nomogramas de diseño del artículo “THICKNESS DESIGN FOR CONCRETE HIGHWAY AND STREET PAVEMENTS” este software tiene las mismas desventajas que el anterior y posee problemas de compatibilidad con los sistemas operativos actuales ya que al momento de ejecutarlo el programa no abre, pero en este documento se muestran las ecuaciones de diseño.

El último programa desarrollado respecto a esta temática es el de la universidad del Cauca “BS-PCA” versión 1.2 de junio del 2003, el cual es un software libre muy utilizado en nuestra región y país. El cual resuelve los nomogramas de diseño publicados por la PCA.

En este proyecto se realizara un software libre para el diseño de pavimento rígidos que a diferencia del anterior se va a desarrollar mediante las ecuaciones publicadas en el artículo “PCA-WIN PROGRAM FOR JOINTED CONCRETE PAVEMENT DESIGN” de la universidad de Illinois, pretendiendo obtener una mejora en la precisión de los resultados lo que puede conllevar a una optimización en el espesor del pavimento rígido creando posibles disminuciones de este y así mismo reduciendo costos. Como valor agregado el software reportara unas recomendaciones de dovelas y barras de anclaje, para facilitar aún más el trabajo de los diseñadores.

6. MARCO TEORICO

6.1. ESTADO DEL ARTE

El método de diseño de la Portland Cement Association, es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto hidráulico. Los aspectos indicados en éste apartado se basan principalmente en lo indicado en el manual de diseño de la PCA (Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements) edición 1984.

La reseña histórica que se indica a continuación, está basada en los aspectos indicados en la Transportation Research Circular número E-C118 publicada por la Transportation Research Board of the National Academies, donde se indica, entre otros, que en 1966 la PCA introdujo el primer procedimiento mecanístico-empírico para el diseño de espesores de pavimentos de concreto. El método fue desarrollado por P. Fordyce y R. Packard para pavimentos de concreto simple, con juntas y sin dovelas, basados en los análisis desarrollados por Westergaard y presentándolos en cartas de influencia realizadas por Pickett y Ray; los resultados permitían seleccionar un espesor basado en consideraciones de daño acumulado en fatiga. Posteriormente los resultados de la AASHO Road Test permitieron calibrar la metodología para el diseño. Posteriormente la metodología de diseño fue mejorada a través de recomendaciones de investigadores como E. J. Yoder, G. Ray, R. Packard y B. Colley de la PCA, con la llegada de las computadoras y el desarrollo de la metodología de elemento finito, los procedimientos de diseño incluyeron la influencia de barras de dovela y del confinamiento lateral. En 1977 Darter y Barenberg desarrollaron un procedimiento de diseño para la Federal Highway Administration (FHWA) y Tayabji, Colley y Packard para la PCA en 1984, considerando además de la fatiga, los efectos de bombeo o “pumping”; con este procedimiento la PCA introdujo una nueva metodología de diseño en 1984 (la versión vigente del método), basado en un análisis de elemento finito, no solamente considerando fatiga sino que también considerando el criterio de erosión. Así mismo, la metodología permitió considerar el uso de dovelas en juntas y de elementos para

dar apoyo lateral a la losa de concreto. [Transportation Research Circular, 2007: p. 38-39] En general, el método de diseño de la PCA está basado en:

1. Análisis comprensivo de esfuerzos en el concreto y deflexiones en las juntas del pavimento, esquinas, y bordes, por un programa de computadora de elemento finito.
2. Modelos y pruebas a escala verdadera como la Arlington Test y varios proyectos de investigación dirigidos por la PCA y otras agencias acerca de sub-bases, juntas y hombros de concreto.
3. Pavimentos experimentales sujetos a pruebas de tráfico controlado, tales como la Bates Test Road, the Pittsburg Test Highway, the Maryland Road Test, the AASHO Road Test, y estudios de pavimentos de autopistas en servicio realizado por varios departamentos de estado de transporte.
4. El desempeño de pavimentos construidos normalmente sujetos a tráfico normal.

El método de diseño de la PCA considera dos criterios de falla: el criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas y el criterio del esfuerzo de fatiga.

- a) El criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas, el cual reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo (erosión del terreno de soporte de la losa de concreto) y diferencias de elevaciones en las juntas.
- b) El criterio del esfuerzo de fatiga, el cual reconoce que el pavimento pueda fallar debido a excesivas repeticiones de carga.

A continuación se indican los principales aspectos relacionados con cada uno de los criterios de falla antes referidos.

- Erosión.

El criterio de erosión es utilizado para limitar la deflexión que se produce en los bordes de las losas de concreto, juntas y esquinas del pavimento por efecto del bombeo. El bombeo es definido por el departamento de ingeniería civil y ambiental de la universidad de Washington, (WSDOT Pavement Design), como “el movimiento de material por debajo de la losa de concreto o eyección de material desde abajo de la losa, como resultado de la presión del agua. El agua acumulada por debajo de la losa será presurizada cuando la losa flexione debido a carga”. El bombeo ocurre debido a muchas repeticiones de cargas de ejes pesados en las esquinas de la losa de concreto y bordes, erosión de subrasante, subbase, y materiales del hombro; lo cual genera huecos bajo y junto a la losa. La erosión se cuantifica en términos de porcentaje del daño total por erosión, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobre diseñada.

- Fatiga.

El análisis del criterio de fatiga es utilizado para evaluar los esfuerzos producidos en las losas del pavimento, ante la aplicación de cargas sobre las losas, lo cual puede producir esfuerzos excesivos, que generan agrietamientos. El objetivo es mantener los esfuerzos en el concreto, que constituye la losa, dentro de los límites de seguridad, basándose en el factor de relación de esfuerzos, el cual corresponde al esfuerzo de flexión dividido entre el módulo de ruptura del concreto a los 28 días.

La fatiga se cuantifica en términos de porcentaje de absorción de la fatiga, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobre diseñada. Asimismo, algunos aspectos de diseño, adicionales a la determinación del espesor, tomados en cuenta por el método de diseño de la PCA, para asegurar el funcionamiento y la vida de los pavimentos de concreto, se mencionan a continuación:

-Soporte razonablemente uniforme.

-Prevención de bombeo en subbase relativamente delgada no tratada o tratada con cemento, en proyectos donde el tránsito pesado esperado sea lo suficientemente grande, causando bombeo.

-Uso de un diseño de junta que proporcionará adecuada transferencia de carga; que permita el uso de selladores en las juntas de ser requeridos para la efectividad de las mismas.

- Uso de un diseño de mezcla de concreto y agregados que proveerán concreto de calidad con la resistencia y durabilidad necesaria para una larga vida bajo, las condiciones de exposición actuales.

De acuerdo a lo indicado en el manual de diseño de la PCA, las deflexiones críticas en el pavimento ocurren en la esquina de la losa de concreto, donde la carga del eje está posicionada en la junta, con las llantas en o muy cerca de la esquina. Cabe indicar que al proporcionar apoyo lateral al pavimento (hombro), se reducen considerablemente las deflexiones en la esquina. La ubicación de las cargas de las llantas del tráfico pesado en la parte externa del borde del pavimento crea condiciones más severas que cualquier otra posición de carga; al mover hacia dentro la posición de las llantas, unas pocas pulgadas desde el borde, los efectos decrecen substancialmente. Para el análisis por esfuerzo de fatiga, la PCA toma la condición más severa: 6% de tránsito pesado; para el análisis por erosión, el cual involucra deflexión en la esquina de la losa, la PCA asume el caso más severo, otra vez 6% de tránsito pesado en el borde. Donde no hay apoyo lateral, las cargas en las esquinas son las críticas (6% del tránsito pesado); y donde hay apoyo lateral, el mayor número de cargas hacia el interior desde la esquina del pavimento son las críticas (94% del tráfico pesado). Lo anterior resulta de estudios realizados por Taragin en 1958, los cuales mostraron que muy poco del tránsito pesado circula justo en el borde del pavimento, para carriles de 12 pies con hombros sin pavimentar, la mayoría del tránsito pesado circula con sus llantas exteriores ubicadas aproximadamente a dos pies del borde.

6.2. ANTECEDENTES

Para este proyecto se cuenta con tres antecedentes principales los cuales se explicaran a continuación:

- Artículo publicado por Portland cement association en 1984 “Thickness Desing for concrete highway and street pavements” en el cual se encuentra la teoría para diseño de pavimentos rígidos las principales consideraciones de este método son las siguientes: Grado de transferencia de cargas proporcionado en las juntas transversales, Consideración de bermas de concreto adyacentes a las losas, posibilidad de utilizar sub-bases de concreto pobre, granulares, y estabilizadas, Planteamiento de dos criterios de análisis: fatiga y erosión.
- Artículo publicado por la universidad de Illinois “pcawin program for jointed concrete pavement design” en 2001. En este documento se publican las ecuaciones para análisis de fatiga y de erosión revelando así de donde salen las tablas y nomogramas de diseño del artículo anteriormente mencionado. Algunas de estas ecuaciones se mostraran a continuación y se explicaran detalladamente en el capítulo 8:

$$\sigma_{eq} = \frac{6 * M_e}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4$$

$$M_e = \begin{cases} -1600 + 2525 * \log(\ell) + 24.42 * \ell + 0.204 * \ell^2 \\ = 3029 - 2966.8 * \log(\ell) + 133.69 * \ell - 0.0632 * \ell^2 \\ = (-970.4 + 1202.6 * \log(\ell) + 53.587 * \ell) * \\ (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) \\ = (2005.4 - 1980.9 * \log(\ell) + 99.008 * \ell) * \\ (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) \end{cases}$$

$$f_1 = \begin{cases} (24/SAL)^{0.06} * (SAL/18) & SA \\ (48/TAL)^{0.06} * (TAL/36) & TA \end{cases}$$

$$f_2 = \begin{cases} 0.892 + h/85.71 - h^2/3000 & NS \\ 1 & WS \end{cases}$$

$$f_3 = 0.894 \text{ for 6\% truck at the slab edge}$$

$$f_4 = 1/[1.235 * (1 - CV)]$$

Fig. 1: ecuaciones para análisis De fatiga. PCAWIN 2001

$$\delta_{eq} = \frac{P_c}{k} * f_5 * f_6 * f_7$$

$$P_c = \begin{cases} 1.571 + \frac{46.127}{\ell} + \frac{4372.7}{\ell^2} - \frac{22886}{\ell^3} \\ 1.847 + \frac{213.68}{\ell} - \frac{1260.8}{\ell^2} + \frac{22989}{\ell^3} \\ 0.5874 + \frac{65.108}{\ell} + \frac{1130.9}{\ell^2} - \frac{5245.8}{\ell^3} \\ 1.47 + \frac{102.2}{\ell} - \frac{1072}{\ell^2} + \frac{14451}{\ell^3} \\ -0.3019 + \frac{128.85}{\ell} + \frac{1105.8}{\ell^2} + \frac{3269.1}{\ell^3} \\ 1.258 + \frac{97.491}{\ell} + \frac{1484.1}{\ell^2} - \frac{180}{\ell^3} \\ 0.018 + \frac{72.99}{\ell} + \frac{323.1}{\ell^2} + \frac{1620}{\ell^3} \\ 0.0345 + \frac{146.25}{\ell} - \frac{2385.6}{\ell^2} + \frac{23848}{\ell^3} \end{cases}$$

$$f_5 = \begin{cases} SAL/18 & SA \\ TAL/36 & TA \end{cases}$$

Fig. 2: ecuaciones para análisis De erosión. PCAWIN 2001

- “HERRAMIENTA DE SOFTWARE PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS BS-PCA 1984” diseñado por Ing. Efrain de Jesus Solano Fajardo, Ing. Carlos Alberto Benavidez de la Universidad del Cauca. El programa llamado BSPCA fue realizado en Visual Basic el cual requiere la introducción de los diferentes parámetros y efectuando los análisis de fatiga y erosión permite obtener el dimensionamiento de la estructura de pavimento. Una vez realizado el dimensionamiento permite realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la incidencia de la variación de los respectivos parámetros en el análisis de los dos criterios de diseño fatiga y erosión es contemplado por el método. Este programa se desarrolla a partir de las cartas y nomogramas publicados por la PCA (ver primer antecedente).

7. METODOLOGIA DE DISEÑO PCA

La versión actual del método de la PCA fue publicada en 1984. En la misma se han introducido numerosos cambios con respecto a la anterior, aparecida en 1966. Para ello se han aprovechado los avances en los métodos de análisis de pavimentos, los cuales han permitido estudiar la influencia de una serie de factores que no pudieron ser considerados de forma adecuada en la versión precedente, tales como pavimentos con pasadores en las juntas, bases de concreto pobre, bermas de concreto, deterioro del pavimento debidos a la erosión de la base, vehículos pesados con ejes tridem, etc. En la siguiente figura se muestra la estructura de una vía con losa de rodadura en pavimento rígido.

