



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

T E S I N A

PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN VÍAS TERRESTRES

TEMA DE TESINA:

**DISEÑO DE PAVIMENTOS APLICANDO LA METODOLOGÍA DE
LA FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA)**

P R E S E N T A :

ING. STELLA ALEJANDRA REYES PARDO

DIRECTOR DE TESINA:

ING. FEDERICO DOVALI RAMOS

**MÉXICO, D.F. 2016
2016**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mi madre Stella Pardo de Reyes por su apoyo incondicional en mi formación profesional. Mi querida madre ejemplo de tenacidad y fortaleza.

A mis hermanos Hugo Hernando y Juan Carlos por sus consejos y brindarme su cariño.

A mi asesor y director de tesis Ing. Federico Dovali por su tiempo, dedicación y apoyo en la realización de este trabajo.

A mis profesores por compartir sus conocimientos y experiencias.

A la UNAM por brindarme la oportunidad de vivir la experiencia de ser alumna de esta prestigiosa universidad y haberme dado los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

A Mario Jalil Lerin Torres por su apoyo y ánimos de motivación para salir adelante durante el transcurso de la elaboración de este trabajo.

A la familia Lerin Torres por brindarme su cariño, apoyo y acogerme en su hogar.

A mi familia y a todas aquellas personas que me brindaron su ayuda para hacer posible un logro más.

Tabla de Contenido

1 -	Objetivos	5
2 -	Introducción	6
3 -	Pavimentos.....	7
3.1	Propósitos de los Pavimentos.....	7
3.2.-	Tipos de pavimentos. Flexibles, rígidos. Estructura de cada uno. Criterios de respuestas a la aplicación de cargas.	8
3.2.1	Pavimentos Flexibles.....	8
3.2.2	Pavimentos Rígidos.....	13
3.3.-	Descripción de los métodos de evaluación de capacidad portante de las capas que los forman. California Bearing Ratio CBR (Valor relativo de soporte) para los flexibles; Módulo de reacción (K) para los rígidos.	19
4 -	Diferencias entre pavimentos de carreteras y de aeropuertos.	28
5 -	Descripción general de los diferentes métodos utilizados para el diseño.....	33
6 -	Ejemplo de proyecto aplicando el método de la FAA.....	53
7 -	Características del mantenimiento de los pavimentos aeronáuticos.	64
8 -	Conclusiones.....	68
9 -	Bibliografía.....	71

Índice de Figuras

<i>Figura 1 Estructura Pavimentos Flexibles</i>	9
<i>Figura 2. Distribución de esfuerzos en el terreno debido a una</i>	11
<i>Figura 3 Distribución de la Carga por Rueda</i>	12
<i>Figura 4 Estructura Pavimentos Rígidos</i>	13
<i>Figura 5 Fenómeno de Bombeo</i>	15
<i>Figura 6 Posiciones posibles en pavimentos rígidos por efectos de las cargas</i>	17
<i>Figura 7 a instalación el equipo portátil de carga para efectuar la prueba de valor soporte de california (CBR) en el lugar</i>	20
<i>Figura 8 Curvas típicas de carga -penetración</i>	22
<i>Figura 9 corrección de la curva carga-penetración</i>	23
<i>Figura 10 Formato Ilustrativo Hoja de registro y cálculo del Valor Soporte California (CBR)</i>	25
<i>Figura 11 Esquema de la prueba de placa</i>	26
<i>Figura 12 Correlación 1</i>	27
<i>Figura 13 Correlación 2</i>	27
<i>Figura 14 Curvas de cálculo de pavimentos flexibles para áreas críticas, tren de rueda simple</i>	49
<i>Figura 15 Cálculo de los espesores de sub-base</i>	51
<i>Figura 16 Curvas de cálculo de pavimento rígido tren de rueda simple</i>	52

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 Relación de tiempo-penetración</i>	21
<i>Tabla 2 Clasificación operaciones de las aeronaves</i>	34
<i>Tabla 3 sistema unificado de clasificación de los suelos.</i>	43
<i>Tabla 4 factores de conversión trenes de aterrizaje</i>	46
<i>Tabla 5 espesor del pavimento para altos niveles de salida, expresado como % del espesor necesario para 25000 salidas</i>	47

1 - Objetivos

- Analizar los métodos de evaluación de capacidad, el California Bearing Ratio (CBR) para los pavimentos flexible y el Modulo de reacción (K) para los rígidos
- Hacer una comparativa entre los pavimentos carreteros y de aeropuertos
- Diseñar un ejemplo de proyecto aplicando el método de La Federal Aviation Administration del Gobierno de los Estados Unidos (FAA)

2 - Introducción

Los aeropuertos forman parte de la infraestructura para el sistema de transporte aéreo lo que tiene un alto nivel de inversión debido entre otros a los costos elevados por mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos, por lo cual han tenido una evolución como consecuencia del desarrollo tecnológico y crecimiento en las operaciones, buscando atender los incrementos de la demanda y manteniendo un nivel óptimo de servicio. Para el desarrollo de cualquier país es básico la importancia que se le dé a la planeación, construcción y mantenimiento del mismo permitiendo que el aeropuerto sea rentable económicamente.

Los pavimentos juegan un papel fundamental en el aeropuerto, por lo cual su planeación es primordial para el diseño, debido a parámetros que se analizan como son el comportamiento de la demanda, las repeticiones de las cargas y el valor de estas. Para efectos del diseño del pavimento, se debe establecer la aeronave que requiera los mayores espesores dependiendo de sus repeticiones de salidas anuales.

En este trabajo se aplicará la metodología para el diseño de pavimentos desarrollada por la Federal Aviation Administration FAA de los Estados Unidos. Consta de una serie de monogramas para cada tipo de aeronave, que sirven para determinar el espesor total de pavimento, en áreas críticas y no críticas

El método de la FAA, es una herramienta práctica y de gran utilidad para el diseño de estructuras de pavimentos para aeropuertos, considerándose un método que se encuentra bien documentado y actualmente es el más utilizado.

Otro factor importante es el mantenimiento de los pavimentos aeronáuticos, que se deben tener en buen estado de modo que proporcionen comodidad y seguridad.

Un mantenimiento oportuno permite ofrecer un servicio adecuado dentro de la vida útil del pavimento. Pero es necesario que este se ajuste a las tecnologías modernas con el fin de cumplir con su función de proporcionar una superficie de rodamiento segura y eficiente para el tránsito de las aeronaves

3 - Pavimentos.

El pavimento es la estructura que se construye sobre las terracerías de una obra vial.

Está estructurado por un sistema de varias capas construidas con materiales pétreos aglutinados mecánicamente y/o con agentes de propiedades cementantes como la cal, el asfalto o el cemento portland.

Conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a las capas inferiores, distribuyéndolas con uniformidad para tener una operación rápida y segura.

Cada capa tiene una función diferente de tal manera que sus propiedades concatenadas deben proporcionar una estructura estable, resistente, poco deformable y durable, tanto a los esfuerzos inducidos por el tránsito, como a los efectos nocivos de los agentes del intemperismo contando además con una superficie de rodamiento antiderrapante.

3.1 Propósitos de los Pavimentos

Proporcionar una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tránsito a lo largo de un periodo de tiempo, denominado vida de diseño, ciclo de vida o vida útil, durante el cual solo debiera ser necesarios rutinas periódicas de conservación o reparaciones someras.

Distribuir los esfuerzos verticales y horizontales provocados por las cargas, de forma que a cada capa solo llegue un esfuerzo, compatible con su capacidad de soporte. Las deformaciones que se produzcan tanto en la capa subrasante como en las diferentes capas del pavimento deberán ser admisibles, teniendo en cuenta la repetición de cargas y la resistencia a la fatiga de los materiales.

Constituir una estructura resistente a los factores climatológicos, en especial de la temperatura y del agua, por sus efectos adversos en el comportamiento de los materiales del pavimento y de los suelos de cimentación.

Existe una diversidad de criterios para determinar el tipo de pavimento más adecuado, debemos tener presente que un pavimento debe cumplir con una serie de condiciones que lo hagan óptimo.

- a) Resistencia estructural
- b) Deformabilidad
- c) Durabilidad
- d) Economía
- e) Requerimientos de conservación
- f) Coeficiente de fricción alto , que en el caso de las pistas y calles de rodaje se traduce en seguridad
- g) Índice de rugosidad tal que no genere vibraciones perjudiciales a los instrumentos y a la estructura de los aviones

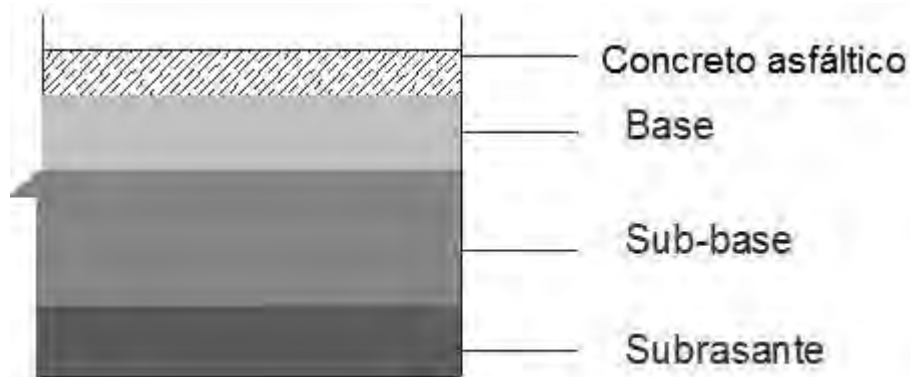
3.2.- Tipos de pavimentos. Flexibles, rígidos. Estructura de cada uno. Criterios de respuestas a la aplicación de cargas.

3.2.1 Pavimentos Flexibles

Están formados por una capa bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub – base, la calidad de estas capas es descendentes hacia abajo.

La transmisión de esfuerzos se hace de una capa a otra y el comportamiento del sistema dependerá básicamente de la forma en cada una responda ante las cargas y la acción del clima.

Figura 1 Estructura Pavimentos Flexibles



En general cualquier suelo natural es aprovechable para terracerías, se exceptúan los suelos muy orgánicos o aquellos cuyo rebote elástico o expansivos sea importante, por lo tanto produzcan deformaciones excesivas a las capas suprayacentes.

Cuando el material de la terracería sea de mala calidad puede hacerse necesario el empleo de una capa subrasante de material de mejor calidad que haga de transición entre esta y el pavimento.

A continuación se detallarán las funciones de las distintas capas que componen un pavimento flexible:

✓ **Sub-base:**

Una de las principales funciones de esta en un pavimento flexible es de carácter económico, se trata de formar el espesor requerido con un material de menor calidad.

Todo el espesor podría construirse con un material de alta calidad, como el usado en la base, pero se prefiere hacer aquella más delgada y sustituirla en parte por una sub-base, aun cuando esto traiga consigo un aumento en el espesor total del pavimento, pues naturalmente cuanto menor sea la calidad del material colocado será mayor el espesor necesario para soportar los esfuerzos transmitidos.

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

Además actúa como dren para desalojar el agua que se infiltre al pavimento y para impedir la ascensión capilar hacia la base de agua procedente de la terracería.

✓ **Base:**

Permite reducir el espesor de la carpeta de mayor costo. La base es el componente principal estructuralmente hablando de un pavimento flexible. Es la capa de apoyo de la carpeta asfáltica, se construye con material seleccionado, su función principal es transmitir de manera uniforme las cargas concentradas de los vehículos a las capas inferiores, proporcionar el drenaje adecuado al pavimento, controlar los esfuerzos producidos por la dilatación y contracción, causados por cambios de temperatura y humedad, evitando así agrietamientos en la superficie.

Proporcionar un elemento resistente que transmita a la sub-base y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. La base en muchos casos debe también drenar el agua que se introduzca a través de la carpeta o por el perímetro del pavimento, así como impedir la ascensión capilar

En los aeropuertos estos materiales tienen un control de selección más exigente que en las carreteras, los requisitos de compactación son más estrictos, con mayores pesos volumétricos y a mayor profundidad que en las carreteras.

✓ **Carpeta:**

Debe proporcionar una superficie de rodamiento adecuada, con textura y color convenientes, resistir los efectos abrasivos del tránsito. Hasta donde sea posible debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.

Las características de una carpeta asfáltica son:

Proporcionar resistencia para que las cargas aplicadas sobre superficies no provoquen deformaciones perjudiciales en las capas inferiores, transmitir las cargas a las capas de apoyo, tener resistencia al desgaste, al intemperismo y a agentes solventes de la mezcla como son los derrames de combustible.

Ser impermeable para que el agua pluvial no penetre a las capas inferiores, proporcionar una superficie antiderrapante y sin asperezas evitando el acuaplaneo y el desgaste excesivo de los neumáticos de los aviones.

Criterios de respuesta de aplicación de cargas pavimentos flexibles

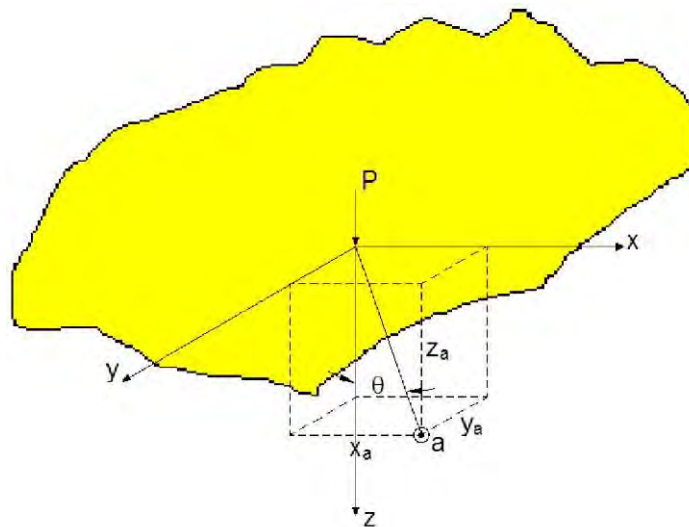
Hipótesis de Boussinesq

En 1885, fue el primero en examinar la respuesta de un suelo a la carga.