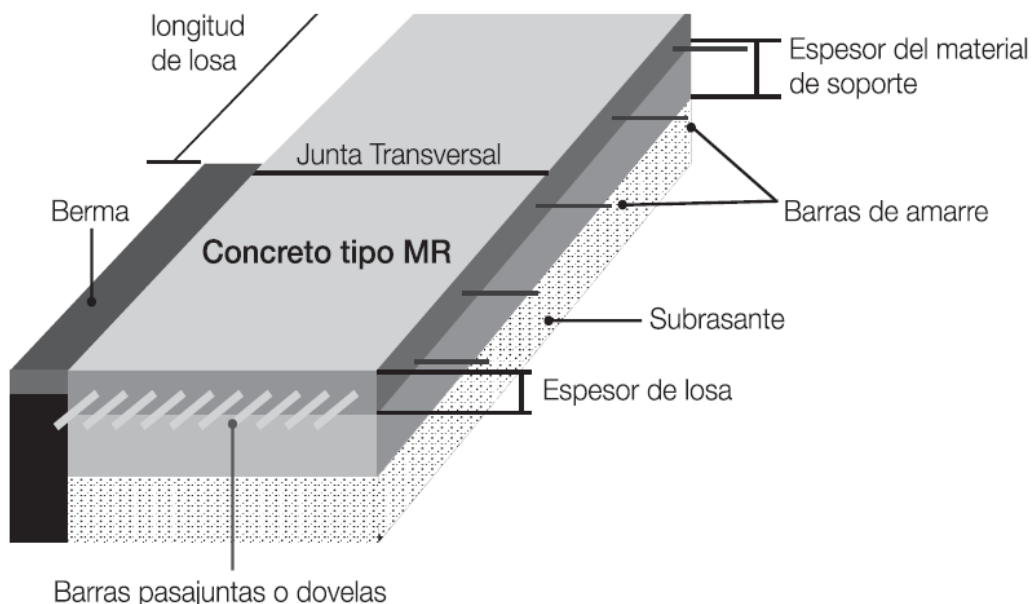


Fig. 3: Estructura de pavimento rígido. Manual de diseño de pavimentos de concreto, ministerio de transporte.

7.1 Factores de diseño

Después de seleccionar el tipo de pavimento de hormigón (pavimento simple con ó sin pasajuntas, pavimento reforzado con juntas con pasajuntas, o pavimento continuamente reforzado), tipo de subbase si es necesaria, y tipo de berma (con ó sin berma de hormigón, sardinel y cuneta o sardinel integral); el espesor de diseño es determinado en base a los cuatro factores siguientes:

- Resistencia del hormigón a la flexión (módulo de rotura MR).
- Resistencia de la subrasante, ó subrasante y subbase combinadas (k).
- Los pesos, frecuencias, y tipos de cargas axiales de camión que el pavimento soportará.
- El periodo de diseño, que en éste y otros procedimientos usualmente es considerado como de 20 años, pudiendo ser más ó menos.

7.1.1 Resistencia del Hormigón a la Flexión

La resistencia del hormigón a la flexión es considerada en el procedimiento de diseño mediante el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo las cargas repetitivas de camiones.

El pandeo de un pavimento de hormigón bajo cargas axiales produce esfuerzos de compresión y flexión. Sin embargo, las relaciones de los esfuerzos y resistencias de compresión son demasiado pequeños para influenciar en el diseño del espesor de la losa. Las relaciones de los esfuerzos y resistencias de flexión son mucho más altos, excediendo a menudo valores de 0.5. Como resultado, los esfuerzos flexores y la resistencia a la flexión del hormigón son usados en el diseño de espesores. La resistencia a la flexión es determinada mediante pruebas de módulo de rotura, realizadas usualmente sobre vigas de 6x6x30-pulg.

Para proyectos específicos, la dosificación del hormigón debería ser diseñada para proporcionar adecuada durabilidad y resistencia flexora, al menor costo posible. Los procedimientos de diseño de mezclas son descritos en la publicación PCA “Diseño y Control de Mezclas de Concretó”.

El módulo de rotura puede ser obtenido mediante cargas en cantiliver, en un punto central, o en los tercios. Una diferencia importante en estos métodos de prueba es, que la prueba de la carga en los tercios da la mínima resistencia en el tercio central de la viga ensayada, mientras que los otros dos métodos muestran la resistencia en un sólo punto. El valor determinado por el método más conservador de la carga en los tercios (ASTM C78), es usado para el diseño en éste procedimiento.

Las pruebas de módulo de rotura son comúnmente realizadas a los 7, 14, 28, y 90 días. Los resultados de prueba a los 7 y 14 días son comparados con los requerimientos de las especificaciones para control de trabajo y para determinar cuándo los pavimentos pueden ser abiertos al tráfico.

Los resultados del ensayo a los 28 días han sido comúnmente usados para el diseño de espesores de pavimentos de carreteras y calles, y son los recomendados para usar con este procedimiento; los resultados a los 90 días son usados para el diseño de pistas de aterrizaje. Estos valores son usados debido a que hay muy pocas repeticiones de esfuerzo durante los primeros 28 a 90 días de la vida del pavimento en comparación con los millones de repeticiones de esfuerzo que ocurrirán más tarde.

El hormigón continúa adquiriendo mayor resistencia con la edad tal como muestra la Fig. 4. La resistencia ganada es mostrada por la curva llena, que representa los valores MR promedio para varias series de ensayos de laboratorio, de vigas de prueba curadas en el campo y secciones de hormigón tomadas de pavimentos en servicio.

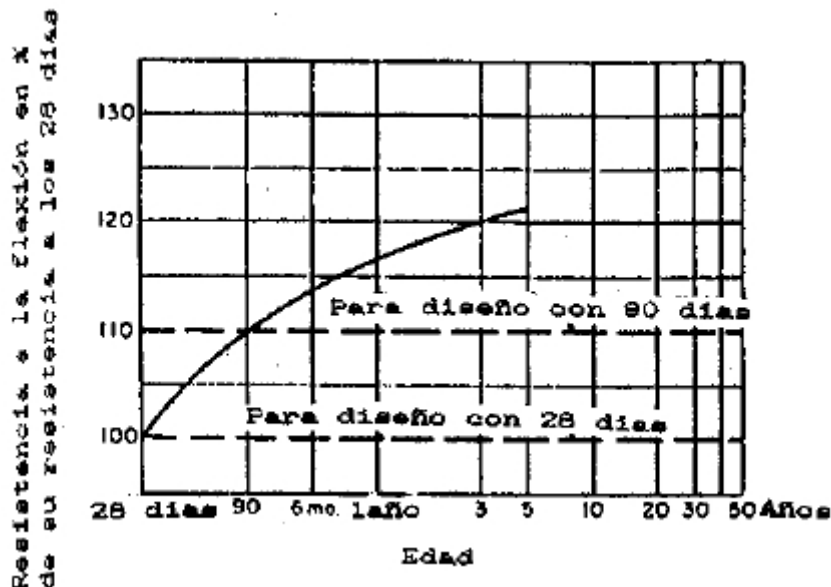


Fig. 4: Resistencia a la flexión del hormigón. PCA-84.

7.1.2 Soporte de la Subrasante y Subbase

El soporte que proporciona la subrasante y la subbase, donde es usada; es el segundo factor en el diseño de espesores. El soporte de la subrasante y subbase es definido en términos del módulo de reacción de la subrasante (k) de Westergaard. Es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga (una placa de 30-pulg. de diámetro), dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada, por pulgada (psi/pulg), es decir como libras por pulgada cúbica (pci).

**Efecto de la Subbase no Tratada
sobre los valores k**

Valor k de la Subrasante pci	Valor k de la Subbase, pci			
	4 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	12 pulg.
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Tabla. 1: Valor de k con base sin tratar.

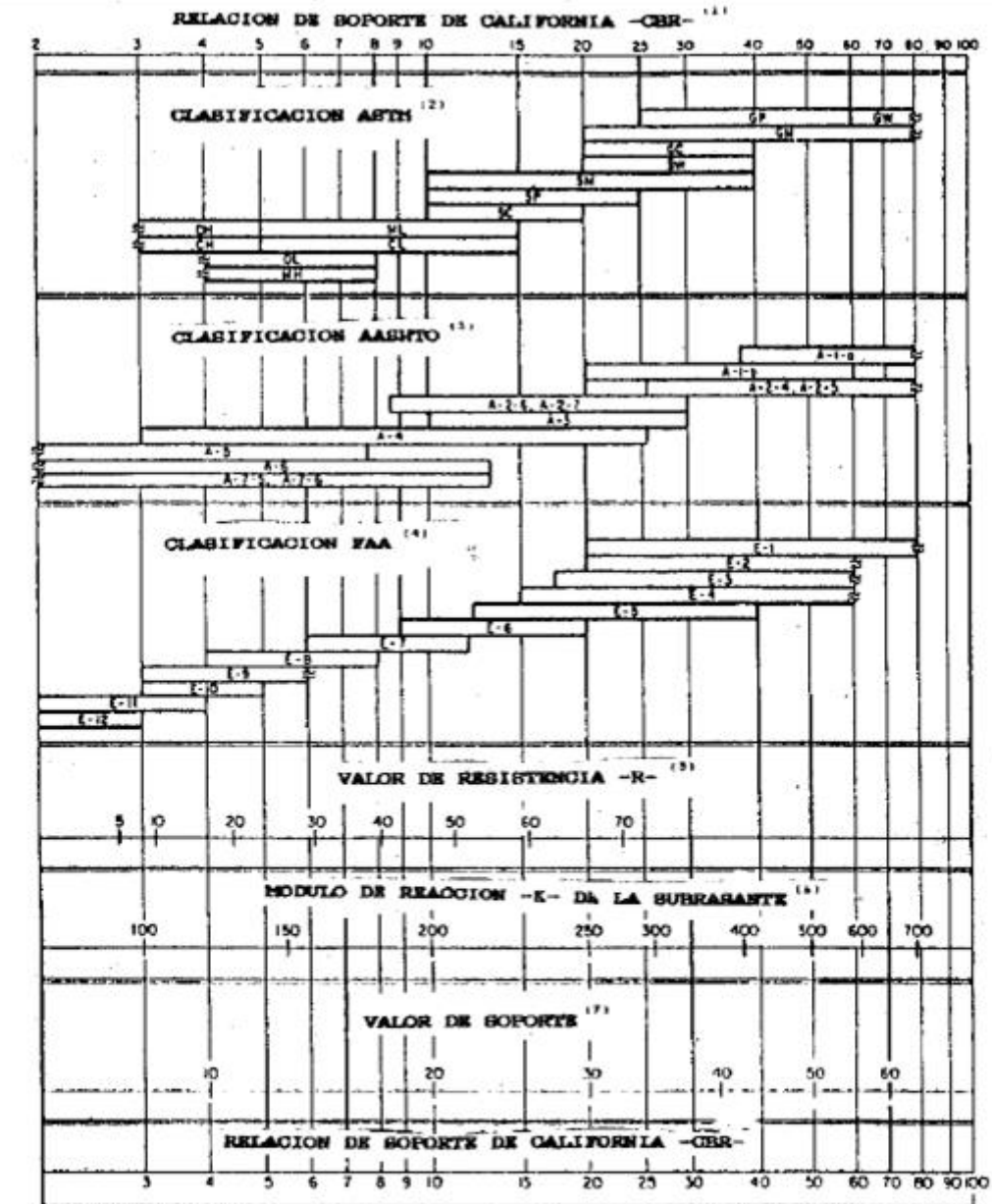
**Tabla 2. Valores k de Diseño para Subbases
Tratadas con Cemento**

Valor k de la Subrasante pci	Valor k de la Subbase, pci			
	4 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	10 pulg.
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	-

Tabla 2: Valor de k con base tratada.

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la Razón de Soporte de California (California Bering Ratio-CBR) o las pruebas de valores-R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor k ; las variaciones normales para un valor

estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento. Las relaciones de la Fig. 5 son satisfactorias para propósitos de diseño.



- (1) Ver "Fundaciones para Pavimentos Flexibles", O. Porter, Procedimientos del Consejo de Investigación de Carreteras (HRB), 22ava Reunión Anual, 1942, Vol. 22, páginas 100-136.
- (2) Norma ASTM, D2487.
- (3) "Clasificación de Materiales de Subrasante para Carreteras", Procedimientos del Consejo de Investigación de Carreteras (HRB), 25ava Reunión Anual, 1945, Vol. 25, páginas 378-392.
- (4) Pavimentación de Aeropuertos, Departamento de Comercio USA, Agencia Federal de Aviación, Mayo 1948, páginas 11-18.
- (5) "Correlación entre los valores R y k", G. Warras, reporte no publicado, PCA, Montañas Rocosas de la Región Nor Oeste, Octb. 1971, (mejor correlación, con corrección por saturación).
- (6) Ver "Ensayo de Suelos para Diseño de Pistas de Aterrizaje", T. Middlebrooks y G. Bertram, Procedimientos del Consejo de Investigación de Carreteras (HRB), 22ava Reunión Anual, 1942, Vol. 22, página 162.
- (7) Ver el ítem (6), página 164.

Fig. 5: Correlaciones de ensayos con el valor de k. PCA-84.

No es económico usar subbases no tratadas con el sólo propósito de incrementar los valores de k . Donde sea usada una subbase, se producirá un incremento del valor k que puede ser usado en el diseño del espesor. Si la subbase es un material granular no tratado, el incremento aproximado del valor k puede ser tomado de la Tabla 1.

Los valores mostrados en la Tabla 1 están basados en los análisis de Burmister para sistemas de dos capas mediante pruebas de carga sobre placas en losas a escala natural, realizados para determinar los valores k en subrasantes y subbases.

Las subbases tratadas con cemento son ampliamente usadas en pavimentos de hormigón sujetos a tráfico pesado. Ellas son construidas de materiales granulares A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3 de la Clasificación de Suelos AASHTO. El contenido de cemento de la subbase tratada con cemento está basado en las pruebas estándar de laboratorio ASTM de hielo-deshielo y humedecimiento-secado y en los criterios de pérdida de peso de la PCA.

Otros procedimientos que den una calidad equivalente de material pueden ser usados. Los valores k de diseño para subbases tratadas con cemento y que reúnen los criterios antes señalados están dados en la Tabla 2.

7.1.3 Periodo de Diseño

El término periodo de diseño es usado en este texto en vez de vida del pavimento, porque éste último no está sujeto a una definición precisa. Algunos ingenieros y agencias de carreteras consideran que la vida de un pavimento de hormigón finaliza cuando se coloca la primera sobrecapa. La vida de los pavimentos de hormigón pueden variar desde menos de 20 años en algunos proyectos con tránsito mayor de lo originalmente estimado o que han tenido defectos de diseño, materiales o construcción defectuosa; a más de 40 años en otros proyectos donde no existan defectos.

El término periodo de diseño es considerado algunas veces como sinónimo del término periodo de análisis de tránsito. Debido a que el tránsito puede no ser predicho con mucha precisión para un periodo largo, comúnmente se utiliza un periodo de diseño de 20 años en procedimientos de diseño de pavimentos.

Sin embargo, existen a menudo casos donde el uso de períodos de diseño más cortos o más largos, pueden ser económicamente justificados, tal como en una carretera de transporte especial que será usada sólo por pocos años, o una construcción muy cara donde se desea un alto nivel de servicio por un periodo largo, con escaso o sin mantenimiento. Algunos ingenieros creen que el periodo de diseño para carreteras rurales y urbanas puede estar en un rango de 30 a 35 años.

El periodo de diseño seleccionado afecta al espesor de diseño, ya que determina cuántos años, y por lo tanto a cuántos camiones, debe servir el pavimento. La selección de un periodo de diseño para un proyecto específico está basado en criterios ingenieriles y en el análisis económico de los costos del pavimento y los servicios obtenidos en todo el periodo.

7.1.4 Tránsito

La cantidad y los pesos de las cargas axiales pesadas esperadas durante la vida de diseño son los factores principales en el diseño de espesores de pavimentos de hormigón. Estos se derivan de las estimaciones de:

- Tráfico promedio diario en ambas direcciones, de todos los vehículos (average daily traffic-ADT)
- Tráfico promedio diario de camiones en ambas direcciones (average daily truck traffic-ADTT)
- Cargas axiales de camiones

Información sobre el ADT es obtenida de conteos especiales del tráfico o de mapas del volumen de tráfico del estado, del condado, o de ciudades. Este ADT es denominado como el ADT presente o corriente. Y, el ADT de diseño es estimado por los métodos comúnmente usados discutidos aquí. Sin embargo, cualquier otro método que dé una estimación razonable del tráfico esperado durante la vida de diseño puede ser utilizado.

En el procedimiento de diseño, las cargas por eje determinadas en la sección previa, son multiplicadas por un factor de seguridad de carga (Load Safety Factor- LSF). Recomendándose los siguientes factores:

- Para proyectos Interestatales y otros de múltiples carriles donde el flujo de tráfico será ininterrumpido y donde habrán altos volúmenes de tráfico de camiones, LSF = 1.2.
- Para carreteras y calles arteriales donde el volumen de tráfico de camiones será moderado, LSF = 1.1.
- Para carreteras, calles residenciales, y otras que soportarán pequeños volúmenes de tráfico de camiones, LSF 1.0.

Además de los factores de seguridad de carga, se introduce un cierto grado de contingencia en el procedimiento de diseño, para compensar las sobrecargas no previstas de camiones sobrecargados y las variaciones normales en las propiedades de los materiales y espesores de capas en las construcciones. Por encima del nivel básico de seguridad (LSF = 1.0), los factores de seguridad de carga de 1.1 á 1.2, proporcionan una gran tolerancia a la posibilidad de cargas de camiones pesados y volúmenes no previstos, y un alto nivel de serviciabilidad, apropiado en caminos con pavimentos de tipos mayores.

En casos especiales, puede ser justificado el uso de un LSF tan alto como 1.3 durante todo el período de diseño para mantener un nivel de serviciabilidad del pavimento mayor que el normal.

Un ejemplo es una vía libre urbana muy activa sin rutas alternativas para el desvío del tráfico. Aquí, puede ser mejor sobredimensionar el pavimento, para evitar por un período largo la necesidad de un mantenimiento significativo del pavimento que podría interrumpir el flujo del tráfico.

7.2 Procedimiento de diseño

Los métodos de este capítulo se usan cuando los datos detallados de distribución de cargas por eje, han sido determinados o estimados como se describe anteriormente.

La Fig. 6 es una hoja de cálculo que muestra el formato para resolver los problemas de diseño. Se requiere como datos de entrada los siguientes factores discutidos anteriormente.

- Tipo de junta y berma
- Resistencia a la flexión del hormigón a los 28 días
- Valor k de la subrasante o de la combinación subrasante – subbase
- Factor de seguridad de carga (LSF)

Calculation of Pavement Thickness

Project Design 1A, four-lane Interstate, rural
 Trial thickness 9.5 in. Doweled joints: yes ☒ no ☐
 Subbase-subgrade k 130 pci Concrete shoulder: yes ☐ no ☒
 Modulus of rupture, MR 650 psi Design period 20 years
 Load safety factor, LSF 1.2
4 in. untreated subbase

Axle load, kips	Multiplied by LSF	Expected repetitions	Fatigue analysis		Erosion analysis	
			Allowable repetitions	Fatigue, percent	Allowable repetitions	Damage, percent
1	2	3	4	5	6	7

8. Equivalent stress 206 10. Erosion factor 2.59

9. Stress ratio factor 0.217

Single Axles

30	36.0	6,310	27,000	23.3	1,500,000	0.4
28	33.6	14,690	77,000	19.1	2,200,000	0.7
26	31.2	30,140	230,000	13.1	3,500,000	0.9
24	28.8	64,410	1,200,000	5.4	5,900,000	1.1
22	26.4	106,900	Unlimited	0	11,000,000	1.0
20	24.0	235,800	"	0	23,000,000	1.0
18	21.6	307,200	"	0	64,000,000	0.5
16	19.2	422,500			Unlimited	0
14	16.8	586,900			"	0
12	14.4	1,837,000			"	0

11. Equivalent stress 192 13. Erosion factor 2.79

12. Stress ratio factor 0.295

Tandem Axles

52	62.4	21,320	1,100,000	1.9	920,000	2.3
48	57.6	42,870	Unlimited	0	1,500,000	2.9
44	52.8	124,900	"	0	2,500,000	5.0
40	48.0	372,900	"	0	4,600,000	8.1
36	43.2	885,800			9,500,000	9.3
32	38.4	930,700			24,000,000	3.9
28	33.6	1,656,000			92,000,000	1.8
24	28.8	984,900			Unlimited	0
20	24.0	1,227,000			"	0
16	19.2	1,356,000				
			Total	62.9	Total	39.9

Fig. 6: Hoja de cálculo para metodología PCA. PCA-84

- Distribución de carga por eje (Columna 1)
- Número esperado de repeticiones de carga por eje durante el periodo de diseño (Columna 3)

En la hoja de cálculo se muestran los análisis por fatiga (para controlar el agrietamiento por fatiga) y por erosión (para controlar la erosión de la fundación y bermas, el bombeo y las fallas).

El análisis por fatiga controla usualmente el diseño de los pavimentos de tránsito ligero (calles residenciales y carreteras secundarias independientemente de si las juntas llevan pasajuntas o no) y de los pavimentos de tránsito mediano con juntas con pasajuntas.

El análisis por erosión controla usualmente el diseño de, pavimentos de tráfico mediano -y pesado- con juntas sin pasajuntas (con trabazón de agregados) y pavimentos de tráfico pesado con juntas con pasajuntas.

Para pavimentos que soportan una combinación normal de pesos por eje, las cargas por eje simple son usualmente más severas en el análisis por fatiga, mientras que las cargas por eje tandem son más severas en el análisis por erosión.

El procedimiento de diseño paso a paso es como sigue: Se establecen los datos de entrada de diseño mostrados en la parte superior de la Fig. 6 y las columnas 1 y 3. Las cargas axiales son multiplicadas por el factor de seguridad de carga, para obtener la columna 2.

7.2.1 Análisis por fatiga

Los resultados del análisis por fatiga, así como las cartas y figuras, son los mismos para pavimentos con juntas con pasajuntas y sin pasajuntas, y también para pavimentos continuamente reforzados.

Para pavimentos:

- Sin berma de hormigón, usar la Tabla 3 y la Fig. 7
- Con berma de hormigón, usar la Tabla 4 y la Fig. 7

Pasos del procedimiento:

- Ingresar en los items 8 y 11 de la hoja de cálculo (Fig. 6) los factores del esfuerzo equivalente, obtenidos de la tabla apropiada que dependen de los espesores de prueba y del valor de k.
- Dividir estos por el módulo de rotura del hormigón e ingresar como items 9 y 12.
- Llenar en la Columna 4, las “Repeticiones Permisibles,” determinado de la Fig.7.
- Calcular la Columna 5 mediante la división de la Columna 3 por la Columna 4, multiplicando por 100; totalizar luego al final.

Esfuerzo Equivalente - sin Berma de Concreto
(Eje Simple/Eje Tandem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

Tabla 3: Esfuerzo equivalentes sin berma. PCA-84.

Esfuerzo Equivalente - con Berma de Concreto
(Eje Simple/Eje Tandem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	640/534	559/468	517/439	489/422	452/403	409/388	383/384
4.5	547/461	479/400	444/372	421/356	390/338	355/322	333/316
5	475/404	417/349	387/323	367/308	341/290	311/274	294/267
5.5	418/360	368/309	342/285	324/271	302/254	276/238	261/231
6	372/325	327/277	304/255	289/241	270/225	247/210	234/203
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236/198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116
9.5	200/190	176/160	164/146	157/137	147/126	136/114	129/108
10	186/179	164/151	153/137	146/129	137/118	127/107	121/101
10.5	174/170	154/143	144/130	137/121	128/111	119/101	113/95
11	164/161	144/135	135/123	129/115	120/105	112/95	106/90
11.5	154/153	136/128	127/117	121/109	113/100	105/90	100/85
12	145/146	128/122	120/111	114/104	107/95	99/86	95/81
12.5	137/139	121/117	113/106	108/99	101/91	94/82	90/77
13	130/133	115/112	107/101	102/95	96/86	89/78	85/73
13.5	124/127	109/107	102/97	97/91	91/83	85/74	81/70
14	118/122	104/103	97/83	93/87	87/79	81/71	77/67

Tabla 4: Esfuerzo equivalentes con berma. PCA-84.

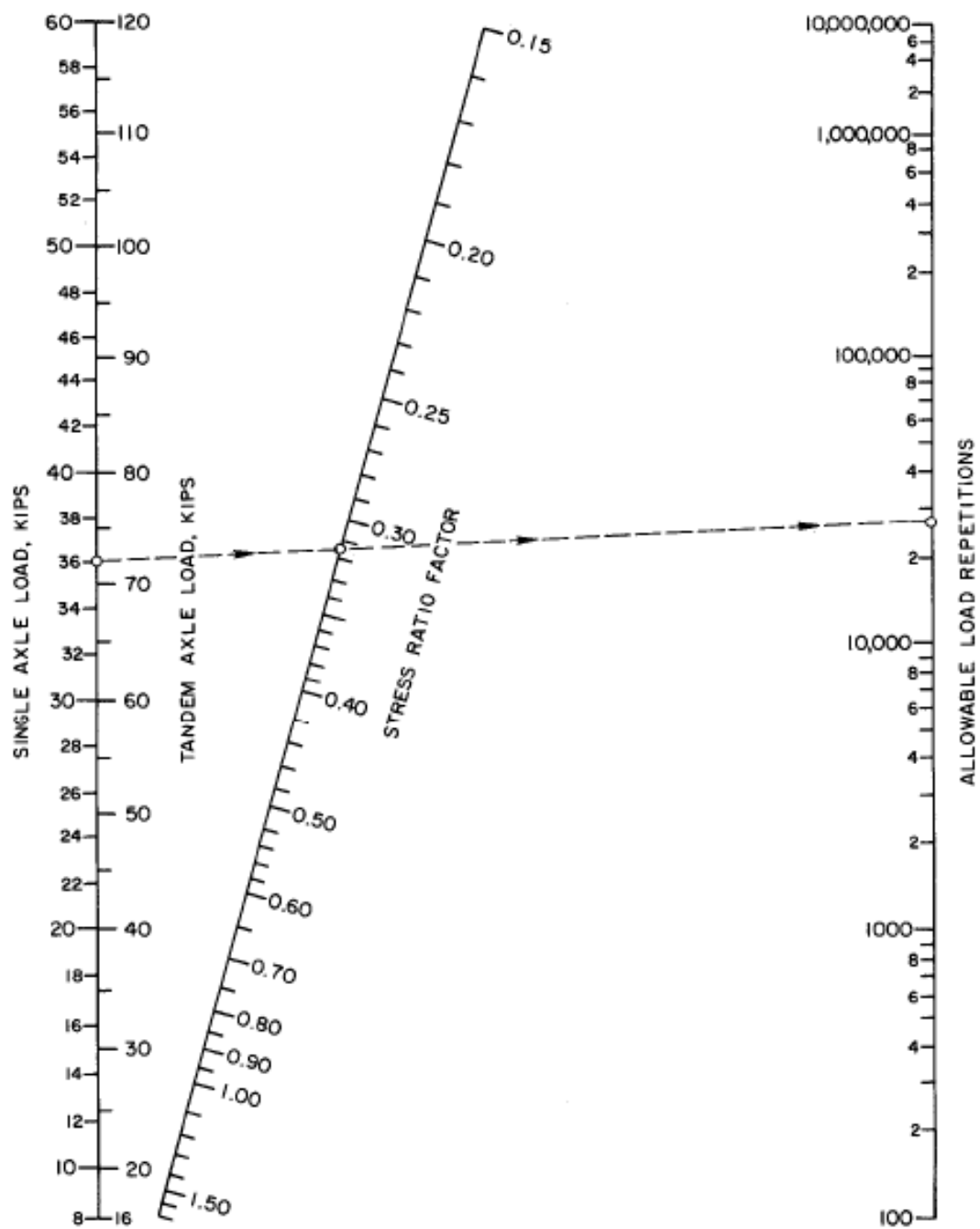


Fig. 7: Nomograma para análisis de fatiga. PCA-84.