Para determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones, en un medio en el que se aplica la carga, se supone que es homogéneo, continuo, isotrópico, y de espesor semi-infinito; sujeto a una carga estática puntual “P”

Se considera la estructura del pavimento como una masa homogénea en la que la distribución de esfuerzos es mayor conforme se aumenta la profundidad del pavimento.

Figura 2. Distribución de esfuerzos en el terreno debido a una Carga Puntual



Modelo de Boussinesq, de carga puntual (P) sobre un medio elástico semi-infinito, y sistema de ejes utilizado

Boussinesq (1885), idealizando un modelo donde se coloca una carga puntual sobre un medio elástico semi-infinito, encontró que la solución para encontrar el valor del **incremento del esfuerzo vertical** ($\Delta\sigma_z$) en un punto cualquiera (**a**) con coordenadas cartesianas de localización ($x = x_a$, $y = y_a$, $z = z_a$, ver Figura 2, debido a la carga (**P**) impuesta, de forma general será:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z_a^2} \cos^5 \theta$$

Donde:

$$\cos \theta = \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

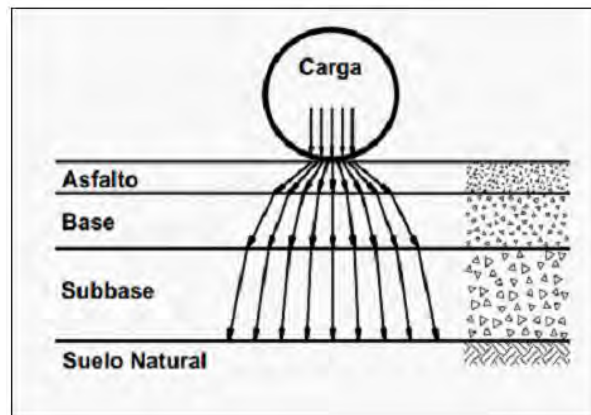
Utilizando las definiciones antes vistas, y realizando las simplificaciones respectivas, se puede expresar el incremento de esfuerzo vertical en el suelo ($\Delta\sigma_z$), de dos maneras:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2 \left[1 + \left[\frac{r}{z} \right]^2 \right]^{5/2}}$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

A continuación se observa en la figura 3 la distribución de la carga en un pavimento flexible:

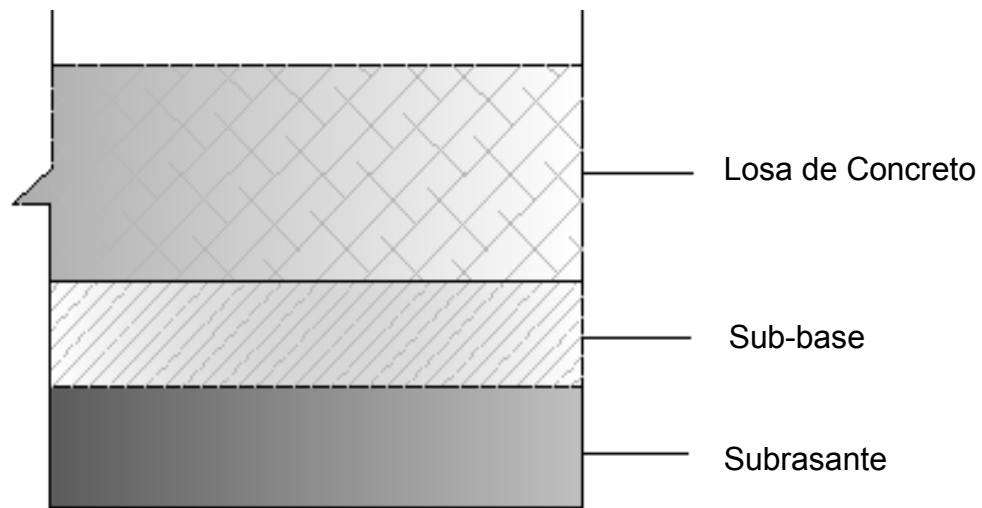
Figura 3 Distribución de la Carga por Rueda



3.2.2 Pavimentos Rígidos

Tiene como elemento estructural una losa de concreto de cemento portland. Esta se apoya sobre la capa de la sub-base. Cuando la subrasante del pavimento tenga una calidad suficientemente buena, la losa de concreto puede colocarse directamente sobre ella, prescindiéndose de una sub-base.

Figura 4 Estructura Pavimentos Rígidos



La distinción entre sub-base, subrasante o la parte superior de una terracería, puede ser un problema de nomenclatura. De lo que se trata es que la losa de concreto tenga un apoyo suficientemente uniforme y estable para garantizar que no carezca de soporte. Para lograr esto, las capas del suelo deben proporcionar la calidad de los materiales que se estén utilizando, los niveles de compactación que se empleen y de condiciones locales de clima y drenaje.

El alabeo es consecuencia principalmente de los cambios de temperatura exterior en la losa e inferior en la sub-base

Los esfuerzos en las losas se presentan por las cargas externas repetitivas, por cambios cíclicos de temperatura que generan contracciones y expansiones, por alabeo, por cambios en el contenido de la humedad, y por cambios volumétrico en la subrasante y en la sub-base.

El pavimento rígido puede ser una buena opción si queremos abatir el elevado costo de conservación y mantenimiento que requiere el pavimento flexible.

Los pavimentos de concreto por su módulo de elasticidad y su rigidez tienden a distribuir la carga sobre un área considerable de suelo, por lo que gran parte de la capacidad estructural del pavimento es proporcionada por la losa de concreto. Por esta razón, las variaciones menores en la resistencia del terreno de soporte tienen poca influencia en la capacidad estructural del pavimento rígido.

Sub-base:

Las principales funciones de la sub-base en un pavimento rígido son:

1. Proporcionar apoyo uniforme a la losa de concreto.
2. Incrementar la capacidad portante de los suelos de apoyo, respecto a la que es común en las terracerías o la subrasante
3. Reducir a un mínimo las consecuencias de los cambios de volumen que puedan tener lugar en el suelo que forme las terracerías o la subrasante.
4. Reducir a un mínimo las consecuencias de la congelación en los suelos de la terracerías o de la capa subrasante.

La sub-base se define como una mezcla de material granular, bien compactada, relativamente grueso y de granulometría uniforme. Cuando estos materiales no están disponibles, debe tenerse en cuenta que la estabilización en un material de mayor calidad, por ejemplo con cemento, mejora mucho su comportamiento, especialmente a lo referente al bombeo y susceptibilidad a cambios volumétricos, permitiendo la conformación de una superficie de apoyo uniforme y garantizando una apropiada resistencia.

Los cambios volumétricos en el terreno de apoyo, son causados por cambios en el contenido de humedad. Esta es una causa importante de que las losas de concreto pierdan su apoyo uniforme, y se puede presentar también por evaporación antes de ser cubiertos por la losa.

El usar materiales factibles a la expansión con contenidos de agua demasiado altos también puede conducir a problemas, pues la contracción posterior, cuando el exceso de agua se reduzca, produce pérdidas locales de apoyo en las losas, especialmente en las zonas de borde. Probablemente la humedad de compactación idónea debe ser un valor comprendido entre el óptimo de campo y un mínimo de 1 ó 2% mayor, pero el

valor preciso deberá fijarse en cada caso atendiendo a las condiciones climáticas y constructivas prevalecientes.

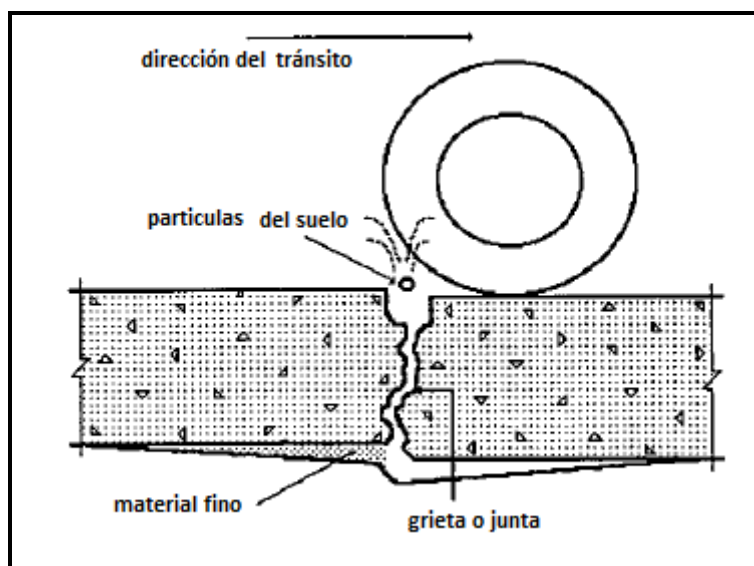
La propensión a la expansión deberá vigilarse también en los materiales de terracería, pues si éstos sufren fuertes cambios de volumen se tendrán deformaciones de importancia en la superficie de la sub-base, con los correspondientes problemas de pérdida de apoyo.

El fenómeno de bombeo es un efecto especial de los pavimentos rígidos, sumamente indeseable, pero muy frecuente cuando no se toman precauciones especiales. Cuando la carga del tránsito pasa sobre una grieta o junta de la losa, transmite presión al material bajo ella. Si el suelo está muy húmedo o saturado, la mayor parte de esta presión la tomará el agua, que tenderá a escapar por la grieta o junta. Después de pasar la carga, la losa se recupera si no existe transferencia de carga efectiva a las losas contiguas.

Si el agua arrastra partículas del suelo, se crea progresivamente un espacio hueco por lo cual la losa pierde apoyo

El final del proceso es la ruptura de la losa bajo carga por falta de apoyo. Para que exista bombeo es preciso que el material de soporte de la losa sea fino y que esté saturado y se produce con las de repeticiones de carga; este fenómeno es frecuente tanto en caminos como en aeropuertos En la figura 4 se ilustra éste fenómeno.

Figura 5 Fenómeno de Bombeo



✓ Losa:

Las funciones de la losa en el pavimento rígido son además de ser una superficie de rodamiento, el de soportar estructuralmente y transmitir a las capas inferiores los esfuerzos que se le apliquen debidamente distribuidos.

Otras de sus funciones es impedir al máximo la penetración del agua superficial a las capas de apoyo y resistir los efectos abrasivos del tránsito.

Los concretos que se utilizan en la losa suelen ser de resistencia relativamente alta a la compresión, generalmente comprendida entre 300 y 400 Kg/cm² de $f'c$ y aún mayores a estas.

Las losas pueden ser de concreto simple, reforzado o pre-esforzado. Cuando se utiliza concreto simple o reforzado, el tamaño de las losas es similar, tendiendo generalmente a ser rectangulares. El concreto pre-esforzado permite la utilización de superficies continuas de área muy superior; este hecho, unido a los considerables ahorros de espesor que es posible lograr en este caso, pero en cuestión económico el costo total es mayor.

Cabe hacer la aclaración que el concreto reforzado o pre-esforzado no son muy usados por su alto costo respecto al beneficio de reducción en el espesor y sobre todo reducción de el número de juntas transversales.

Los factores que afectan el espesor de la losa son principalmente el valor de carga que han de soportar, las presiones de inflado de las llantas de los vehículos, el módulo de reacción del suelo de apoyo y las propiedades mecánicas del concreto que en ellas se utilice, por su resistencia a la tensión por flexión.

Debido a la rigidez y resistencia de la losa, los esfuerzos que se transmiten a la sub-base son relativamente pequeños. El correcto trabajo de las losas exige que estén uniformemente apoyadas y que ese apoyo se mantenga en buenas condiciones durante toda la vida del pavimento; un buen apoyo debe incluir transiciones graduales en donde no haya cambios abruptos en la capacidad portante del terreno.

Criterios de respuesta de aplicación de cargas pavimentos rígidos

Los esfuerzos en pavimentos rígidos por efecto de las cargas, se basa en la determinación de las tensiones y momentos flexionantes que se presentan en las losas de concreto hidráulico.

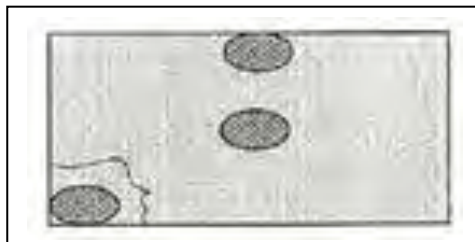
Hipótesis de Westergaard

Supone la losa del pavimento como una placa delgada descansando sobre un terreno especial, que se considera elástico solamente en dirección vertical. Es decir la reacción es proporcional a la flexión del terreno con el nombre de “módulo de reacción del terreno”. Otras hipótesis, son que la losa de concreto es un sólido homogéneo, isotrópico, y elástico.

La carga de una llanta tiene tres posiciones posibles, a su paso por la superficie de rodamiento:

- h) Al centro de la losa
- i) En las orillas
- j) En las esquinas

Figura 6 Posiciones posibles en pavimentos rígidos por efectos de las cargas



Si el esfuerzo producido por la carga rebasa la resistencia a la tensión del concreto, se genera grietas estructurales y como consecuencia, ocurre la falla del pavimento por colapso.

Carga aplicada al centro de una losa:

Para el caso de la carga aplicada al centro de la losa, se supone que la distribución de esfuerzos se lleva a cabo uniformemente sobre un área elíptica, en donde el esfuerzo máximo se encuentra localizado en la base de la losa bajo el centro de la carga.

Carga aplicada en las orillas de una losa:

En el caso de la carga aplicada en las orillas de la losa, se observó que se presenta mayor esfuerzo producido, debido a que la losa no distribuye en toda su área los esfuerzos generados. En este caso el esfuerzo máximo se encuentra localizado a lo largo de borde de la losa, directamente debajo del punto donde se aplica la carga.

Carga aplicada en la esquina de una losa:

Para el caso de la carga aplicada en la esquina de la losa, se tiene que la distribución de esfuerzos es variable ya que la superficie de la misma en este punto no siempre está en contacto con el suelo, situación por la cual la cuantificación del esfuerzo es algo complejo.

En los tres casos mencionados, el módulo de reacción del terreno K se obtiene dividiendo el esfuerzo en el punto considerado, entre la deformación que sufre el terreno, dicho análisis se puede llevar a cabo en laboratorios efectuando una prueba de placa con las condiciones de carga y tipo de suelo a simular, para así determinar los esfuerzos, cargas y módulo de reacción del terreno contemplados para el diseño.

3.3.- Descripción de los métodos de evaluación de capacidad portante de las capas que los forman. California Bearing Ratio CBR (Valor relativo de soporte) para los flexibles; Módulo de reacción (K) para los rígidos.

✓ California Bearing Ratio CBR (Valor relativo de soporte):

Valor soporte California (CBR) en el lugar

La prueba consiste en introducir un pistón de penetración de acero de 2,54 mm entre una carga de referencia de 13.94 kN (1425 kg), será el CBR correspondiente.

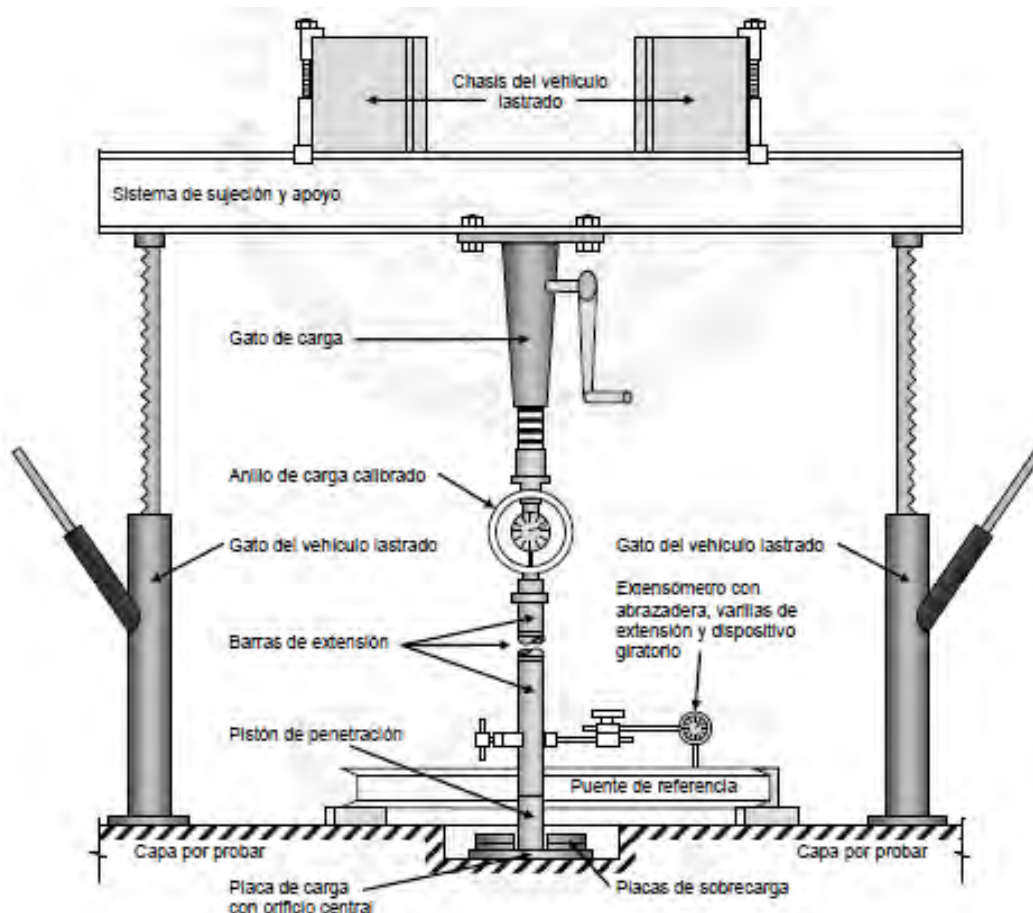
Equipo: debe estar en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes.

- a) Un gato de carga, mecánico o hidráulico con cabeza giratoria, de 25 kN (2,55 T) de capacidad mínima y por lo menos 50mm de carrera, capaz de proveer una penetración constante de 1,27 mm/min.
- b) Dos anillos de medición de carga calibrados, con capacidades de 8,8 kN (900 kg) y 22,6 kN (2300 kg) como mínimo, provisto con un extensómetro de 5 mm de carrera mínima, con aproximación de 0,01 mm y carátula ajustable a ceros.
- c) Un pistón de penetración de acero, con sección circular de $50,8 \pm 0,1$ mm de diámetro y aproximadamente 100 mm de longitud.
- d) Un juego de barras de extensión de acero, atornillables, de aproximadamente 50,8 mm de diámetro, para conectar el pistón de penetración con el sistema de medición de cargas.
- e) Un sistema de sujeción y apoyo del equipo portátil de carga al chasis del vehículo lastrado.
- f) Vehículo lastrado, camión u otro vehículo pesado para ser utilizado como dispositivo de reacción del equipo de carga.
- g) Un extensómetro para medir la penetración.
- h) Un cronómetro o reloj con aproximación de 1 seg.

Preparación de los sitios de prueba

La prueba se ejecuta introduciendo el pistón de penetración en tres sitios que disten entre si no menos de 15 cm. Cada sitio de prueba se prepara como se indica a continuación y se ilustra en la figura 8

Figura 7 a instalación el equipo portátil de carga para efectuar la prueba de valor soporte de california (CBR) en el lugar



Fuente: M-MMP-1-12-13 Normatividad SCT

Procedimiento de prueba

Una vez preparado el primer sitio de prueba, la penetración se efectúa de la siguiente forma:

- a) Se aplica una carga inicial del orden de 43 N (4,38 kg) e inmediatamente después, sin retirar la carga, se ponen en ceros las carátulas de los extensómetros del anillo de medición y del que se utilice para medir el desplazamiento vertical del pistón de penetración.
- b) Se aplica la carga de forma que el pistón de penetración se introduzca en el material con una velocidad uniforme de aproximadamente de 1,27 mm/min, leyendo y registrando las cargas aplicadas para obtener cada una de las penetraciones indicadas en la siguiente tabla.

Tabla 1 Relación de tiempo-penetración

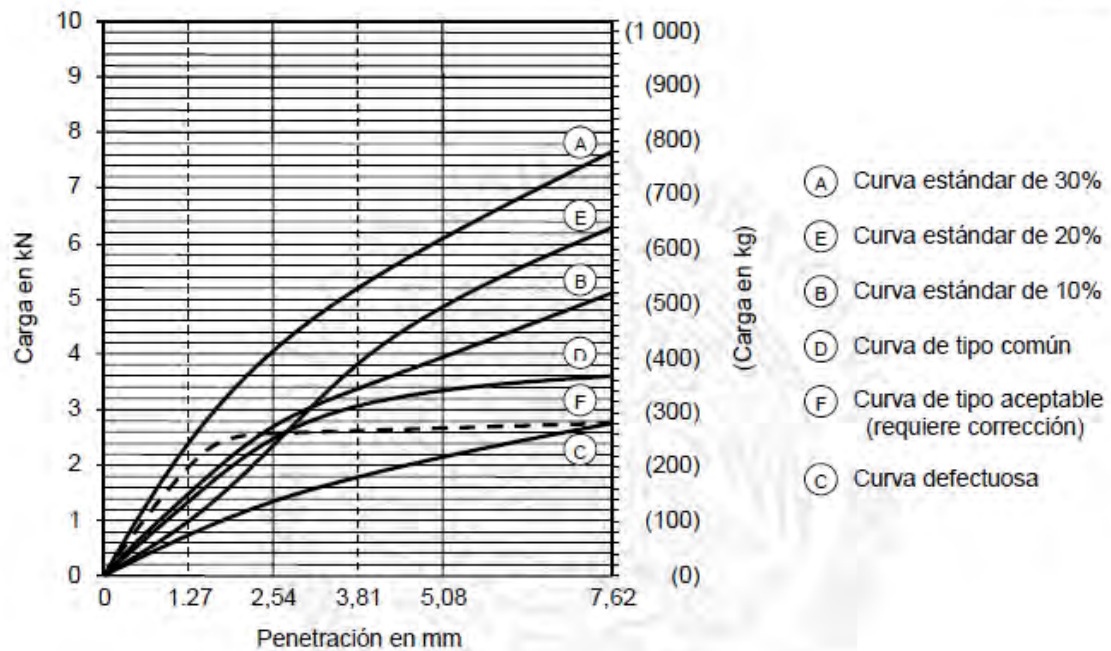
Lecturas	Tiempo min: seg	Penetración mm
Primera	1:00	1,27
Segunda	2:00	2,54
Tercera	3:00	3,81
Cuarta	4:00	5,08
Quinta	6:00	7,62

Fuente: M-MMP-1-12-13 Normatividad SCT

Cálculos y Resultados

- 1) Se representa gráficamente las cargas determinadas, como se indica a continuación:
 - a) En una gráfica como la que se muestra en la figura 8, en la que en el eje de las abscisas se indican las penetraciones y en el de las ordenadas las cargas, se marcan los puntos correspondientes a cada una de las determinaciones a las que se refiere en la tabla 1.

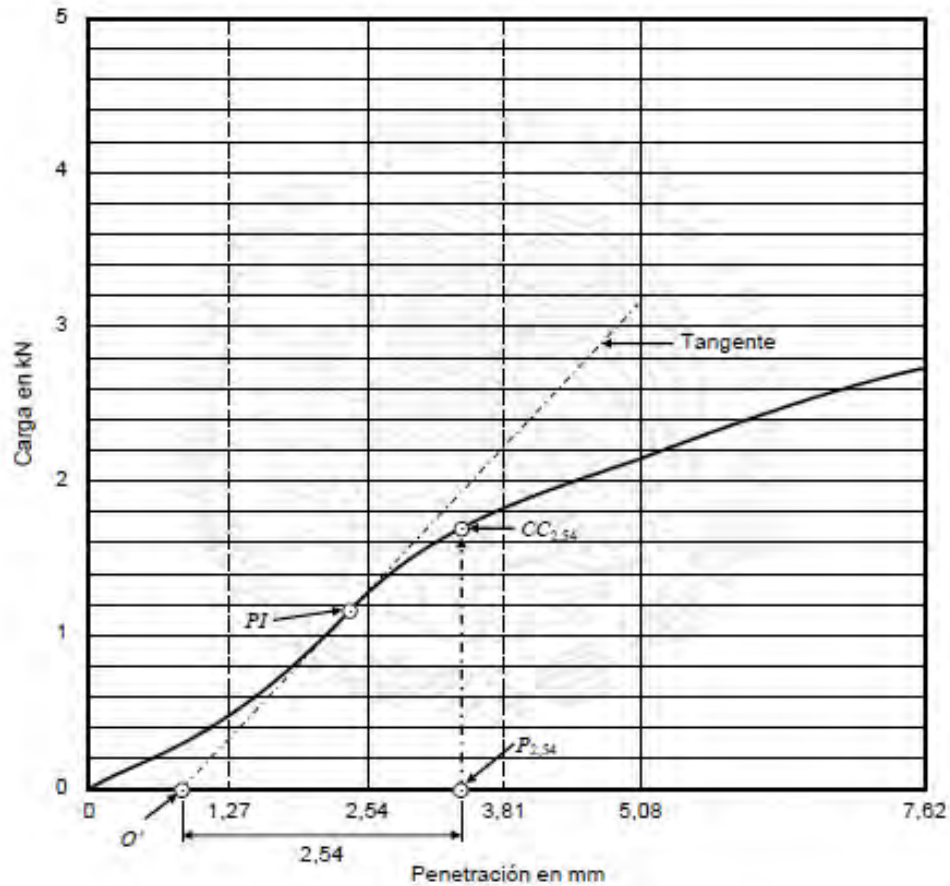
Figura 8 Curvas típicas de carga -penetración



Fuente: M-MMP-1-12-13 Normatividad SCT

- b) Se registra la carga $C_{2,54}$ correspondiente a la penetración de 2,54 mm, con aproximación de 10 N (1,02 kg). Este valor corresponderá a la carga con la que se determina el valor soporte california CBR.
- c) En los casos en que el inicio de la curva presente una concavidad hacia arriba, como la curva E, se efectúa una corrección como se ilustra en la figura 9, trazando una tangente en el punto de inflexión (PI), hasta cortar el eje de las abscisas en el punto que se designa como O' , el cual se tomara como un nuevo origen de las penetraciones y a partir de él se marca el punto $P_{2,54}$ correspondiente a la penetración de 2,54 mm, la ordenada $C_{2,54}$ representa la carga corregida para dicha penetración, en kN, que se tomará como la carga $C_{2,54}$ correspondiente.