7.2.2 Análisis por Erosión

Sin berma de hormigón

- Juntas con pasajuntas o pavimentos continuamente reforzados - Usar la Tabla 5 y la Fig. 8.
- Juntas con trabazón de agregados - Usar la Tabla 6 y la Fig. 8.

Con berma de hormigón

- Juntas con pasajuntas o pavimentos continuamente reforzados - Usar la Tabla 7 y la Fig. 9.
- Juntas con trabazón de agregados - Usar la Tabla 8 y la Fig. 9.

Pasos del procedimiento:

- Ingresar los factores de erosión obtenidos de la tabla apropiada, como items 10 y 13 de la hoja de cálculo (Fig. 6).
- Llenar en la Columna 6, las “Repeticiones Permisibles,” determinadas de la Fig. 8 ó Fig. 9. 3. Calcular la Columna 7 mediante la división de la Columna 3 por la Columna 6, multiplicando por 100, luego totalizar el daño por erosión al final.

En el uso de las cartas, no se requiere la interpolación precisa de las repeticiones permisibles. Si la intersección de las líneas ocurre fuera de la parte superior de la carta, las repeticiones permisibles de carga pueden ser consideradas ilimitadas.

El espesor de prueba resultará en un diseño inadecuado si la fatiga total o el daño por erosión son mayores que el 100%. Se selecciona un mayor espesor de prueba para otra iteración. Se selecciona un menor espesor de prueba si el total es mucho más bajo que el 100%.

Factor de Erosión - Juntas con Dowels,
sin Berma de Concreto
(Eje Simple/Eje Tandem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

Tabla 5: Factor de erosión, con dovela y sin berma. PCA-84.

Factor de Erosión - Juntas con Trabazón
de Agregado, sin Berma de Concreto
(Eje Simple/Eje Tandem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.94/4.03	3.91/3.95	3.88/3.89	3.86/3.86	3.82/3.83	3.77/3.80
4.5	3.79/3.91	3.76/3.82	3.73/3.75	3.71/3.72	3.68/3.68	3.64/3.65
5	3.66/3.81	3.63/3.72	3.60/3.64	3.58/3.60	3.55/3.55	3.52/3.52
5.5	3.54/3.72	3.51/3.62	3.48/3.53	3.46/3.49	3.43/3.44	3.41/3.40
6	3.44/3.64	3.40/3.53	3.37/3.44	3.35/3.40	3.32/3.34	3.30/3.30
6.5	3.34/3.56	3.30/3.46	3.26/3.36	3.25/3.31	3.22/3.25	3.20/3.21
7	3.26/3.49	3.21/3.39	3.17/3.29	3.15/3.24	3.13/3.17	3.11/3.13
7.5	3.18/3.43	3.13/3.32	3.09/3.22	3.07/3.17	3.04/3.10	3.02/3.06
8	3.11/3.37	3.05/3.26	3.01/3.16	2.99/3.10	2.96/3.03	2.94/2.99
8.5	3.04/3.32	2.98/3.21	2.93/3.10	2.91/3.04	2.88/2.97	2.87/2.93
9	2.98/3.27	2.91/3.16	2.86/3.05	2.84/2.99	2.81/2.92	2.79/2.87
9.5	2.92/3.22	2.85/3.11	2.80/3.00	2.77/2.94	2.75/2.86	2.73/2.81
10	2.86/3.18	2.79/3.06	2.74/2.95	2.71/2.89	2.68/2.81	2.66/2.76
10.5	2.81/3.14	2.74/3.02	2.68/2.91	2.65/2.84	2.62/2.76	2.60/2.72
11	2.77/3.10	2.69/2.98	2.63/2.86	2.60/2.80	2.57/2.72	2.54/2.67
11.5	2.72/3.06	2.64/2.94	2.58/2.82	2.55/2.76	2.51/2.68	2.49/2.63
12	2.68/3.03	2.60/2.90	2.53/2.78	2.50/2.72	2.46/2.64	2.44/2.59
12.5	2.64/2.99	2.55/2.87	2.48/2.75	2.45/2.68	2.41/2.60	2.39/2.55
13	2.60/2.96	2.51/2.83	2.44/2.71	2.40/2.65	2.36/2.56	2.34/2.51
13.5	2.56/2.93	2.47/2.80	2.40/2.68	2.36/2.61	2.32/2.53	2.30/2.48
14	2.53/2.90	2.44/2.77	2.36/2.65	2.32/2.58	2.28/2.50	2.25/2.44

Tabla 6: Factor de erosión, sin dovela y sin berma. PCA-84.

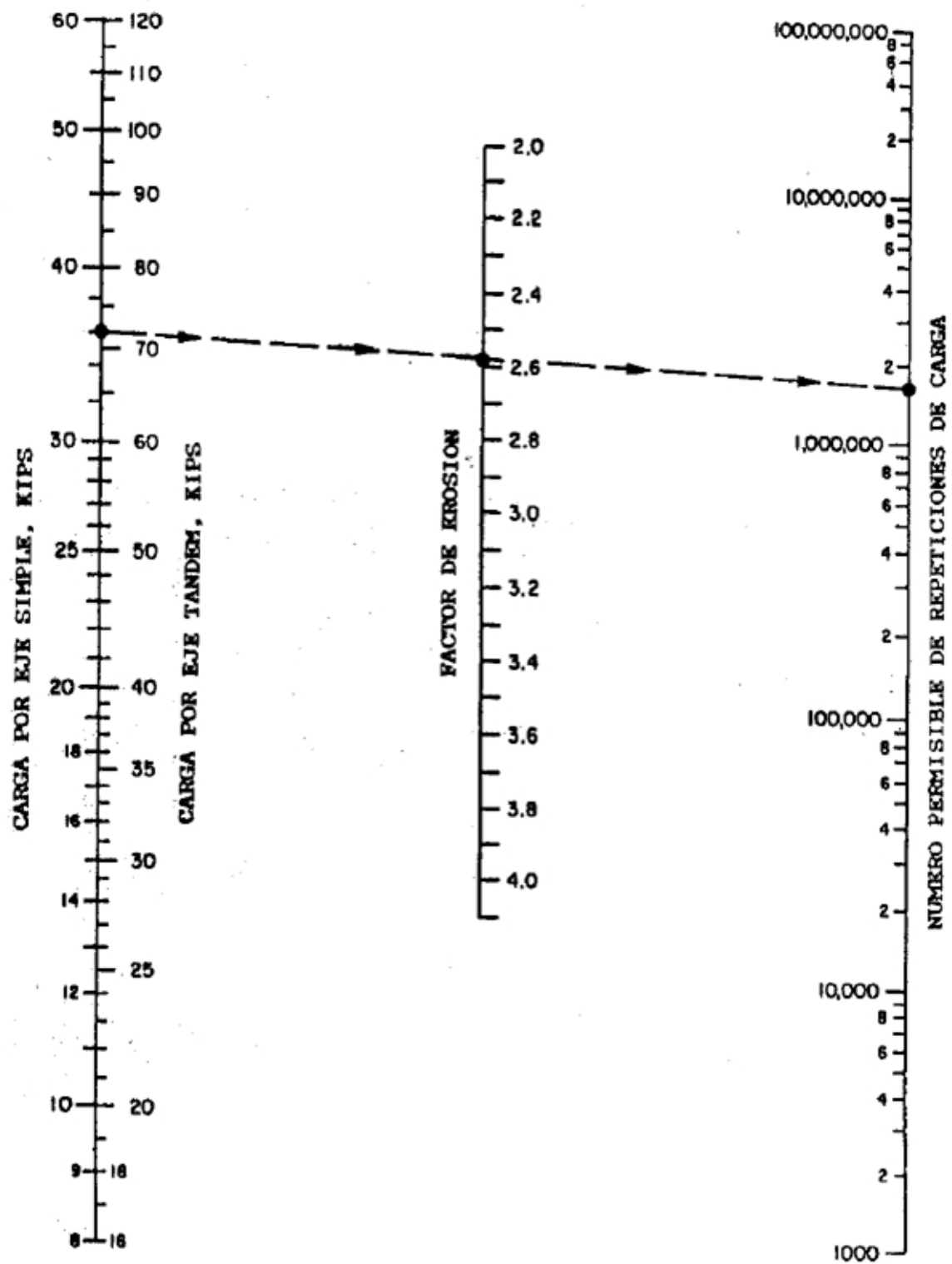


Fig. 8: Nomograma para análisis de erosión, sin berma. PCA-84.

Factor de Erosión - Juntas con Dowels,
con Berma de Concreto
(Eje Simple/Eje Tandem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.28/3.30	3.24/3.20	3.21/3.13	3.19/3.10	3.15/3.09	3.12/3.08
4.5	3.13/3.19	3.09/3.08	3.06/3.00	3.04/2.96	3.01/2.93	2.98/2.91
5	3.01/3.09	2.97/2.98	2.93/2.89	2.90/2.84	2.87/2.79	2.85/2.77
5.5	2.90/3.01	2.85/2.89	2.81/2.79	2.79/2.74	2.76/2.68	2.73/2.65
6	2.79/2.93	2.75/2.82	2.70/2.71	2.68/2.65	2.65/2.58	2.62/2.54
6.5	2.70/2.86	2.65/2.75	2.61/2.63	2.58/2.57	2.55/2.50	2.52/2.45
7	2.61/2.79	2.56/2.68	2.52/2.56	2.49/2.50	2.46/2.42	2.43/2.38
7.5	2.53/2.73	2.48/2.62	2.44/2.50	2.41/2.44	2.38/2.36	2.35/2.31
8	2.46/2.68	2.41/2.56	2.36/2.44	2.33/2.38	2.30/2.30	2.27/2.24
8.5	2.39/2.62	2.34/2.51	2.29/2.39	2.26/2.32	2.22/2.24	2.20/2.18
9	2.32/2.57	2.27/2.46	2.22/2.34	2.19/2.27	2.16/2.19	2.13/2.13
9.5	2.26/2.52	2.21/2.41	2.16/2.29	2.13/2.22	2.09/2.14	2.07/2.08
10	2.20/2.47	2.15/2.36	2.10/2.25	2.07/2.18	2.03/2.09	2.01/2.03
10.5	2.15/2.43	2.09/2.32	2.04/2.20	2.01/2.14	1.97/2.05	1.95/1.99
11	2.10/2.39	2.04/2.28	1.99/2.16	1.95/2.09	1.92/2.01	1.89/1.95
11.5	2.05/2.35	1.99/2.24	1.93/2.12	1.90/2.05	1.87/1.97	1.84/1.91
12	2.00/2.31	1.94/2.20	1.88/2.09	1.85/2.02	1.82/1.93	1.79/1.87
12.5	1.95/2.27	1.89/2.16	1.84/2.05	1.81/1.98	1.77/1.89	1.74/1.84
13	1.91/2.23	1.85/2.13	1.79/2.01	1.76/1.95	1.72/1.86	1.70/1.80
13.5	1.86/2.20	1.81/2.09	1.75/1.98	1.72/1.91	1.68/1.83	1.65/1.77
14	1.82/2.17	1.76/2.06	1.71/1.95	1.67/1.88	1.64/1.80	1.61/1.74

Tabla 7: Factor de erosión, con dovela y con berma. PCA-84.

Factor de Erosión - Juntas con Trabazón
de Agregado, con Berma de Concreto
(Eje Simple/Eje Tandem)

Espesor de losa (pulg.)	k de la subrasante - subbase, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.46/3.49	3.42/3.39	3.38/3.32	3.36/3.29	3.32/3.26	3.28/3.24
4.5	3.32/3.39	3.28/3.28	3.24/3.19	3.22/3.16	3.19/3.12	3.15/3.09
5	3.20/3.30	3.16/3.18	3.12/3.09	3.10/3.05	3.07/3.00	3.04/2.97
5.5	3.10/3.22	3.05/3.10	3.01/3.00	2.99/2.95	2.96/2.90	2.93/2.86
6	3.00/3.15	2.95/3.02	2.90/2.92	2.88/2.87	2.86/2.81	2.83/2.77
6.5	2.91/3.08	2.86/2.96	2.81/2.85	2.79/2.79	2.76/2.73	2.74/2.68
7	2.83/3.02	2.77/2.90	2.73/2.78	2.70/2.72	2.68/2.66	2.65/2.61
7.5	2.76/2.97	2.70/2.84	2.65/2.72	2.62/2.66	2.60/2.59	2.57/2.54
8	2.69/2.92	2.63/2.79	2.57/2.67	2.55/2.61	2.52/2.53	2.50/2.48
8.5	2.63/2.88	2.56/2.74	2.51/2.62	2.48/2.55	2.45/2.48	2.43/2.43
9	2.57/2.83	2.50/2.70	2.44/2.57	2.42/2.51	2.39/2.43	2.36/2.38
9.5	2.51/2.79	2.44/2.65	2.38/2.53	2.36/2.46	2.33/2.38	2.30/2.33
10	2.46/2.75	2.39/2.61	2.33/2.49	2.30/2.42	2.27/2.34	2.24/2.28
10.5	2.41/2.72	2.33/2.58	2.27/2.45	2.24/2.38	2.21/2.30	2.19/2.24
11	2.36/2.68	2.28/2.54	2.22/2.41	2.19/2.34	2.16/2.26	2.14/2.20
11.5	2.32/2.65	2.24/2.51	2.17/2.38	2.14/2.31	2.11/2.22	2.09/2.16
12	2.28/2.62	2.19/2.48	2.13/2.34	2.10/2.27	2.06/2.19	2.04/2.13
12.5	2.24/2.59	2.15/2.45	2.09/2.31	2.05/2.24	2.02/2.15	1.99/2.10
13	2.20/2.56	2.11/2.42	2.04/2.28	2.01/2.21	1.98/2.12	1.95/2.06
13.5	2.16/2.53	2.08/2.39	2.00/2.25	1.97/2.18	1.93/2.09	1.91/2.03
14	2.13/2.51	2.04/2.36	1.97/2.23	1.93/2.15	1.89/2.06	1.87/2.00

Tabla 8: Factor de erosión, sin dovela y con berma. PCA-84.