Figura 9 corrección de la curva carga-penetración



Fuente: M-MMP-1-12-13 Normatividad SCT

- d) Se repite el procedimiento descrito anteriormente en el numeral 1, hasta contar con las determinaciones de la carga $C_{2,54}$, aplicada o corregida, para cada una de las penetraciones en los tres sitios de prueba. Dichas cargas cumplirán con los siguientes criterios de aceptación:
- ✓ Cuando en dos de las tres determinaciones se obtengan cargas menores de 1,47 kN (150 kg), la diferencia entre las cargas mínima y máxima será menor de 0,29 kN (30 kg)
 - ✓ Cuando en dos de las tres determinaciones se obtengan cargas obtenidas entre 1,47 y 4,41 kN (150 kg y 450 kg), la diferencia entre las cargas mínima y máxima será menor de 0,60 kN (70 kg).

- ✓ Cuando en dos de las tres determinaciones se obtengan cargas comprendas entre 4,41 y 7,85 (450 y 800 kg), la diferencia entre las cargas mínima y máxima será menor de 1,37 kN (140 kg)
 - ✓ Para las cargas superiores a 7,85 kN (800 kg) se considera que no tienen importancia las variaciones en las lecturas individuales.
- e) En el caso de que las tres primeras determinaciones de la carga $C_{2,54}$, aplicada o corregida, no cumpla con los criterios de aceptación indicados mencionados anteriormente , se efectuaran otras tres penetraciones en la misma área descubierta, a no menos de 15 cm de los sitios donde se efectuaron las penetraciones anteriores, tomándose en cuenta los resultados de las seis determinaciones para el cálculo del Valor Soporte de California (CBR) en el lugar, en el inciso f
- f) El Valor Soporte California (CBR) en el lugar, se calcula, con aproximación a la unidad, mediante la siguiente expresión:

$$CBR = \frac{100C'_{2,54}}{13,97}$$

Donde:

CBR = Valor Soporte California en el lugar de la capa estudiada, expresando como un porcentaje de la carga de referencia de 13,97 kN (1425 kg)

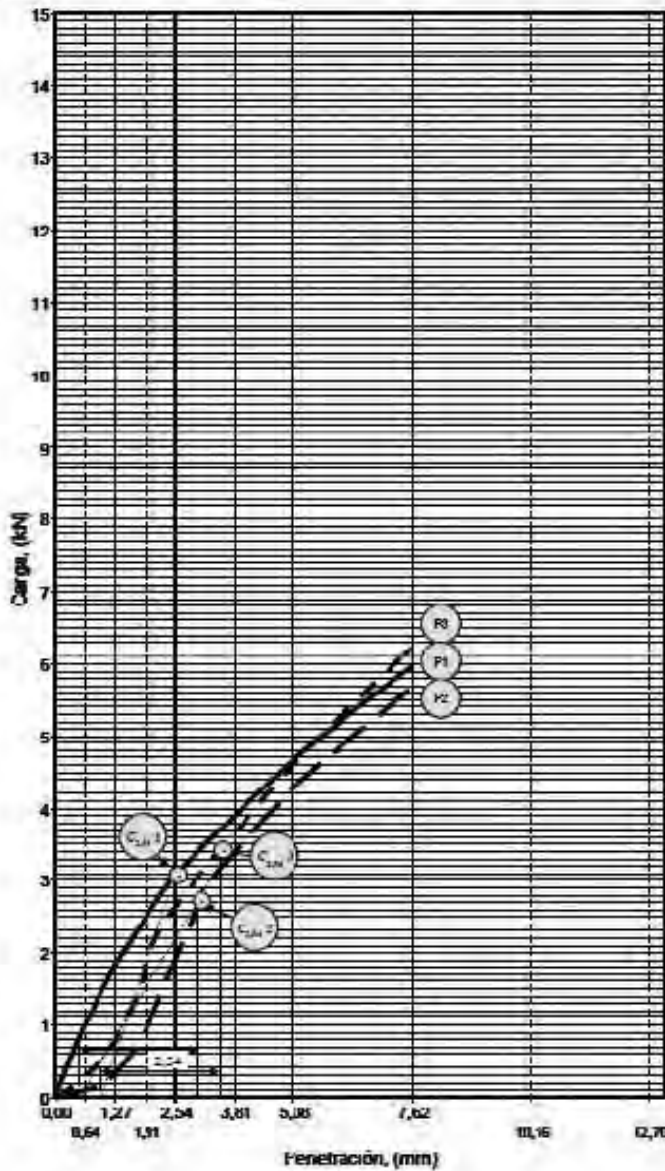
$C'_{2,54}$ = Promedio de las tres determinaciones de la carga $C_{2,54}$ (kN) para el caso mencionado en el inciso e) , $C_{2,54}$ será el promedio de las seis determinaciones de la carga $C_{2,54}$.

Todos los cálculos y resultados de esta prueba de Valor Soporte de California (CBR) en el lugar se reportaran en un formato.

Figura 10 Formato Ilustrativo Hoja de registro y cálculo del Valor Soporte California (CBR)

PRUEBA DE VALOR SOPORTE DE CALIFORNIA EN EL LUGAR

ORINA: _____	FECHA: _____
LOCALIZACIÓN: _____	PRUEBA No.: _____
TRAMO: _____	OPERADOR: _____
SUBTRAMO: _____	CALCULÓ: _____
ORIGEN: _____	
UBICACIÓN DE LA PRUEBA: En 27+271,30 a 7,30 m a la derecha del eje	
CAVA: Subrasante	
DESCRIPCIÓN: Arena arcillosa con 20% aproximadamente de grava (6C)	



Masa volumétrica seca (M_v) = 1 482 kg/m³

Contenido de agua (G) = 15,8 %

Grado de compactación (G_c) = 96 %

Penetración (mm)	Cargas de penetración (kN)					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
0,64						
1,27	1,84	3,32	0,74			
1,91						
2,54	3,07	1,88	8,68			
3,81	3,91	3,39	3,64			
5,08	4,67	4,66	4,64			
7,52	3,96	3,66	6,21			
10,15						
12,70						
C _{15,4}	3,07	8,78	3,41			
Promedio C _{15,4}	2,07					
CBR (%)	22					

$$CBR = \frac{100 \cdot C_{15,4}}{11,07}$$

OBSERVACIONES:

Fuente: M-MMP-1-12-13 Normatividad SCT

✓ Módulo de reacción (K)

La capacidad de respuesta estructural de la subrasante y de la sub-base, se determina mediante el módulo de reacción, k , que constituye uno de los principales parámetros de diseño de los pavimentos rígidos.

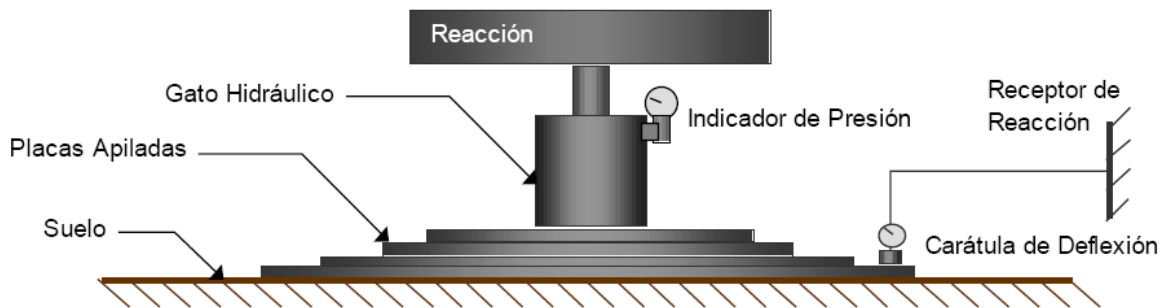
Teniendo en cuenta la elevada rigidez del concreto y el peso desarrollado por las losas del pavimento, los niveles de esfuerzo y deformaciones producidos en la subrasante son muy bajos, de manera que no se requiere un elevado valor de soporte en dicha capa, siendo más importante que dicho efecto de soporte sea uniforme, condición que además debe mantenerse a través del tiempo.

La resistencia de la subrasante, es considerada dentro del método por medio del Módulo de Reacción del Suelo K que se puede obtener directamente mediante la prueba de placa.

La prueba de placa in situ puede tener un costo muy elevado por lo que el Módulo de Reacción (K), se puede obtener también en el laboratorio, se prefieren estas por costos, aunque con frecuencia se usan las dos.

El módulo de reacción de suelo corresponde a la capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento. El valor del módulo de reacción (K) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D1196.

Figura 11 Esquema de la prueba de placa



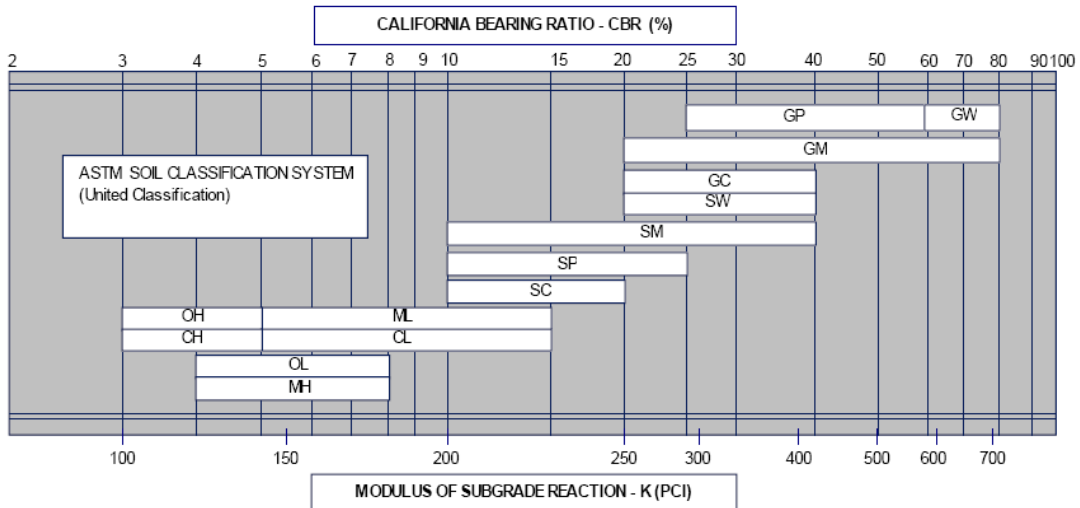
$$k \text{ (psi/in)} = \text{carga unitaria por placa} / \text{deflexión de la placa}$$

Fuente: Capítulo II. "Clasificación y diseños de pavimentos". Facultad de Ingeniería UNAM

ESTIMACIONES Y CORRELACIONES DE K.

Se han desarrollado algunos valores estimativos del módulo de reacción (K), en base a un gran número de muestras y estudios, en función a diferentes propiedades.

Figura 12 Correlación 1



Fuente: Capítulo II. "Clasificación y diseños de pavimentos". Facultad de Ingeniería UNAM

Figura 13 Correlación 2

Tipo de Suelo	SUCS	Densidad Seca lb/ft ³	CRB %	K * pci
Suelos Granulares				
Grava	GW, GP	125 a 140	60 a 80	300 a 450
Arena Gruesa	SW	110 a 130	35 a 60	300 a 400
Arena Fina	SP	105 a 120	20 a 40	200 a 400
Suelos de Material Granular con Alto Contenido de Finos				
Grava - Limosa	GM	130 a 145	15 a 25	150 a 300
Grava - Areno - Limosa			40 a 80	300 a 500
Arena - Limosa	SM	120 a 135	20 a 40	300 a 400
Arena - Limo - Gravosa			20 a 40	300 a 400
Grava - Arcillosa	GC	120 a 140	10 a 20	150 a 350
Grava - Areno - Arcillosa			20 a 40	200 a 450
Arena - Arcillosa	SC	105 a 130	10 a 20	150 a 350
Suelos de Material Fino **				
Limo		90 a 105	4 a 8	25 a 165
Limo - Arenoso	ML, OL	100 a 125	5 a 15	40 a 220
Limo - Gravoso			5 a 15	40 a 220
Limo Mal Graduado	MH	80 a 100	4 a 8	25 a 190
Arcilla Plástica	CL	100 a 125	5 a 15	25 a 255
Arcilla Medianamente Plástica	CL, OL	95 a 125	4 a 15	25 a 215
Arcilla Altamente Plástica	CH, OH	80 a 110	3 a 5	40 a 220

* estos rangos de K aplican para estratos homogéneos de suelo de por lo menos 3 metros de espesor. Si un estrato de suelo de menos de 3 metros existe sobre un suelo más blando, el valor de K deberá corresponder al del suelo blando inferior y se podrá considerar el incremento de K debido al estrato superior. Si por el contrario existiera un estrato de roca el valor de K deberá ser ajustado.

Fuente: Capítulo II. "Clasificación y diseños de pavimentos". Facultad de Ingeniería UNAM

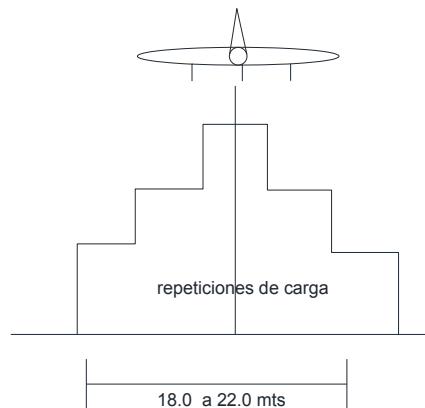
4 - Diferencias entre pavimentos de carreteras y de aeropuertos.

✓ Canalización de cargas

En las carreteras los reglamentos de tránsito estipulan que los camiones cargados circulan por la orilla derecha del pavimento estimándose que la rueda exterior se encuentra a 0.30m de la orilla, por efecto de la velocidad menor.

En los aeropuertos la canalización del tránsito se hace dentro de una franja de aproximadamente 18.0 a 22.0 mts en el centro de la pista.

Repeticiones de carga



✓ Intensidad de Carga

Los camiones más pesados que transitan en una carretera son del orden de 30 a 60 toneladas.

Suponiendo peso total 60,000 kg

Carga por rueda= $60000\text{kg} / 18 \text{ ruedas} = 3333 \text{ Kg/rueda}$

Para los aeropuertos las cargas son más grandes pueden llegar a ser de 340 a 380 toneladas aunque menos frecuentes.

Para el mismo peso total:

Carga por rueda= $60000 \text{ Kg} * 5\% = 3000 \text{ Kg}$ Tren de proa

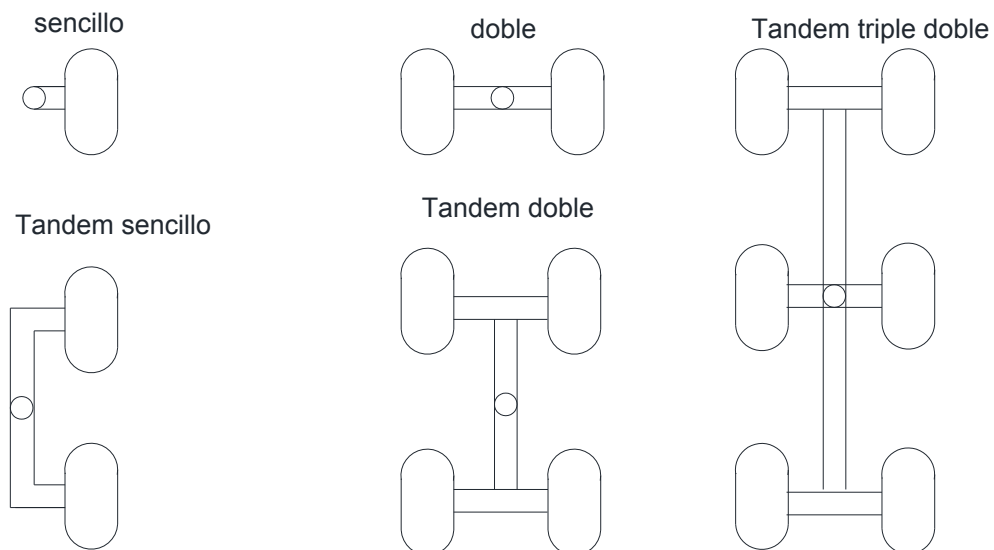
Carga por rueda= $60000 \text{ Kg} * 95\% = 57000 \text{ Kg}$ Trenes Principal

Por lo tanto la carga por rueda = $57000 / 4 = 14250 \text{ Kg/rueda}$. Para tren doble

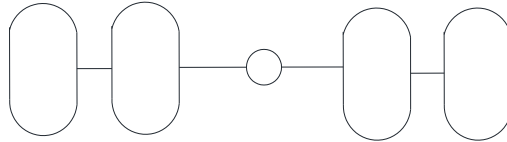
Una de las variables más significativas en el diseño estructural de las pistas, calles de rodaje y las plataformas, es el número de operaciones, dentro de lo cual se deben recabar los siguientes datos:

- Peso total de las aeronaves: para fines de diseño de espesores y para determinar el tipo de pavimento
- Carga por rueda: para el cálculo de la carga aplicada por las ruedas de los trenes principales de aterrizaje, se supone del 95% de la carga total del avión se aplica de forma uniforme sobre los trenes principales y el 5% restante en el tren de proa.
- Número y arreglo de las ruedas: la importancia de conocer el número de ruedas es para poder estudiar la magnitud de los esfuerzos en la estructura vial y la manera en que se distribuyen

Existen aviones con el tren de aterrizaje en sencillo, doble, doble tándem, etc.



Doble -doble



✓ **Presión de Inflado de Las Llantas:**

En las carreteras la presión de inflado de las llantas varia de 1.69 kg/cm² a 5.62 kg/cm² (24 a 80 lb/pulg²).

Mientras que en aeropuertos estas presiones son del orden de 14.06 kg/cm² hasta 28.12 kg/cm² (200 a 400 lb/pulg²).

✓ **Frecuencia del Tránsito**

La frecuencia del tránsito en carreteras se toma en base al TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual) para el que se vaya a diseñar el pavimento.

Clasificación de carreteras según el TDPA

a) Tipo A

- 1) A2 para un TDPA de 3000 a 5000 vehículos.
- 2) A4 para un TDPA de 5000 a 20000 vehículos

b) Tipo B para un TDPA de 1500 a 3000 vehículos

c) Tipo C para un TDPA de 500 a 1500 vehículos

d) Tipo D para un TDPA de 100 a 500 Vehículos

e) Tipo E para un TDPA de hasta 100 vehículos

En un aeropuerto es muy diferente, por medidas de control de tránsito aéreo en ningún momento debe de haber más de un avión en la pista por lo que en aterrizajes 2 aviones pueden no tener una distancia entre ellos menor de 4 - 6 millas náuticas (9,269 metros), que es la distancia suficiente para que le dé tiempo al avión de adelante para

aterrizar de manera segura y desalojar la pista para permitirle el acceso al avión subsecuente y al mismo tiempo evitar los efectos de la turbulencia de las puntas de las alas del avión precedente.

Operaciones aéreas 409,955 Dato estadístico año 2014 Fuente: Dirección General de Aeronáutica Civil

✓ **Condiciones de Rugosidad**

Uno de los parámetros que debe cumplir un pavimento es el de brindar comodidad que para el caso de las carreteras comodidad = seguridad a los conductores, es por eso que un pavimento no debe presentar alteraciones en la rugosidad.

En aeropuertos la situación es diferente, el peso de los aviones es mucho mayor y si la pista tiene una rugosidad elevada, el avión puede sufrir alteraciones en su equipo electrónico, lecturas erróneas en los instrumentos e incomodidad para los pasajeros, por otro lado si el avión entra en resonancia su estructura (principalmente las alas) se someterían a esfuerzos no deseados además de producir impactos en el tren de aterrizaje principal.

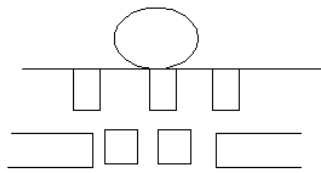
✓ **Acuaplaneo**

El efecto de acuaplaneo reduce la fricción entre el pavimento y las llantas.

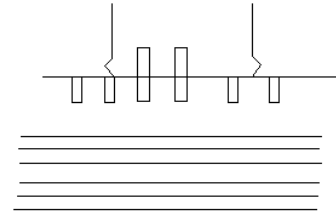
Tanto en carreteras como en aeropuertos es muy importante que la textura del pavimento provea un adecuado coeficiente de rozamiento.

Cuando el líquido contaminante ejerce sobre la huella de la llanta se generan fuerzas aerodinámicas y por consiguiente las llantas patinan teniendo cero esfuerzo de fricción ($w=0$)

El coeficiente del pavimento puede ser afectado por lluvia, por nieve, derrame de combustibles, aceites y por desgaste de la propia superficie del pavimento, para desalojar el líquido o contaminante se ponen canales en forma de ranuras. En el caso de las carreteras se hacen ranuras en dirección longitudinal en las zonas de curvas y de frenado, en los aeropuertos se hace en el sentido trasversal a partir de la zona de toque de ruedas de los trenes principales.



Aeropuertos



Carreteras

Condiciones de operación

En cualquier carretera es posible modificar la velocidad de tránsito de los vehículos para efectuar reparaciones, atender accidentes o efectuar trabajos de mantenimiento rutinario.

La velocidad de tránsito depende de las condiciones del pavimento.

En los aeropuertos no es posible considerar esta oportunidad, ya que la velocidad no puede modificarse; por lo que no es simple realizar trabajos sobre un pavimento de un aeropuerto que ya esté en operación.

Las condiciones del pavimento se rigen por la velocidad.

Los trabajos de mantenimiento o de reparación requieren de un cierre total de las pistas que requieran de dicho mantenimiento.

Una opción es otra pista no por demanda, si no por características estratégicas (pista de mantenimiento)

Calculo de la curva masa

En carreteras una curva masa compensada es un objetivo.

En aeropuertos la curva masa es una consecuencia.

5 - Descripción general de los diferentes métodos utilizados para el diseño

Existen varias metodologías para el diseño de los pavimentos de aeropuertos, pero en este trabajo solo se especificará el método de la FAA que se puede considerar como el más utilizado.

Aunque se definirá brevemente algunas de las metodologías utilizadas en diferentes países que se mencionaran a continuación:

PRACTICA DE CANADÁ:

Esta práctica se basa en el concepto de relación de sobrecarga, es un criterio de la carga impuesta por la aeronave con respecto a la resistencia nominal del pavimento.

Para el diseño de los pavimentos flexibles, la relación sobrecarga impuesta por la aeronave se determina calculando la resistencia del terreno, utilizando curvas de cálculo que determinan el espesor necesario para soportar la carga de la aeronave como función de la resistencia del terreno

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$S = (ESWL) (c_1^{10-c_2t})$$

Donde:

S= Resistencia del terreno de fundación en KN

ESWL= carga equivalente de rueda simple de la carga de una aeronave de cálculo KN

t= espesor granular equivalente del pavimento en cm

C1 y C2= factores en función del área de contacto de la ESWL

Las operaciones de las aeronaves se clasifican del siguiente modo:

Tabla 2 Clasificación operaciones de las aeronaves

Relación de sobrecarga	Clasificación de la utilización
Menor de 1,25	Sin limite
De 1,25 a 1,50	limitada
De 1,50 a 2,00	marginal
Más de 2,00	Solo en caso de emergencia

La aprobación de las operaciones clasificadas como limitadas o marginales incluye el riesgo de un ritmo acelerado de deterioro del pavimento y de una vida útil más corta. Este riesgo aumenta al aumentar el valor de la relación de sobrecarga y la frecuencia de las operaciones. En consecuencia, la decisión de aprobar esas operaciones depende de la disposición de las autoridades aeroportuarias para financiar medidas de reacondicionamiento de los pavimentos antes de lo que normalmente sería necesario. La práctica normal en los aeropuertos utilizados por Transport Canada es permitir las operaciones de aeronaves comprendidas en la clasificación de limitadas y marginales, salvo que se disponga lo contrario por la antigüedad y el estado del pavimento, o por restricciones presupuestarias.

Pavimentos Rígidos

Para el caso de los pavimentos rígidos la relación de sobrecarga se determina como la resistencia a la flexión impuesta sobre la losa por la aeronave, se basa en la limitación a 2.75 MPa de tensión a la flexión, la cual se presenta en la parte interior de la losa directamente debajo del centro de una rueda del tren de aterrizaje del avión, es importante mencionar que los cálculos de tensión, se realizan de acuerdo con el análisis de Westergaard para las condiciones interiores de carga de la losa, a continuación se mencionaran los pasos a seguir para efectuar el diseño de este tipo de pavimento.

- a) Determinación del coeficiente de carga ALR para el avión analizado en base a estudios y proyecciones de tránsito.
- b) Determinación del espesor mínimo requerido para la protección parcial de las heladas.
- c) Estimación de un espesor de losa de concreto como primera iteración
- d) Determinación del espesor de la subbase requerido mediante la resta del espesor de la losa, al espesor total del pavimento estimado.
- e) Determinación del módulo de resistencia del material que se considera para la subbase del pavimento, en función del tipo de material seleccionado y del espesor total estimado en la primera iteración.
- f) Determinación del espesor de losa de concreto para el módulo de resistencia estimado en el paso e),
- g) utilizando el espesor de losa determinado en f) como una nueva iteración y repitiendo los pasos c) a f), igualar los espesores de losa determinados en tales incisos.

Es importante mencionar que al igual que en los pavimentos flexibles, el espesor de diseño será el de mayores dimensiones al compararlo con el espesor mínimo requerido para la protección parcial de las heladas.

PRACTICA DE FRANCIA

Esta práctica se basa en la aplicación de dos métodos de diseño, el método de cálculo optimizado y el método de cálculo general.

Pavimentos flexibles

El método de cálculo optimizado permite calcular un pavimento teniendo en cuenta varios tipos de aviones. Este método tiene la ventaja de que los movimientos reales de cada carga real que se considera puede convertirse en movimientos equivalentes de la misma carga de referencia. En consecuencia, es posible comparar el efecto relativo de los diferentes aviones por lo tanto, en la práctica el método de cálculo optimizado se utiliza cuando hay que considerar diferentes tipos de aviones que producen aproximadamente las mismas tensiones en el pavimento y cuando se dispone de pronósticos de tránsito suficientemente confiables y precisos para la vida útil prevista del mismo.