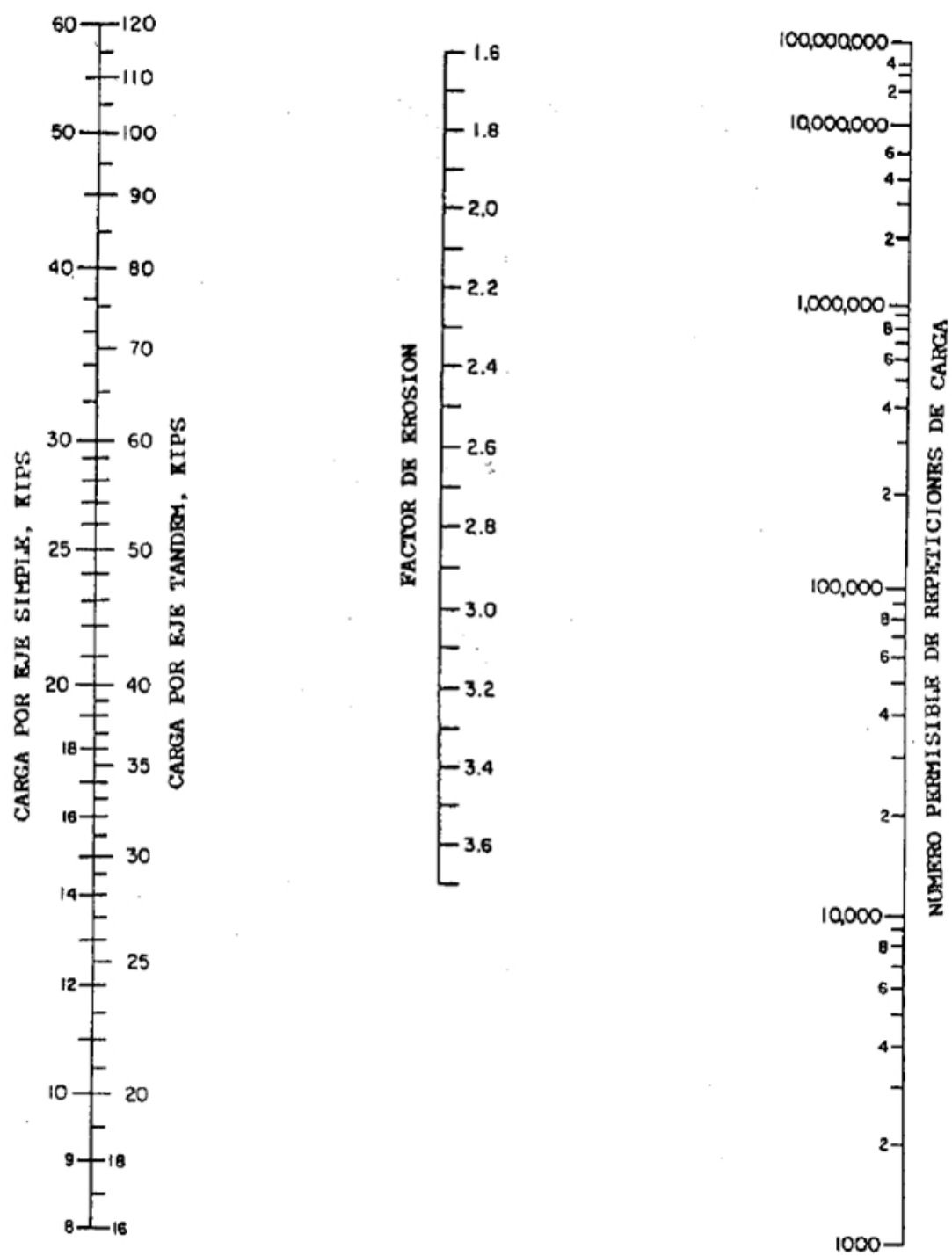


Fig. 9: Nomograma para análisis de erosión, con berma. PCA-84.

7.3 Recomendaciones barras de acero juntas

En las losas que conforman un pavimento se dan esfuerzos como consecuencia del paso de los vehículos y de los movimientos de contracción y dilatación del concreto y a las diferencias en la temperatura, o en la humedad, entre la cara superficial y la de soporte de la losa, estos esfuerzos se controlan con el diseño de las juntas.

7.3.1 Barras de anclaje para juntas longitudinales

Las juntas longitudinales pueden ser de alabeo o de construcción. El objetivo básico de estas juntas es el de controlar las fisuras que se pueden presentar en los pavimentos cuando se construyen con anchos superiores a los 4,5 metros. En nuestro medio, en el cual existe la tradición de construir los pavimentos por carriles, con un ancho cercano a los 3,6 m, las juntas longitudinales son normalmente de construcción. Cuando el pavimento que se construye no tiene confinamiento lateral, es necesario dotar las juntas longitudinales con barras de anclaje, para impedir el desplazamiento de las losas de un carril, respecto a las del otro. Los aceros, como se dijo deben cumplir con el Artículo INV 500-07 y lo que sea aplicable del Artículo 640-07, se admiten aceros con resistencia de 187,5 MPa (40000 psi) y 280 MPa (60000 psi). La selección del diámetro, separación, longitud y resistencia de las barras de anclaje, se puede hacer según los criterios indicados en la Tabla 6-1.

Espesor de losa (mm)	Barras de ϕ 9,5 mm (3/8")				Barras de ϕ 12,7 mm (1/2")				Barras de ϕ 15,9 mm (5/8")			
	Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)		
		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)
Acero de $f_y= 187,5$ MPa (40,000 psi)												
150	0,45	0,80	0,75	0,65	0,60	1,20	1,20	1,20	0,70	1,20	1,20	1,20
175		0,70	0,60	0,55		1,20	1,10	1,00		1,20	1,20	1,20
200		0,60	0,55	0,50		1,05	1,00	0,90		1,20	1,20	1,20
225		0,55	0,50	0,45		0,85	0,85	0,80		1,20	1,20	1,20
250		0,45	0,45	0,40		0,85	0,80	0,70		1,20	1,20	1,10
Acero de $f_y= 280$ MPa (60,000 psi)												
150	0,65	1,20	1,10	1,00	0,85	1,20	1,20	1,20	1,00	1,20	1,20	1,20
175		1,05	0,95	0,85		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
200		0,90	0,80	0,75		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
225		0,80	0,75	0,65		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
250		0,70	0,65	0,60		1,20	1,15	1,10		1,20	1,20	1,20

Tabla 9. Recomendación para las barras de anclaje. Manual de diseño de pavimentos de concreto, ministerio de transporte.

7.3.2 Pasadores para juntas transversales

Las juntas transversales agrupan a las de contracción, alabeo, expansión y construcción, pues, cuando el pavimento se da al servicio, es muy difícil determinar la función de cada una de ellas. El diseño de las juntas se realiza, con el fin de controlar las fisuras del concreto por contracción y alabeo; por lo tanto, el espaciamiento entre ellas, debe ser menor que seis metros. Se ha demostrado que cuando la separación se aproxima a 4,5 m, permiten controlar prácticamente todas las fisuras y el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida de servicio es mejor. Sin embargo, si alguna de estas condiciones no se cumple, es posible mejorar la transferencia de cargas colocando pasadores de carga, llamados pasa juntas (dovelas), construyendo una base propicia o combinando ambas alternativas.

Cuando la trabazón de agregados no es suficiente para lograr la transmisión de carga, se pueden utilizar, para alcanzar dicho objetivo, barras de transferencia de carga, conocidas como pasadores de carga, o dovelas, que son, barras de acero cortas y lisas con un límite de fluencia (f_y) mínimo de 280 MPa (2800 kg/cm² o 60000 psi), de acuerdo con el Artículo INV 500-07 y el Artículo INV

640-07, metidas dentro del concreto fresco. Los pasadores se instalan en las juntas de tal manera que le permitan a las losas separarse y unirse entre sí, pero no desplazarse verticalmente, y su función es, entonces, absorber los esfuerzos de cortante, generados por las cargas del tránsito al cruzar las juntas y transmitir a la losa adyacente entre el 40 y 45% de la carga de diseño, cuando esta se coloca cerca de la junta.

Las dovelas, para poder cumplir con su objetivo, deben ser fáciles de instalar, lisas y al menos dos terceras partes de su longitud deben estar recubiertas con un material antiadherente, con el propósito de no restringir los desplazamientos horizontales de las losas. Además, deben ser resistentes a la fatiga y a la corrosión. En cuanto a las dimensiones, espaciamiento y longitud de los pasadores, la práctica se ha reducido a la aplicación de los criterios indicados en la Tabla 10. Los pasadores se deben colocar en la mitad del espesor de las losas, paralelos entre sí, al eje longitudinal de la vía y a la superficie del pavimento, con una tolerancia medida en el extremo del pasador que no sobrepase los 10 mm respecto a la posición teórica. La manera más eficiente de lograr esto, es la de colocar los pasadores sobre unos soportes hechos con varillas, que quedan embebidos en el concreto. El concreto alrededor de los pasadores debe tener la misma compactación que en el resto del pavimento, para evitar la creación de zonas en las cuales la resistencia a la tracción sea más baja y por ende se convierta en un área que se puede fisurar.

Espesor del pavimento	Diámetro del pasador		Longitud	Separación entre centros
	mm	Pulgada		
0 - 100	13	1/2	250	300
110 - 130	16	5/8	300	300
140 - 150	19	3/4	350	300
160 - 180	22	7/8	350	300
190 - 200	25	1	350	300
210 - 230	29	1 1/8	400	300
240 - 250	32	1 1/4	450	300
260 - 280	35	1 3/8	450	300
290 - 300	38	1 1/2	500	300

Tabla 10. Recomendaciones para la selección de los pasadores de carga. Manual de diseño de pavimentos de concreto, ministerio de transporte.

8. DESARROLLO DEL PROGRAMA

8.1 Fundamento teórico del código:

El código se desarrolló bajo el lenguaje del software Matlab, utilizando la GUI (graphical user interfaces), para el diseño de la interfaz. Para el desarrollo de la metodología PCA, se utilizaron las ecuaciones publicadas en el artículo “PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design” en el cual para el análisis de fatiga se siguió en siguiente procedimiento:

1. Se halla el radio de rigidez relativa de la subrasante:

$$\ell = (E * h^3 / (12 * (1 - \mu^2) * k))^{0.25}$$

h= espesor de la losa de concreto.

K= módulo de reacción de la subrasante.

μ = relación de Poisson, tomada como 0.15.

2. Encontramos el esfuerzo equivalente, teniendo en cuenta que SA son cargas de ejes simples, TA cargas de ejes tándem, WS con berma y NS sin berma. El CV, coeficiente de variación siempre es igual al 15% en la metodología PCA

$$\sigma_{eq} = \frac{6 * M_e}{h^2} * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (1)$$

$$M_e = \begin{cases} = -1600 + 2525 * \log(\ell) + 24.42 * \ell + 0.204 * \ell^2 & \text{SA/NS} \\ = 3029 - 2966.8 * \log(\ell) + 133.69 * \ell - 0.0632 * \ell^2 & \text{TA/NS} \\ = (-970.4 + 1202.6 * \log(\ell) + 53.587 * \ell) * \\ \quad (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) & \text{SA/WS} \\ = (2005.4 - 1980.9 * \log(\ell) + 99.008 * \ell) * \\ \quad (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) & \text{TA/WS} \end{cases}$$

$$f_1 = \begin{cases} (24/SAL)^{0.06} * (SAL/18) & \text{SA} \\ (48/TAL)^{0.06} * (TAL/36) & \text{TA} \end{cases}$$

$$f_2 = \begin{cases} 0.892 + h/85.71 - h^2/3000 & \text{NS} \\ 1 & \text{WS} \end{cases}$$

$$f_3 = 0.894 \text{ for 6\% truck at the slab edge}$$

$$f_4 = 1/[1.235 * (1 - CV)]$$

F1,f2,f3,f4 son factores de corrección.

3. Calculamos el radio de esfuerzo equivalente, siendo S_c el módulo de rotura del concreto:

$$\sigma_{eq}/S_c$$

4. Determinamos la cantidad de repeticiones admisibles, teniendo en cuenta las siguientes condiciones

$$\begin{cases} \log N_f = 11.737 - 12.077 * (\sigma_{eq} / S_c) & \sigma_{eq} / S_c \geq 0.55 \\ N_f = \left(\frac{4.2577}{\sigma_{eq} / S_c - 0.4325} \right)^{3.268} & 0.45 < \sigma_{eq} / S_c < 0.55 \\ N_f = \text{Unlimited} & \sigma_{eq} / S_c \leq 0.45 \end{cases}$$

5. Encontramos el porcentaje de fatiga, dividiendo las repeticiones esperadas entre las admisibles y multiplicando por 100.