A continuación se mencionaran los principales datos que se requieren para el diseño del espesor de este tipo de pavimentos:

- ✓ Pronósticos de tránsito
- ✓ Valor relativo de soporte del terreno que se empleara como subrasante

El cálculo consiste en aplicar un “método iterativo” que permite verificar la integridad estructural bajo el tránsito previsto, con respecto a los valores de espesores sucesivos:

Etapas 1

Se establece un espesor inicial

Etapas 2

Se calcula el tránsito equivalente real previsto, igual a un número de movimientos equivalentes de la carga inicial admisible de la estructura que se ensaya

Etapa 3

Las etapas 1y 2 se repiten con un espesor menor o mayor, si el resultado fuera inferior o superior a 36500 movimientos equivalentes, respectivamente, hasta encontrar un espesor en que el transito equivalente sea igual o lo más cercano posible a los 36500 movimientos equivalentes.

De este modo se puede calcular para cada avión considerado como el más crítico, el espesor requerido para su peso máximo teniendo en cuenta el número de movimientos reales con este peso y suponiendo que será el único avión que utilice el pavimento que se estudia.

Es importante mencionar que el espesor de cada capa se obtendrá de la misma forma, además de que su espesor real será obtenido al dividir el espesor estimado por su factor de equivalencia, situación que se profundiza con mayor detalle en el siguiente método.

Método de Cálculo General

Este método permite calcular un pavimento en función de una carga de referencia que el pavimento debe soportar. En la práctica este método de diseño se utiliza principalmente al nivel de los estudios preliminares o a falta de datos precisos. La carga de referencia se evalúa en términos de la utilización prevista del aeropuerto, de las características de los aviones en servicio o etapa de planificación y del papel concreto que ha desempeñar el pavimento en cuestión.

El proyecto de diseño de pavimentos por este método se basa en las condiciones normales de tránsito, o sea 10 movimientos por día a lo largo de 10 años con la carga nominal. Sin embargo cuando el tránsito real sea evidentemente diferente de esta hipótesis básica, es posible aplicar un factor de corrección para tener en cuenta la intensidad de transito real.

A continuación se mencionaran los principales datos requeridos para el diseño del espesor de pavimento:

- ✓ Carga normal de cálculo
- ✓ Valor relativo soporte del terreno a emplear como subrasante

La forma de diseño se lleva a cabo, por medio de la implementación de graficas específicas para cierto tipo de tren de aterrizaje o bien para un avión en especial.

A partir de la utilización de tales gráficas, es posible calcular el espesor equivalente para el VRS (Valor relativo de soporte) del material, de esta forma es posible obtener el espesor total del pavimento sumando los espesores equivalentes de cada capa considerada.

Pavimentos Rígidos

Para el diseño de los pavimentos rígidos, la práctica de Francia contempla los mismos métodos analizados en los pavimentos flexibles, con algunas consideraciones que se mencionaran a continuación:

El criterio de cálculo para pavimentos rígidos no es la presión máxima a nivel del terreno natural o la subrasante, sino el momento admisible de flexión de la losa de concreto.

Método de Cálculo Optimizado

Los principios del método son los mismos que para los pavimentos flexibles, simplemente se debe contemplar como datos necesarios para el diseño, el módulo de reacción de terreno K sobre el cual se soportará la losa de concreto y la tensión admisible de la misma. El procedimiento de cálculo es idéntico al visto en el caso de los pavimentos flexibles.

Método de Cálculo General

El principio es igual al implementado en los pavimentos flexibles de esta práctica, simplemente se considera en el diseño el módulo de reacción de terreno K sobre el cual se apoya la losa de concreto, así como la tensión admisible de la misma. Básicamente el diseño se efectúa a través de la implementación de gráficas en las que se contempla el tipo de tren de aterrizaje, las cargas estimadas y los módulos de reacción de terreno sobre el cual se apoyan las losas de concreto.

El espesor de la subbase se estima como mínimo con un espesor de 15cm, con lo que se garantiza un uso eficaz del material a utilizar, de esta forma el espesor total de diseño será igual a la suma del espesor de la subbase más el espesor de la losa de concreto para el avión analizado.

PRACTICA DEL REINO UNIDO

Esta práctica se basa en la consideración del uso limitado de un avión de diseño, tomando en cuenta la carga resultante de la interacción del conjunto de ruedas de aterrizaje con el pavimento.

Considera dos tipos de pavimentos el rígido y el flexible que se pueden adoptar dentro de la infraestructura aeroportuaria.

Pavimentos Rígidos:

Las consideraciones que se contemplan son adoptar un modelo simple para la estratigrafía del pavimento, es decir dos capas de soporte losa de concreto y subbase, cuya finalidad es transmitir las cargas generadas por el peso de los aviones, hasta el terreno natural o subrasante. La forma de establecer los espesores de diseño se realiza mediante el análisis del modelo adoptado según la teoría de Westergaard, en donde se tiene muy en cuenta el efecto de los conjuntos de ruedas adyacentes del tren de aterrizaje, hasta tres veces el radio de la rigidez relativa. Cabe mencionar que este análisis es esencial debido a que en la actualidad la flota de aeronaves han cambiado sus dimensiones, pesos y disposiciones de los trenes de aterrizaje, situación por la cual estos estudios deben realizarse más a detalle.

Pavimentos Flexibles:

Para pavimentos flexibles, se sigue un modelo semejante al de los pavimentos rígidos, con la variante de que se consideran tres capas dentro de la estratigrafía del pavimento, capa de concreto asfáltico, base y subbase, las cuales se apoyan sobre la subrasante o el terreno natural.

Dentro del diseño de este tipo de pavimentos se implementa el uso VRS (CBR), preparado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos de América. Este método comprende los factores de deflexión de Boussinesq y tiene en cuenta la interacción entre los conjuntos de ruedas del tren de aterrizaje adyacente, hasta una distancia de 20 radios. Los problemas técnicos de cálculo y de evaluación se resuelven utilizando factores de equivalencia para relacionar los materiales y los espesores de las capas con los modelos teóricos a base de los cuales se evalúan las profundidades de construcción de referencia para las aeronaves.

La práctica del Reino Unido consiste en seguir el método de notificación ACN/PCN de la OACI, para los pavimentos de las aeronaves. La aeronave crítica se identifica como aquella que impone una severidad de carga próxima a la máxima permitida en un pavimento dado y cada autoridad aeroportuaria decide sobre el PCN que ha de publicarse para el pavimento en cuestión.

PRACTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS

Esta práctica se basa en la aplicación de los nuevos métodos establecidos en 1978 por la Administración Federal de Aviación FAA, dichas consideraciones se ven enfocadas a la adopción del método del índice de resistencia de CBR, California Bearing Ratio (valor relativo soporte) para el cálculo de pavimentos flexibles y para el caso de pavimentos rígidos, establecer la hipótesis de carga sobre los bordes de las losas de concreto y el sistema de clasificación de terrenos unificados. Además permite determinar el avión de diseño dentro de una flota

La Administración Federal de Aviación FAA, ha adoptado el método de calcular y notificar la resistencia de los pavimentos de los aeropuertos en función al peso bruto de la aeronave, para cada tipo de tren de aterrizaje.

La comparación entre la resistencia del pavimento, notificada como peso bruto se refiere a aeronaves equipadas con trenes de aterrizaje de ruedas simples, ruedas dobles y ruedas dobles en tándem.

Para el análisis de la resistencia del pavimento existente la FAA considera debe comprender las siguientes investigaciones básicas:

- ✓ Examen detallado del estado de los pavimentos existentes, donde se vea el comportamiento de estos bajo las cargas provocadas del tránsito.
- ✓ La investigación del suelo, deberá revelar las variaciones importantes en su estructura, cambios de contenido de húmeda, capas que retengan el agua, nivel de aguas freáticas.
- ✓ Deben efectuarse ensayos adecuados, tanto en el terreno como en laboratorio, para evaluar la cimentación, así como los componentes del pavimento.
- ✓ Estudio de las características de drenaje del terreno, para comprobar si han de tomarse medidas correctivas antes de emprender cualquier trabajo de reparación.
- ✓ Deberá emprenderse un análisis de los antecedentes del tránsito en el aeropuerto, referente al peso de las aeronaves, al número de operaciones asociadas con la densidad del tránsito en la zona que se estudia, relacionándolo debidamente con la actuación del pavimento.
- ✓ Deberá evaluarse la calidad de los materiales del pavimento, de los métodos y procedimientos de construcción, para determinar el grado de conformidad con las normas y especificaciones

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

El sistema unificado se basa en resultados de una investigación en la que se compararon diferentes métodos de clasificación de suelos, este estudio dió como conclusión que el sistema unificado es superior para revelar las propiedades de los materiales que afectan el comportamiento del pavimento de los aeropuertos.

El sistema unificado clasifica los terrenos primeramente a base de la granulometría y establece posteriormente subgrupos de terrenos sobre las constantes de plasticidad.

A continuación se presenta la clasificación de terrenos, según el sistema unificado de clasificación de los suelos.

Tabla 3 sistema unificado de clasificación de los suelos.

DIVISIONES PRINCIPALES			símbolos de grupos
Suelo de grano grueso: más del 50% retenido en la malla Núm. 200	Grava 50% o más de la fracción gruesa retenida en la malla Núm. 4	Grava limpia	GW GP
		Grava con finos	GM GC
	Arena menos del 50% de la fracción gruesa retenida en la malla Núm. 4	Arena limpia	SW SP
		Arena con finos	SM SC
Suelo de grano fino: más del 50% retenido en la malla Núm. 200	Limos y arcillas Limite liquido 50% o menos		ML
			CL
			OL
	Limos y arcillas Limite liquido Superior al 50%		MH
			CH
			OH
Suelos muy orgánicos			PT

A continuación se indica la nomenclatura de la tabla 1:

GW= gravas homogéneas y mezclas gravas – arenas, con poco o ningún fino.

GP= grava no homogénea y mezclas grava – arena, con poco o ningún fino.

GM= arcilla limosa, mezclas grava –arena-limo.

GC= grava arcillosa, mezclas grava-arena-arcilla.

SW= arenas homogénea y arenas con grava, poco o ningún fino.

SP= arenas no homogénea y arenas con grava, poco o ningún fino.

SM= arena limosa, mezclas arena-lino.

SC= arena arcillosa, mezclas arena-arcilla.

ML= limo inorgánico, arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa o arcillosa.

CL= arcilla inorgánica de plasticidad baja a mediana, arcilla con grava, arcilla limosa, arcilla pobre.

OL= limo orgánico y arcilla limosa orgánica de baja plasticidad.

MH= limo inorgánico, arena fina micácea o diatomácea o limo, limo plástico.

CH= arcilla inorgánica de alta plasticidad, arcilla grasa.

OH= arcilla orgánica de plasticidad media a alta.

PT= turba, barro y otros suelos muy orgánicos.

Para la determinación de los requisitos de espesores, se consideran un gran número de variables interrelacionadas que con frecuencia son difícil de cuantificar, por tal motivo la determinación de espesores, debe basarse en análisis teóricos de distribución de cargas, estudios sobre las condiciones de operación y volúmenes de tránsito.

El diseño de los pavimentos flexibles se basa en el método de evaluación CBR y es básicamente empíricos. Sin embargo, una gran parte de la investigación se ha desarrollado con el método y con las correlaciones confiables.

Las curvas que se utilizan para el diseño, se basan en la evaluación del California Bearing Ratio (CBR). Estas proporcionan el total requerido del espesor de pavimento flexible (superficie de rodamiento, base y subbase) necesarios para soportar un peso determinado de las aeronaves.

En aeropuertos las curvas se construyen para el peso máximo permisible de la aeronave asumiendo que el 95 % del peso es soportado por los trenes principales y el 5% restante es soportado por el tren de proa.

El tipo de tren de aterrizaje y su configuración determinan de qué modo se distribuye el peso de la aeronave en el pavimento y establecen la respuesta del pavimento a las cargas producidas por la aeronave.

Debido a los diferentes tipos y modelos de aviones es necesario determinar el tipo de tren de aterrizaje, lo cual están establecidos las siguientes configuraciones más comunes de trenes de aterrizaje:

- ✓ Rueda simple
- ✓ Rueda doble
- ✓ Tandem sencillo
- ✓ Tren en doble tandem
- ✓ Triple tandem doble

Establecidos los tipos de configuración de tren de aterrizaje, se debe disponer de pronósticos de los despegues estimados anuales por tipo de aeronave. Para poder determinar los volúmenes de tránsito se contemplará el avión que efectuará el mayor número de operaciones, su peso de despegue y su configuración de los trenes principales y en base a ello, se selecciona el tipo de aeronave de diseño.

La aeronave de diseño, no necesariamente es la de mayor peso de despegue, sino es aquella que solicite el mayor espesor de pavimento total. Una vez determinada la aeronave de diseño, se debe calcular las salidas anuales equivalentes de todas las aeronaves operativas, en función a dicha aeronave crítica.

Determinación de las salidas anuales equivalentes de la aeronave de cálculo

El pronóstico de tránsito dentro del horizonte de planeación, considerando 20 años como vida útil del pavimento, es una mezcla de diferentes aeronaves que poseen diferentes tipos de trenes de aterrizaje y diferentes pesos, hay que tener en cuenta los efectos de todo el tránsito en lo que respecta a la aeronave establecida de diseño. En primer lugar deben convertirse todos los tipos de aeronaves al mismo tipo de tren de aterrizaje que la aeronave de diseño, se deberán utilizar los siguientes factores de conversión:

Tabla 4 factores de conversión trenes de aterrizaje

TIPO DE TREN	CONVERTIR A	FACTOR
Rueda simple	Ruedas dobles	0.8
Rueda simple	Tandem	0.5
Ruedas dobles	Tandem	0.6
Tandem doble	Tandem	1.0
Tandem	Rueda simple	2.0
Tandem	Ruedas dobles	1.7
Ruedas dobles	Rueda simple	1.3
Tandem doble	Ruedas dobles	1.7

Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation.

En segundo lugar, una vez que se han agrupado las aeronaves en la misma configuración de tren aterrizaje, la conversión a salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño, se determina según la ecuación siguiente:

$$\log R_1 = \log R_2 * \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

R_1 = Salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño.

R_2 = Salidas anuales de la aeronave en estudio expresadas en el tren de aterrizaje de la aeronave de diseño.

W_1 = Carga sobre la rueda de la aeronave de diseño.

W_2 = Carga sobre la rueda de la aeronave en cuestión

Para este cálculo se supone que el 95% del peso de la aeronave ha de ser soportado por los trenes de aterrizaje principales. En este cálculo las aeronaves de fuselaje ancho requieren una atención especial. Lo cual se lleva a cabo tratando cada fuselaje ancho como una aeronave con tándem doble de cuatro ruedas, y peso de despegue de 300,000 lb (136,100 kg), al calcular las salidas anuales equivalentes.

En caso de contar con una intensidad de operaciones superior a 25,000 despegues anuales que se indican en las curvas de cálculo, se requerirá un espesor mayor para recibir ese número de despegues, lo cual se debe implementar una corrección en el espesor de diseño.

Los valores mencionados en la tabla 6 que se encuentra a continuación, se basan en extrapolaciones de datos de investigaciones y de observaciones de pavimentos en servicio. Suponiendo una relación logarítmica entre el porcentaje de espesor y las salidas.

Tabla 5 espesor del pavimento para altos niveles de salida, expresado como % del espesor necesario para 25000 salidas

Nivel anual de salidas	% de espesor de 25000 salidas
50000	104
100000	108
150000	110
200000	112

Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation

El tránsito de las aeronaves se distribuye normalmente sobre un rango lateral en la superficie del pavimento durante las operaciones. Además, durante cierta porción de una operación en la pista de aterrizaje, las propiedades aerodinámicas de la aeronave disminuyen al actuar sobre el pavimento.¹ Por lo tanto la FAA permite que el espesor

¹ Este efecto que es real la FAA no lo incluye por problemas constructivos. La reducción del pavimento en las orillas de la pista se debe a la canalización del tránsito. En las calles de rodaje de salida se debe al peso menor.

del pavimento se modifique en diferentes superficies, definiéndose así dos zonas que son: zonas críticas y zonas no críticas.

Las zonas críticas comprenden la plataforma, cabecera de pista, faja central de pista y calles de rodaje de entrada, en ellas no se permite ninguna reducción en el espesor del pavimento. En las zonas no críticas, formadas por las calles de rodaje de salida y orillas de pistas, si se permite una reducción en la carpeta y en la capa base de 0.9h y 0.7h respectivamente, pero el espesor total del pavimento se mantiene constante en flexibles.

El espesor mínimo de la carpeta asfáltica en las zonas críticas es de 4", en tanto que en las zonas no críticas es de 3".

Para el uso de las curvas de pavimentos flexibles, se requiere un valor de CBR para la subrasante, un valor de CBR para la subbase, tipo de tren de aterrizaje, peso de la aeronave de diseño y el número de salidas anuales equivalentes.

El espesor de cada una de las capa, se determinara a través de monogramas especiales para cada tipo de configuración de tren de aterrizaje. A continuación se observa un monograma representativo para el diseño de pavimentos flexibles.

Figura 14 Curvas de cálculo de pavimentos flexibles para áreas críticas, tren de rueda simple

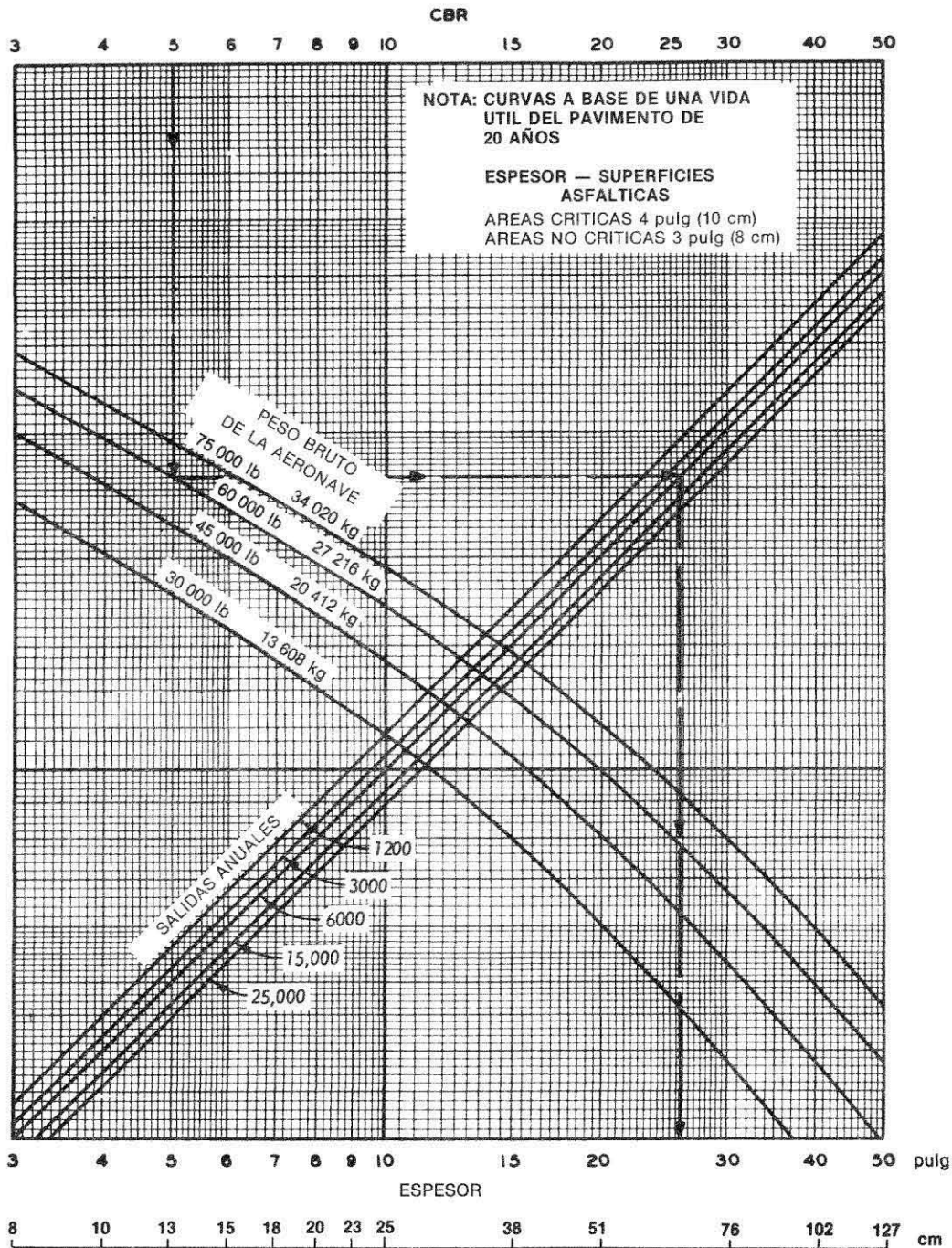


Figura 4-36. Curvas de cálculo de pavimentos flexibles para áreas críticas, tren de rueda simple

Calculo de pavimentos Rígidos

Al igual que en los pavimentos flexibles se han preparado curvas de diseño para los pavimentos rígidos. Estas curvas se basan en una condición de carga al borde de una junta en que la carga es tangente a la junta.

El uso de estas curvas requiere de los siguientes parámetros de entrada:

- ✓ Resistencia a la tensión por flexión del concreto
- ✓ Módulo de reacción de la subrasante y de la sub-base
- ✓ Peso de la aeronave
- ✓ Salidas anuales equivalentes
- ✓ Espesor de la sub-base

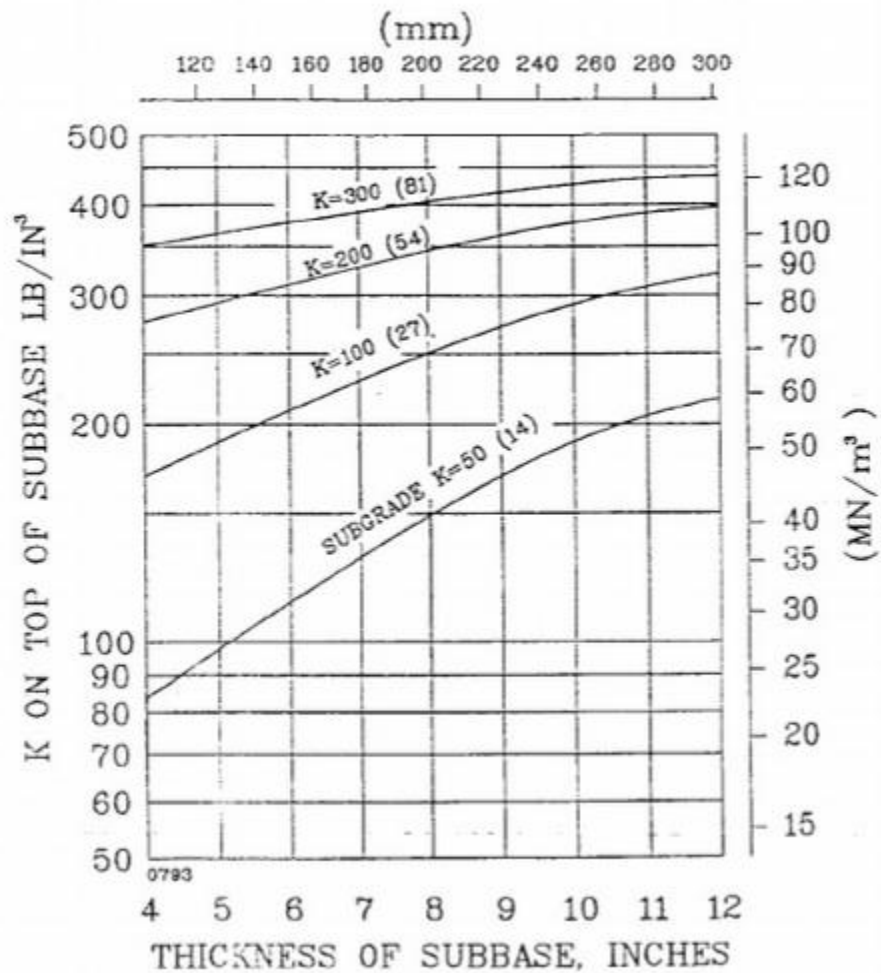
Estas curvas de diseño solo proporcionan el espesor de la losa de concreto, los espesores de las demás capas se determinan por separado y el espesor total del pavimento es la suma de dichas capas.

A continuación se menciona acerca de los factores a tomar en cuenta en los pavimentos rígidos.

- ✓ **Resistencia a la tensión por flexión del concreto:** el espesor requerido de concreto está relacionado con la resistencia del mismo. Esta resistencia se evalúa por el método de resistencia a la flexión, ya que el trabajo primario de una losa de concreto es a la flexión, este se determina por el método de ensayo de la norma ASTM C-78. Normalmente se utiliza para el cálculo una resistencia a la flexión de 90 días.
- ✓ **Módulo de reacción:** El valor K se considera como constante elásticas del material que soporta el pavimento rígido y una indicación del valor de resistencia del material de apoyo, su determinación es en base a suposiciones de un cierto espesor estimado (mínimo 4 pulgadas) y a resultados de laboratorio del material de subrasante ($K_{\text{subrasante}}$).