Para el análisis de erosión, tomamos las mismas condiciones iniciales del análisis de fatiga, pero en este caso encontramos los siguientes parámetros:

1. Encontramos la deflexión equivalente de la esquina δ_{eq} , teniendo en cuenta las condiciones presentadas a continuación:

$$\delta_{eq} = \frac{p_c}{k} * f_5 * f_6 * f_7$$

$$p_c = \begin{cases} 1.571 + \frac{46.127}{\ell} + \frac{4372.7}{\ell^2} - \frac{22886}{\ell^3} & \text{SA/NS/ND} \\ 1.847 + \frac{213.68}{\ell} - \frac{1260.8}{\ell^2} + \frac{22989}{\ell^3} & \text{TA/NS/ND} \\ 0.5874 + \frac{65.108}{\ell} + \frac{1130.9}{\ell^2} - \frac{5245.8}{\ell^3} & \text{SA/WS/ND} \\ 1.47 + \frac{102.2}{\ell} - \frac{1072}{\ell^2} + \frac{14451}{\ell^3} & \text{TA/WS/ND} \\ \\ -0.3019 + \frac{128.85}{\ell} + \frac{1105.8}{\ell^2} + \frac{3269.1}{\ell^3} & \text{SA/NS/WD} \\ 1.258 + \frac{97.491}{\ell} + \frac{1484.1}{\ell^2} - \frac{180}{\ell^3} & \text{TA/NS/WD} \\ 0.018 + \frac{72.99}{\ell} + \frac{323.1}{\ell^2} + \frac{1620}{\ell^3} & \text{SA/WS/WD} \\ 0.0345 + \frac{146.25}{\ell} - \frac{2385.6}{\ell^2} + \frac{23848}{\ell^3} & \text{TA/WS/WD} \end{cases}$$

$$f_5 = \begin{cases} SAL/18 & \text{SA} \\ TAL/36 & \text{TA} \end{cases}$$

$$f_6 = \begin{cases} 0.95 & \text{ND/NS} \\ 1.001 - \left(0.26363 - \frac{k}{3034.5} \right)^2 & \text{ND/WS} \\ 1 & \text{WD} \end{cases}$$

$$f_7 = \begin{cases} 0.896 & \text{NS} \\ 1 & \text{WS} \end{cases}$$

2. Calculamos la tasa de trabajo o potencia y el factor C1:

$$P = 268.7 \left(\frac{p_c^2}{h * k^{0.73}} \right) = 268.7 \left(\frac{k^{1.27} * \delta_{eq}^2}{h} \right)$$

$$C_1 = 1 - \left(\frac{k}{2000} * \frac{4}{h} \right)^2$$

3. Calculamos las repeticiones admisibles de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \log N_e = 14.524 - 6.777 * (C_1 * P - 9)^{0.103} & C_1 * P > 9 \\ - \log C_2 & \\ N_e = \text{Unlimited} & C_1 * P \leq 9 \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 0.06 & \text{for NS} \\ 0.94 & \text{for WS} \end{cases}$$

4. Encontramos el porcentaje de erosión dividiendo las repeticiones esperadas sobre las repeticiones admisibles por cada eje y multiplicando por 100.

- Para los ejes tridem, se utilizó las tablas de diseño explicadas en el anterior capítulo (método manual con nomogramas) ya que no se cuenta con las ecuaciones de este tipo.
- En el análisis de sensibilidad se iteraron los factores de diseño, módulo de rotura y módulo de reacción de la subrasante, de igual manera el espesor de la losa, para evaluar la incidencia de la variación de los respectivos parámetros en el análisis de los dos criterios de diseño fatiga y erosión es contemplado por el método.

8.2 Pasó a paso del programa

8.2.1. Introducción

El presente manual fue elaborado para el uso del programa PCAcalcula versión 1.0 para diseño de pavimentos de concreto, para carreteras de diversa índole, utilizando la metodología desarrollada por la Portland Cement Association en 1984. El objetivo del manual es explicar las funciones de cada variable de la interfaz de usuario para su correcta utilización.

8.2.2. Instalar el programa

- Descomprima el archivo *PCAcalcula_v.1.0.zip*
- Ejecute el archivo *MCRInstaller*, para instalar el programa en su computador. En caso de tener problemas de compatibilidad con este archivo visite la siguiente página para descargar el archivo MCRinstaller para el sistema operativo correspondiente a su computador
<http://www.mathworks.com/products/compiler/mcr/>
- Inicie la aplicación ejecutando el archivo *PCAcalcula_v.1.0.exe*

8.2.3. Descripción de la interfaz

La interfaz del programa cuenta con cinco divisiones principales:

The screenshot displays the PCAcalcula software interface, which is divided into five main sections, each highlighted with a yellow border and a number:

- Datos generales:** This section contains input fields for 'Proyecto:', 'Descripción:', 'Periodo de diseño' (in years), 'Espesor de la losa' (in inches), 'Módulo de rotura' (in psi), 'Dovelas' (Yes/No), 'Bermas' (Yes/No), 'Módulo de reacción de la subrasante (K)' (with options for 'Ingreso directo' or 'Correlación con CBR'), 'Subbase' (with 'Espesor' in inches), and 'Tratada con cemento' (Yes/No).
- Transito:** This section includes a 'Factor de seguridad' dropdown (set to 1.0), 'Tipo de Ejes' dropdown (set to 'Ejes Simples'), and a table of 'Ejes Simples' with columns for 'Carga' and 'Repeticiones'.
- Análisis:** This section features a 'Calcular' button, input fields for 'Espesor de losa' (in inches), 'Módulo de rotura' (in psi), 'Módulo de reacción (K)' (in psi), 'Periodo de diseño' (in years), 'Porcentaje de fatiga', 'Porcentaje de erosión', 'Recomendación para barras de anclaje' (with 'Longitud' in inches), 'Recomendación para pasadores (fy=60 ksi)' (with 'Longitud' in inches), 'Separación entre barras' (in inches), and 'Diámetro barras' (in inches). It also includes an 'Análisis de sensibilidad' button and 'Guardar' and 'Abrir' buttons.
- Barras de anclaje:** This section contains input fields for 'Diámetro de barra' (in inches), 'Acero (fy)' (in kg/cm²), and 'Ancho de carril' (in meters).
- Sistema de unidades:** This section at the bottom right includes a 'Sistema de unidades' dropdown (set to 'Ingles') and a 'Salir' button.

Figura 1. Diseño de interfaz

1. Primer módulo: contiene las casillas para ingresar los datos generales del proyecto, espesor de losa, resistencia a flexión del concreto y datos para hallar la resistencia del suelo.
2. Segundo modulo: se encuentra lo relacionado con el tráfico, cargas por eje, repeticiones, factor de seguridad.
3. Tercer módulo: muestra los resultados de la iteración con los datos ingresados en los anteriores módulos.
4. Cuarto módulo: se escogen los datos generales para las barras de anclaje para hacer las recomendaciones de longitud y separación de estas.
5. Quinto módulo: se encuentra la opción del cambio de unidades que maneja el programa “S.I” e “Ingles”.

8.2.4. Datos generales del proyecto

Para encontrar el espesor de un pavimento rígido, se deben conocer las siguientes características del proyecto:

Espesor de losa: se prueba un espesor de losa, con un rango que varía entre [4-14] in o [100-350] mm y se analizan los consumos de fatiga y erosión.

Módulo de rotura del concreto.

Unión con dovelas: Se escoge el tipo de unión de las losas de concreto, si se distribuye la carga por trabazón de agregados o con pasadores.

Bermas: si presenta bermas o no, se selecciona la opción que el pavimento tendrá.

Módulo de reacción: se introduce el valor del módulo de reacción de la subrasante o del CBR. Al usar subbase el programa calcula el aporte, calculando el k del conjunto.

Factor de seguridad de carga: el método de diseño exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por unos factores de seguridad, para lo cual se recomiendan los siguientes:

- Para vías de carriles múltiples en las cuales se espera un flujo de tránsito interrumpido con alto volumen de tránsito pesado $FS=1.2$.
- Para carreteras y vías urbanas arterias en las que se espere un volumen moderado de tránsito de vehículos pesados $FS=1.1$.
- Para calles residenciales y otras vías que vayan a soportar bajos volúmenes de camiones $FS=1.0$.
- En casos especiales para mantener un nivel de serviciabilidad mayor que el normal a través del periodo de diseño, se puede usar un $FS=1.3$.

Tránsito: los principales factores que inciden en el diseño de un pavimento rígido, son el número y la magnitud de las cargas por eje, que se esperan durante el periodo de diseño. Estos valores se obtienen a partir de estimativos de:

- TPD (transito promedio diario en ambas direcciones).
- TPD-C (transito promedio diario de vehículos comerciales en ambas direcciones)
- Cargas por eje de los vehículos comerciales.

Barras de anclaje: sirven para ayudar a mantener la trabazón de agregados en la transferencia de cargas en las juntas longitudinales de contracción, estas juntas son las que dividen los carriles de tráfico y controlan el agrietamiento. El espaciamiento de las barras de acero varia con el espesor de la losa y la distancia a la junta más cercana al borde libre.

8.2.5 Proyecto nuevo

8.2.5.1 Escoger el sistema de unidades

El programa permite utilizar dos sistemas de unidades, el sistema internacional (S.I) y el sistema inglés, por defecto el programa empieza con el inglés. Para cambiar el sistema de unidades nos ubicamos en la barra inferior de la interfaz (modulo 5) y seleccionamos el que deseemos utilizar. La tabla 1 muestra los factores de conversión utilizados.

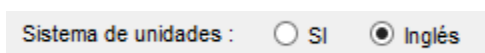


Figura 2. Sistema de unidades

Sistema inglés	Sistema internacional	Coeficiente de conversión
in	mm	25.4
ft	mm	0.305
lb	Kg	0.454
lbf	N	4.45
kip	kN	4.45
lb/in ²	Mpa	0.00689
lb/in ³ (K)	Mpa/m	0.271

Tabla 1. Conversión de unidades

8.2.5.2 Ingresar datos generales del proyecto: En estos campos se ingresa el nombre y descripción propia de la estructura de pavimento que vamos a ensayar.

El formulario muestra un encabezado 'Datos generales' con una línea de subrayado. Debajo, hay dos campos de entrada de texto: 'Proyecto:' y 'Descripción:', cada uno con un recuadro rectangular para escribir.

Figura 3. Ingreso de datos generales

8.2.5.3 Periodo de diseño: se considera sinónimo al término “periodo de análisis de transito” el periodo de diseño que se elija afecta el diseño de espesores, puesto que determina cuantos vehículos comerciales podrán circular sobre el pavimento.

El formulario muestra el texto 'Período de diseño :' seguido de un recuadro rectangular para ingresar un valor numérico, y luego la palabra 'años' en color azul.

Figura 4. Periodo de diseño

8.2.5.4 Espesor de losa: en este campo ingresamos el espesor de losa que deseemos evaluar, el rango de altura de losa que normalmente se utilizan van desde los [100-350] mm en el sistema internacional y [4-14] in en el sistema inglés.

El formulario muestra el texto 'Espesor de la losa :' seguido de un recuadro rectangular para ingresar un valor numérico, y luego la letra 'in' en color azul.

Figura 5. Espesor de losa

8.2.5.5 *Modulo de rotura*: ingresamos la resistencia a flexión del concreto, por lo general se toman valores entre [3.8-4.5] MPa y [550-650] psi.

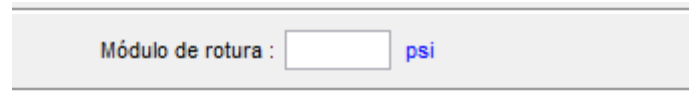
A horizontal form with a light gray background. It contains the text "Módulo de rotura :" followed by a white rectangular input field. To the right of the input field is the unit "psi" in blue text.

Figura 6. Módulo de rotura

8.2.5.6 *Dovelas y bermas*: en estos campos escogemos si la estructura del pavimento posee transmisión de cargas en las juntas por medio de barras de acero y si posee sobre ancho o confinamiento lateral.

A form with two rows and a light gray background. The first row is labeled "Dovelas:" and has two radio buttons: "Si" (selected) and "No". The second row is labeled "Bermas :" and has two radio buttons: "Si" and "No" (selected).

Figura 7. Dovelas y bermas

8.2.5.7 *Modulo de reacción del conjunto subrasante y subbase*: Si poseemos el valor directo que k , escogemos la primera opción e ingresamos el dato. Es muy común que por economía y dificultad de los ensayos tengamos el CBR, el cual por correlación encuentra el valor de k .

Una estructura de pavimento comúnmente utiliza una subbase que sirve para controlar problemas de bombeo y a su vez aumentar el valor de k , si no queremos ingresar subbase en nuestro análisis desactivamos esta opción oprimiendo sobre ☐, para ingresar la subbase activamos la ☐ , además podemos escoger la opción si es un material tratado con cemento o no, lo cual puede aumentar el k del conjunto.

Modulo de reacción de la subrasante (K)

Subrasante

☒ Ingreso directo

K = pci

☐ Correlación con CBR

CBR =

☒ Subbase

Espesor : in

☒ Sin tratar ☐ Tratada con cemento

Figura 8. Modulo K. Subrasante - subbase

8.2.5.8 Factor de seguridad: En la parte superior del modulo 2, encontramos un menu desplegable donde podemos escoger el FS, según el tipo de tránsito al cual va ha ser sometido el pavimento.

Factor de seguridad : 1.0 ▼

Tipo de Ejes : 1.1 Ejes ▼

Ejes Simples Kips

Figura 9. Factor de seguridad

8.2.5.9 Tránsito, cargas y repeticiones: El programa posee la capacidad para realizar análisis para los ejes simples, tandem y tridem; los cuales se encuentran en el menú desplegable que se muestra en la figura, de esta manera se activa la tabla de cargas y repeticiones.

Las cargas se encuentran en unidades de Kips para el sistema inglés y KN en el sistema internacional, el programa carga por defecto unas cargas normalizadas en el medio, pero los valores pueden ser modificados.

Tipo de Ejes :

Ejes Simples

Ejes Simples

Ejes Tandem

Ejes Tridem

Carga	Repeticiones
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

Tipo de Ejes :

Ejes Simples

Ejes Simples kips

Carga	Repeticiones
30	6310
28	14690
26	30140
24	64410
22	106900
20	235800
18	307200
16	422500
14	586900
12	1837000
0	0
0	0
0	0

Figura 10. Tablas de cargas y repeticiones

8.2.5.10 Barras de anclaje: Para calcular la longitud y separación de las barras de anclaje se ingresan las propiedades de la barra, diámetro y resistencia, también se necesita ingresar el ancho del carril que afecta directamente la separación entre estas.

Estas opciones las escogemos entres menús desplegables que se encuentran en el módulo 4 de la interfaz de usuario.

Barras de anclaje

Numero de barra:

3/8"

 in

Acero (fy):

1850

 kg/cm²

Ancho de carril:

3.05

 m

Figura 11. Barras de anclaje

8.2.5.11 Calcular: en el módulo 3, encontramos el panel en el cual vamos a realizar el análisis de la estructura de pavimento ingresado, oprimiendo el botón calcular al instante podemos ver un resumen de las propiedades del pavimento, seguido por el porcentaje de fatiga y erosión.

También podemos ver las recomendaciones de longitud y separación, para las barras de anclaje utilizadas en las juntas longitudinales, y los pasadores, ubicados en las juntas transversales.

El valor del módulo de reacción (k) en este panel, es el del conjunto subrasante-subbase.

Los resultados igualmente a los anteriores puntos podemos verlos en los dos sistemas de unidades presentes en el programa.

Calcular			Calcular		
Espesor de losa :	9.5	in	Espesor de losa :	250	mm
Módulo de rotura :	650	psi	Módulo de rotura :	4.5	kPa
Módulo de reacción (K)	120	pci	Módulo de reacción (K)	35	MPa/m
Periodo de diseño :	20	años	Periodo de diseño :	20	años
Porcentaje de fatiga	83.27		Porcentaje de fatiga	25.10	
Porcentaje de erosión	41.80		Porcentaje de erosión	28.37	
Recomendación para barras de anclaje:			Recomendación para barras de anclaje:		
Longitud:	18	in	Longitud:	45	cm
Separación entre barras:	18	in	Separación entre barras:	45	cm
Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):			Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):		
Longitud:	18	in	Longitud:	45	cm
Separación entre barras:	12	in	Separación entre barras:	30	cm
Diámetro de barras:	1.25	in	Diámetro de barras:	3.18	cm

Figura 12. Resultados de análisis

8.2.5.12 Análisis de sensibilidad: El programa cuenta con la opción de realizar un análisis de sensibilidad de la estructura del pavimento rígido, oprimiendo el botón análisis de sensibilidad:

**Recomendación para pasadores
(fy=60 ksi):**

Longitud:	18	in
Separación entre barras:	12	in
Diámetro barras:	1.25	in

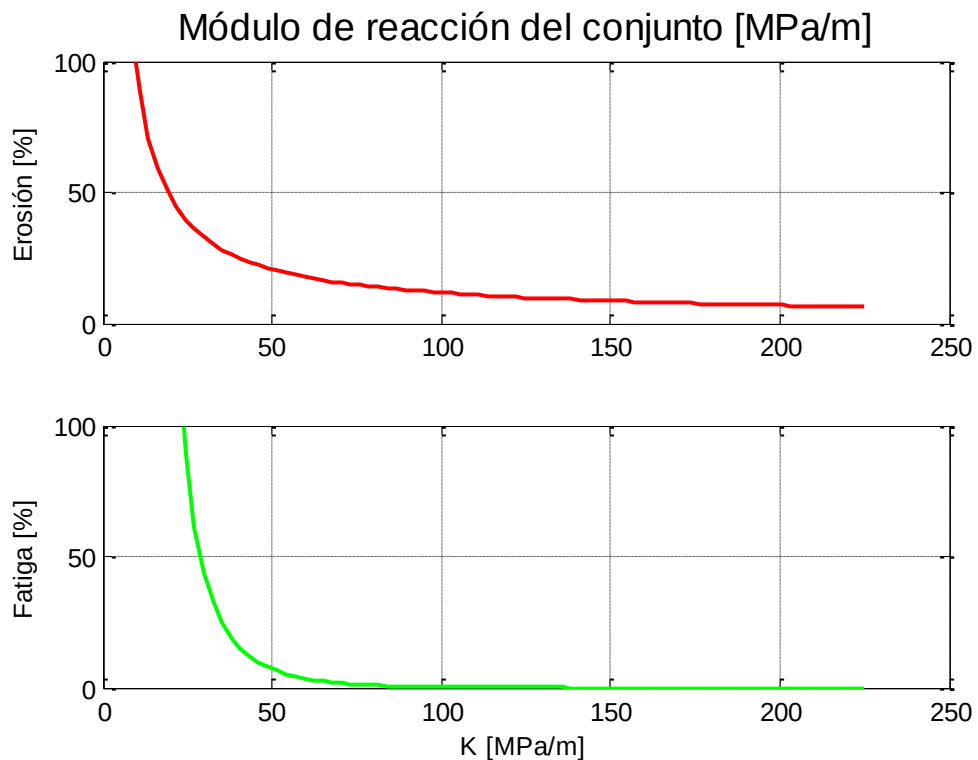
Análisis de sensibilidad

Guardar Abrir

TXT Salir

Figura 3. Análisis de sensibilidad

De esta forma podemos ver cómo se comporta el pavimento si variamos el módulo de reacción del suelo, el módulo de rotura del concreto y espesor de la losa, como se muestra a continuación:



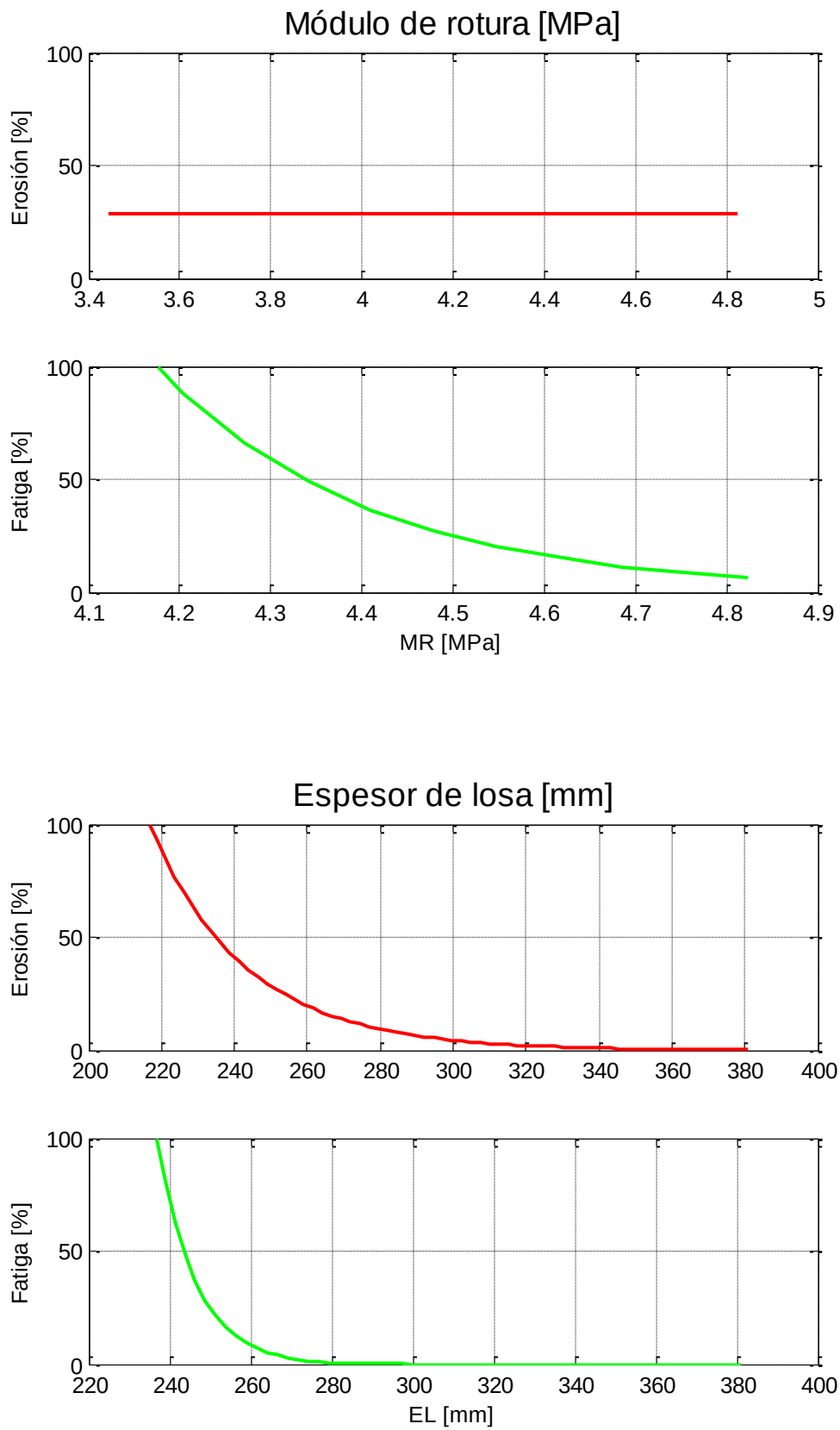


Figura 13. Gráficos resultados del análisis de sensibilidad

8.2.6 Guardar

Para guardar los datos del proyecto, tenemos dos opciones:

8.2.6.1. *Panel de análisis*: oprimiendo en el botón guardar que se encuentra en el módulo 3.

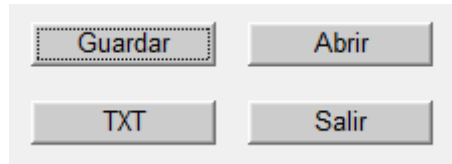


Figura 14. Guardar archivos

8.2.6.2 *Barra de herramientas*: En la parte superior de la interfaz, en menú desplegable Archivo.

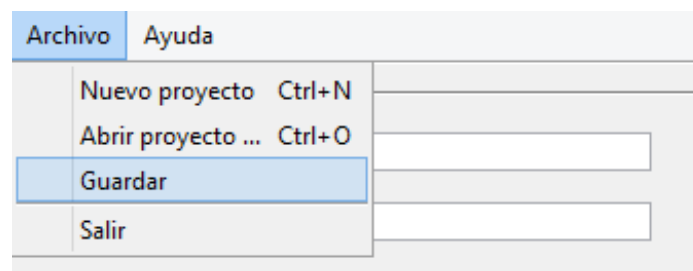


Figura 15. Guardar archivos barra de herramientas

A continuación se abre una ventana donde podemos colocar el nombre del proyecto y ubicar la carpeta para guardar el archivo, en extensión “.mat”.

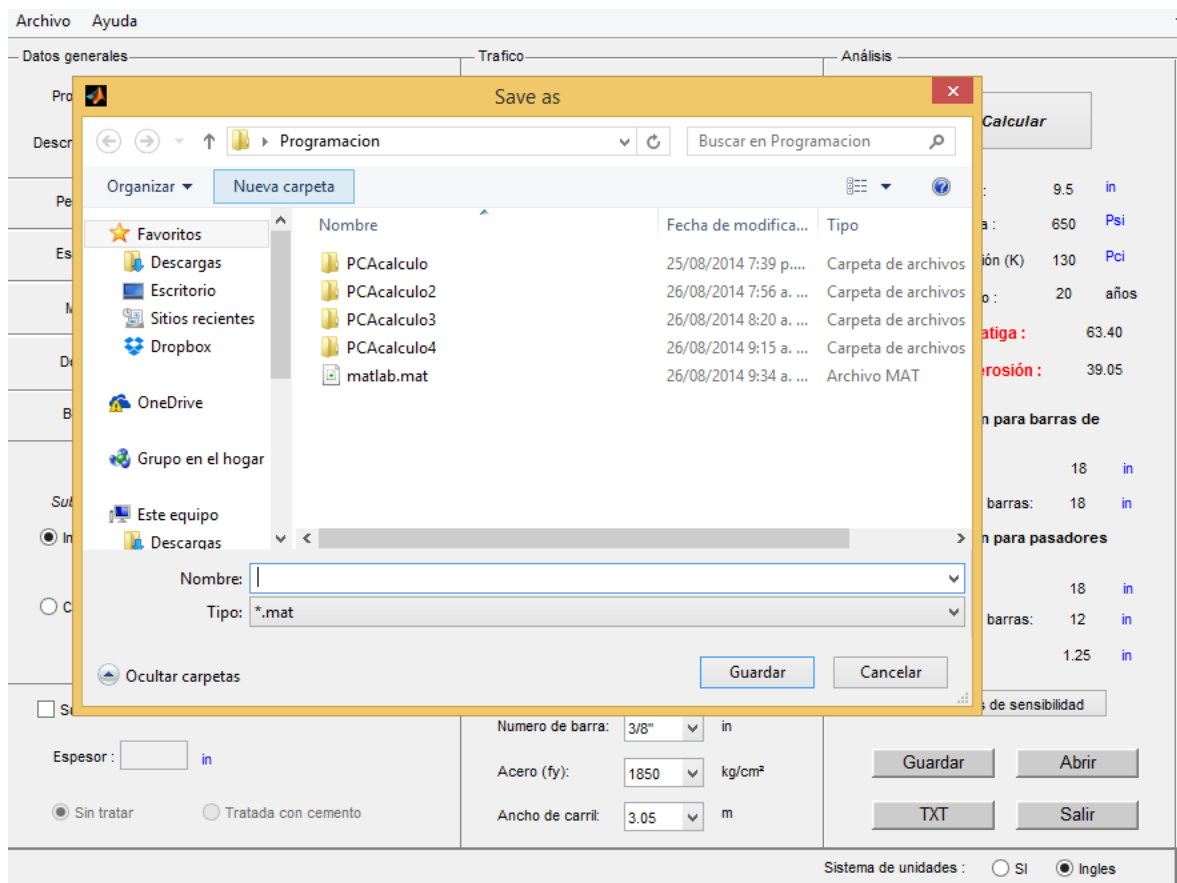


Figura 16. Ventana de guardar archivos

8.2.7 Abrir archivo existente

Para abrir los datos de la estructura de pavimento que hemos guardado anteriormente tenemos dos opciones:

8.2.7.1. *Panel de análisis:* oprimiendo en el botón abrir que se encuentra en el módulo 3.

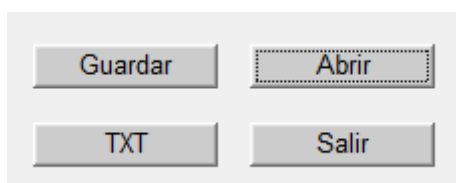


Figura 17. Abrir archivo

8.2.7.2 Barra de herramientas: En la parte superior de la interfaz, en menú desplegable Archivo.

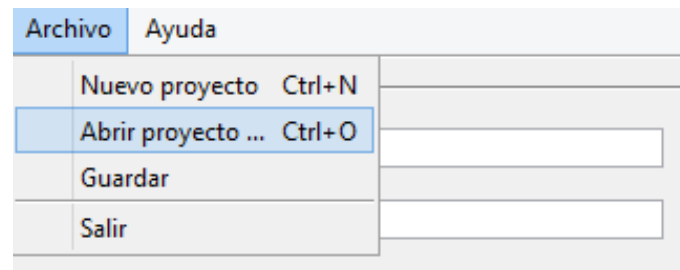


Figura 18. Abrir archivo a partir de barra de herramientas

A continuación se abre una ventana donde se puede ubicar la carpeta donde se encuentra el archivo, el cual se debe encontrar en extensión “.mat”.

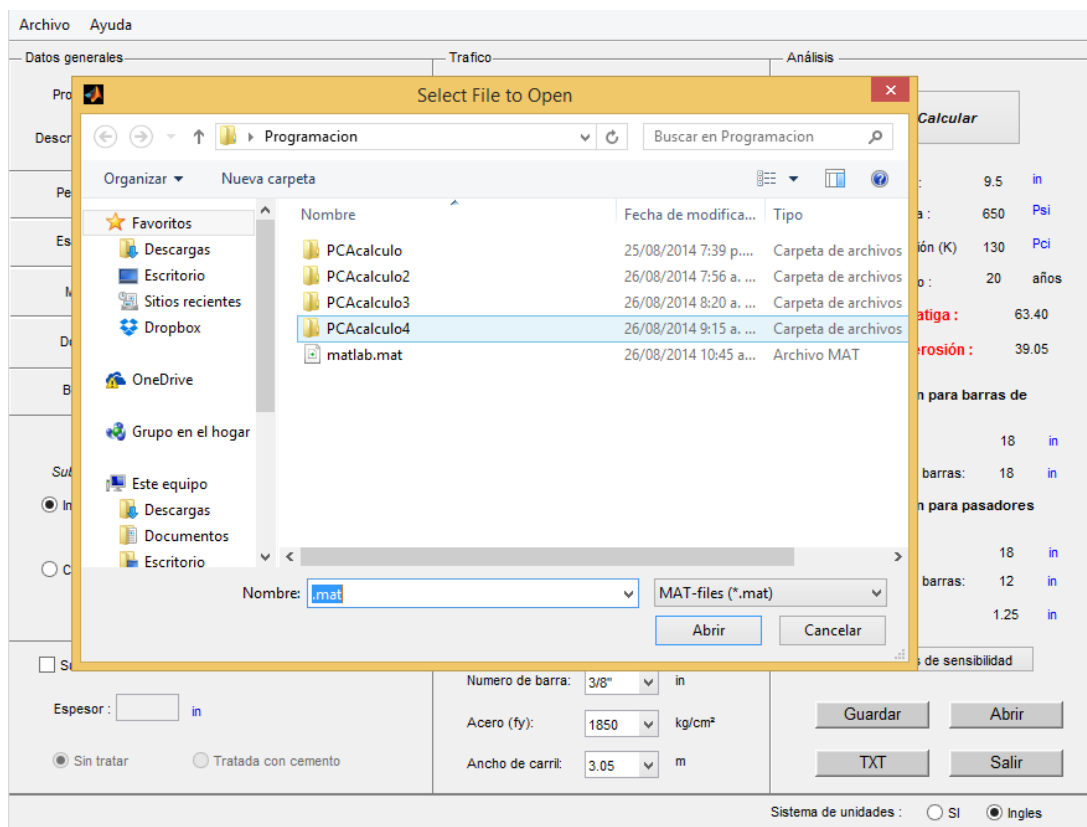


Figura 19. Ventana para abrir archivos .mat

8.2.8 Generar reporte

El programa tiene la facilidad de generar un reporte en .txt, oprimiendo en botón “txt” del módulo 3.

El reporte se guarda en la carpeta seleccionada y se creara un reporte como el que se muestra a continuación:

Fecha 26-Aug-2014

DISEÑO PARA PAVIMENTO RIGIDO METODOLOGIA PCA-84

Nombre del Proyecto: ejemplo
 Descripción: generación de reporte

Periodo de Diseño: 20 años
 Espesor de Losa: 9.50 in
 Módulo de rotura (MR): 650 psi
 Espesor de Subbase: 4 in
 Base tratada con Cemento: No
 CBR de subrasante: No
 Modulo de resiliencia (K): 122.70 pci
 Factor de seguridad: 1.20
 Union con Dovelas: Si
 Pavimento con Bermas: No
 EDES SIMPLES:

Carga por eje Kips	Multiplicado por F.S	Expectativa de repeticiones	Analisis de fatiga		Analisis de erosion	
			Repeticiones abmisibles	porcentaje de fatiga	Repeticiones abmisibles	porcentaje de erosion
30	36	6310	22224	28.39	1434412	0.44
28	34	14690	64697	22.71	2175386	0.68
26	31	30140	195168	15.44	3454852	0.87
24	29	64410	923942	6.97	5836806	1.10
22	26	106900	20437679	0.52	10771061	0.99
20	24	235800	0	0.00	22833739	1.03
18	22	307200	0	0.00	62585879	0.49
16	19	422500	0	0.00	341531669	0.12
14	17	586900	0	0.00	0	0.00
12	14	1837000	0	0.00	0	0.00

EJES TANDEM:

Carga por eje Kips	Multiplicado por F.S	Expectativa de repeticiones	Analisis de fatiga		Analisis de erosion	
			Repeticiones abmisibles	porcentaje de fatiga	Repeticiones abmisibles	porcentaje de erosion
52	62	21320	785617	2.71	881487	2.42
48	58	42810	10026033	0.43	1411023	3.03
44	53	124900	0	0.00	2389264	5.23
40	48	372900	0	0.00	4370590	8.53
36	43	885800	0	0.00	8966286	9.88
32	38	930700	0	0.00	22305479	4.17
28	34	1656000	0	0.00	83760328	1.98
24	29	984900	0	0.00	2229260154	0.04
20	24	1227000	0	0.00	0	0.00
16	19	1356000	0	0.00	0	0.00

Recomendación para barras de anclaje:
 Longitud de barras: 17.7 in
 Separación entre centros: 17.7 in

Recomendación para pasadores:
 Longitud de barras: 18.0 in
 Separación entre centros: 12.0 in
 Diametro de la barra: 1.3 in

PORCENTAJE TOTAL DE FATIGA: 77.18
 PORCENTAJE TOTAL DE EROSION: 41.02

Figura 20. Generación de reporte

8.2.9 Salir.

Para salir del programa, podemos hacerlo a partir del botón salir en la parte inferior derecha de la interfaz o en la barra de herramientas, en el menú desplegable de “Archivo”.

8.2.10 Ejemplos de diseño.

PCAcálculo

Archivo Ayuda

Datos generales

Proyecto: Desing 1A

Descripción: Artículo PCA-1984

Período de diseño: 20 años

Espesor de la losa: 9.5 in

Módulo de rotura: 650 psi

Dovelas: ☒ Si ☐ No

Bermas: ☐ Si ☒ No

Modulo de reacción de la subrasante (K)

Subrasante

☒ Ingreso directo K = 130 pci

☐ Correlación con CBR CBR =

☐ Subbase

Espesor: in

☒ Sin tratar ☐ Tratada con cemento

Tránsito

Factor de seguridad: 1.2

Tipo de Ejes: Ejes Simples

Ejes Simples Kips

Carga	Repeticiones
30	6310
28	14690
26	30140
24	64410
22	106900
20	235800
18	307200
16	422500
14	586900
12	1837000
0	0
0	0
0	0

Barras de anclaje

Diámetro de barra: 1/2" in

Acero (fy): 1850 kg/cm²

Ancho de carril: 3.65 m

Análisis

Calcular

Espesor de losa: 9.5 in

Módulo de rotura: 650 Psi

Módulo de reacción (K): 130 Pci

Período de diseño: 20 años

Porcentaje de fatiga: 63.40

Porcentaje de erosión: 39.05

Recomendación para barras de anclaje:

Longitud: 24 in

Separación entre barras: 28 in

Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):

Longitud: 18 in

Separación entre barras: 12 in

Diámetro barras: 1.25 in

Análisis de sensibilidad

Guardar Abrir

TXT Salir

Sistema de unidades: ☐ SI ☒ Ingles

PCAcálculo

Archivo Ayuda

Datos generales

Proyecto: DISEÑO 1D

Descripción: ICPC 2011- PAG 71

Período de diseño: 20 años

Espesor de la losa: 260 mm

Módulo de rotura: 4.5 MPa

Dovelas: ☐ Si ☒ No

Bermas: ☐ Si ☒ No

Modulo de reacción de la subrasante (K)

Subrasante

☒ Ingreso directo K = 80 MPa/m

☐ Correlación con CBR CBR =

☐ Subbase

Espesor: 0 mm

☒ Sin tratar ☐ Tratada con cemento

Tránsito

Factor de seguridad: 1.2

Tipo de Ejes: Ejes Simples

Ejes Simples KN

Carga	Repeticiones
133	6310
125	14690
116	30140
107	64410
98	106900
89	235800
80	307200
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0

Barras de anclaje

Diámetro de barra: 1/2" in

Acero (fy): 2800 kg/cm²

Ancho de carril: 3.65 m

Análisis

Calcular

Espesor de losa: 260 mm

Módulo de rotura: 4.5 KPa

Módulo de reacción (K): 80 MPa/m

Período de diseño: 20 años

Porcentaje de fatiga: 0.09

Porcentaje de erosión: 75.73

Recomendación para barras de anclaje:

Longitud: 85 cm

Separación entre barras: 110 cm

Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):

Longitud: 45 cm

Separación entre barras: 30 cm

Diámetro barras: 3.49 cm

Análisis de sensibilidad

Guardar Abrir

TXT Salir

Sistema de unidades: ☒ SI ☐ Ingles

8 CONCLUSIONES

- El programa disminuyo el tiempo de diseño de un espesor de pavimento rígido.
- permitió fácilmente variar los factores de diseño para ver cómo se comportaba la estructura del pavimento.
- Los resultados obtenidos por son correctos y presentan una pequeña diferencia con referencias del articulo PCA-84 y la aplicación BS-PCA de la universidad del cauca.
- La interfaz de usuario es de fácil manejo y entendimiento, generando comodidad en el ingeniero diseñador.

10. RECOMENDACIONES

Reportar cualquier falla del programa o inquietud a los desarrolladores, el contacto se encuentra dentro del programa en la pestaña ayuda, de la barra de herramientas.

11. LIMITACIÓN

El uso de los resultados obtenidos por medio del PCAcalcula, es solo responsabilidad del ingeniero diseñador y en ningún caso comprometen a los desarrolladores del programa.

REFERENCIAS

1. Cornejo A.N., Velasquez G. W. (Octubre de 2009). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DISEÑO. UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA“JOSÉ SIMEÓN CAÑAS” El salvador . Pag 5-11
2. Ying-Haur Lee, Samuel H. Carpenter. (2001). PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 4, 294-295.
3. Tayabji, S. D. and Colley, B. E., “Analysis of Jointed Concrete Pavement,” Report No. FHWA-RD-86-041, Federal Highway Administration (1986). Pag 110-115.

BIBLIOGRAFIA

- Portland Cement Association, The Design for Concrete Highway and Street Pavements. PCA, Skokie, IL, U. S. A. (1984).
- PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign (2001)
- AASHTO, Supplement to the Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., U. S. A. (1998).
- ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DISEÑO. UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA“JOSÉ SIMEÓN CAÑAS” El salvador
- INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Diseño, Construcción y mantenimiento de Pavimento de Concreto – Medellín (2001).
- Portland Cement Association, Subgrades and Subbases for concrete pavements. PCA, Skokie, IL, U. S. A. (1971)