La figura 11 nos permite determinar el módulo de reacción de la sub-base en función del espesor de la sub-base y de la K de la subrasante para pavimentos rígidos

Figura 15 Cálculo de los espesores de sub-base

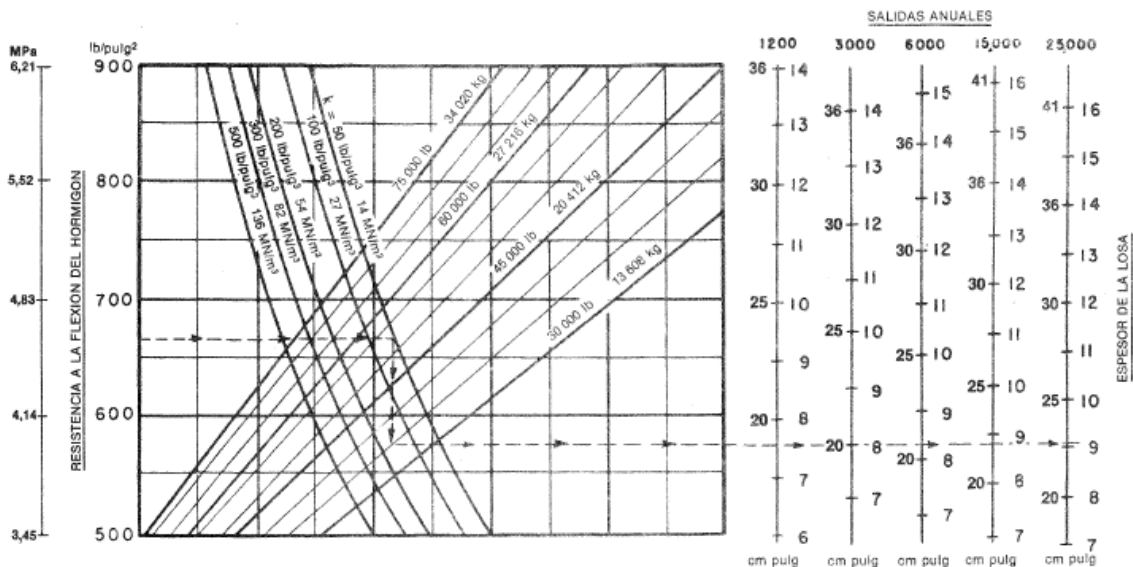


- ✓ **Peso de la aeronave:** este se indica en cada curva de diseño, las curvas de diseño se agrupan de acuerdo al tipo de tren de aterrizaje.
- ✓ **Salidas anuales equivalentes:** debido a que las diferentes flotas de aeronaves están conformadas por diferentes tipos de trenes de aterrizaje y diferentes pesos, se deberán convertir todas las aeronaves al mismo tipo de tren de aterrizaje que la aeronave de diseño. Utilizando los factores visto anteriormente en el cálculo de los pavimentos flexibles.

Al igual que en los pavimentos flexibles, se tienen zonas críticas y no críticas dentro del diseño de los pavimentos, las zonas críticas no tienen factor de reducción, en tanto que en las zonas no críticas se usa un factor de reducción para el espesor de la losa de 0.9 y 0.7.

A continuación se observa un monograma representativo para el diseño de pavimentos rígidos:

Figura 16 Curvas de cálculo de pavimento rígido tren de rueda simple



6 - Ejemplo de proyecto aplicando el método de la FAA

Diseño de Pavimento Flexible

Tipo de Avión	Tipo de Tren	Despegues estimados anuales	Peso de despegue (Kg)
727-100	Doble	7500	60.500
707-320	Doble Tándem	1300	148300
737-200	Doble	1800	51000
*747-100	Doble Tándem	950	346300

* Avión de fuselaje ancho

Avión de diseño: 727-100

CBR Subrasante= 7

Sub-base= 18

Base \geq 80 Por requisito del método

Se requieren base y sub-base estabilizadas

Considerar como factores:

Para la Base= 1.3

Para la Sub- base= 1.7

En el caso del ejemplo de aplicación el avión de diseño es el 727-100, este tiene un tipo de tren con ruedas dobles, todos los demás aeronaves deberán convertirse a este mismo tipo de tren, el factor a utilizar es el que se muestra en la siguiente tabla:

TIPO DE TREN	CONVERTIR A	FACTOR
Doble Tándem	Doble	1.7

Para el cálculo de la carga por rueda, se considera que el 5% del peso total es soportado por el tren de proa y el 95% los trenes principales, dividido entre el número de ruedas.

Para determinar las salidas anuales equivalentes, se utiliza la siguiente formula.

$$\log R_1 = \log R_2 * \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

R_1 = Salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño.

R_2 = Salidas anuales expresadas en el tren de aterrizaje de la aeronave de diseño.

W_1 = Carga sobre la rueda de la aeronave de diseño.

W_2 = carga sobre la rueda de la aeronave en cuestión

Cálculos R_1 :

$$\log R_1 = \log(2210) * \left(\frac{17610}{14368} \right)^{\frac{1}{2}} = 5041$$

707-320 Doble Tándem

$$\log R_1 = \log(1800) * \left(\frac{12112}{14368}\right)^{1/2} = 974$$

737-200 Doble

$$\log R_1 = \log(1615) * \left(\frac{16173}{14368}\right)^{1/2} = 2533$$

747-100 Doble Tándem

Tipo de Avión	Tipo de Tren	Despegues estimados anuales	Peso de despegue (Kg)	Despegues convertidos al tren del avión de diseño R ₂	Carga por Rueda	R ₁
727-100	Doble	7500	60.500	7500	60.500*0.95/4=14368	7500
707-320	Doble Tándem	1300	148300	1300*1.7=2210	148300*0.95/8=17610	5041
737-200	Doble	1800	51000	1800	51000*0.95/4=12112	974
*747-100	Doble Tándem	950	346300	950*1.7=1615	136200*0.95/8=16173	2533

Σ 16048

* 747-100 es un avión de fuselaje ancho, el método considera una atención especial para este tipo de aviones, se trata cada avión de fuselaje ancho como una aeronave con tándem de cuatro ruedas por lo que se toma el peso de 136200

La sumatoria de R₁ nos da =16048 que serían las salidas anuales equivalentes del avión de diseño

Para el diseño del pavimento flexible tomamos los siguientes datos supuestos:

CBR:

Sub-rasante = 7

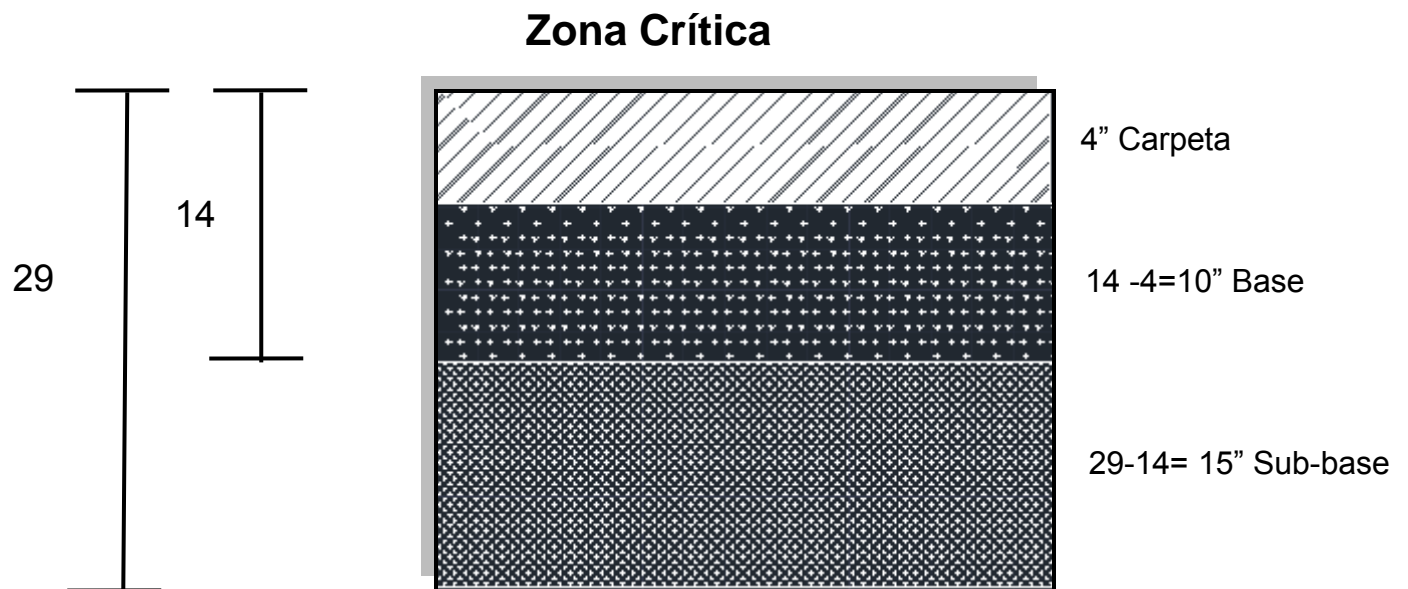
Sub-base = 18

Base > 80

Peso 727-100 Avión de diseño= 60500 kg = 133259 lb

Para determinar el espesor total se entró a la gráfica del Anexo A que se encuentra en la página 73 y subsecuente, con el CBR de la Sub-rasante =7, con el peso del avión de diseño en lb =133259lb y las salidas anuales equivalentes= 16048

Posteriormente para determinar el espesor de la carpeta más la base se vuelve a repetir el procedimiento anterior en la gráfica del Anexo A, solamente que ahora se toma el CBR de la sub-base=18.



En los monogramas correspondiente a pavimento flexible con tren doble, que lo podemos ver en el anexo A pagina 73 y subsecuente, se especifica que la carpeta en zonas críticas es como mínimo de 4 pulgadas.

El Espesor de la base se obtiene de restar el dato del espesor de la carpeta y la base que son los 14" menos el valor de la carpeta que son los 4"

Y por último se obtiene el valor de la sub-base haciendo la diferencia entre el espesor total del pavimento (29") y el espesor de la carpeta y la base (14")

Zona no Crítica

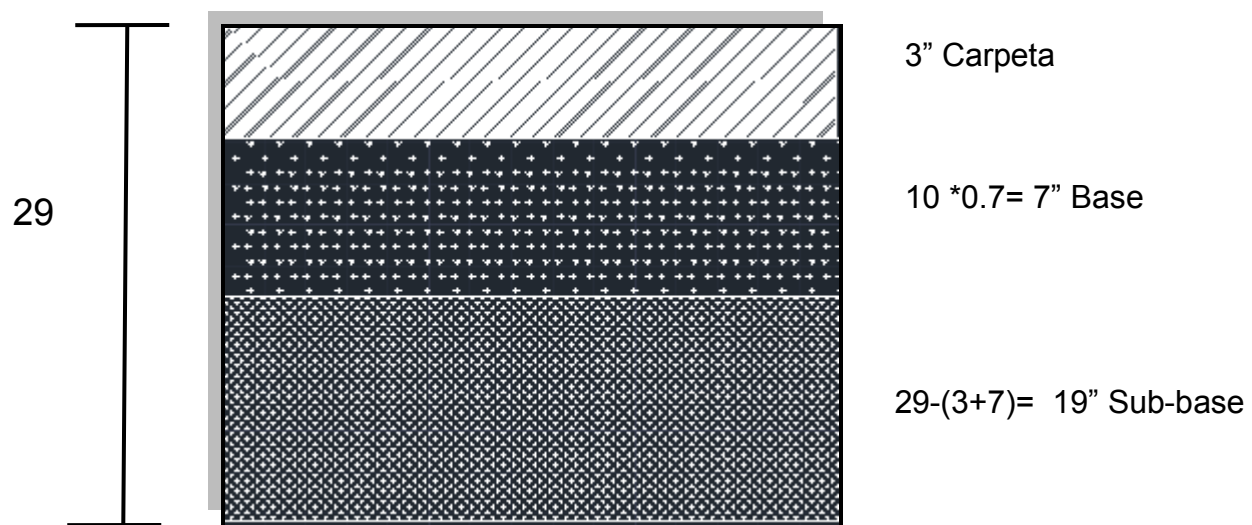
Para el cálculo de las secciones no críticas se debe considerar los siguientes factores que se aplican a la base sin modificar el espesor total.

Orilla de pista = 0.7

Rodaje de salida = 0.9

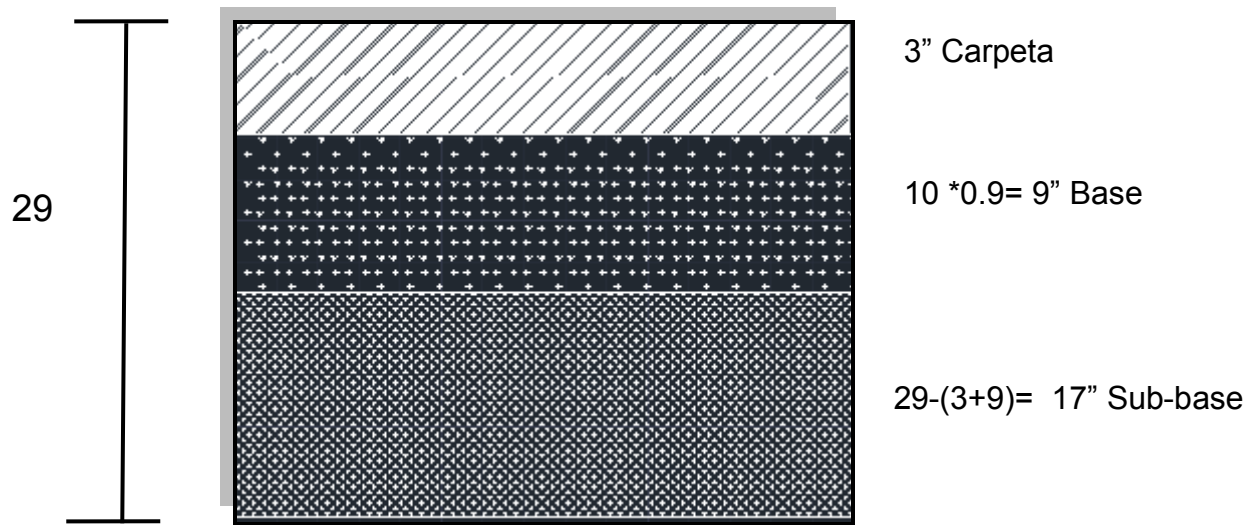
Para zonas no críticas se especifica como mínimo 3" para la carpeta

Orilla de pista



* El espesor total no se modifica

Rodaje de Salida

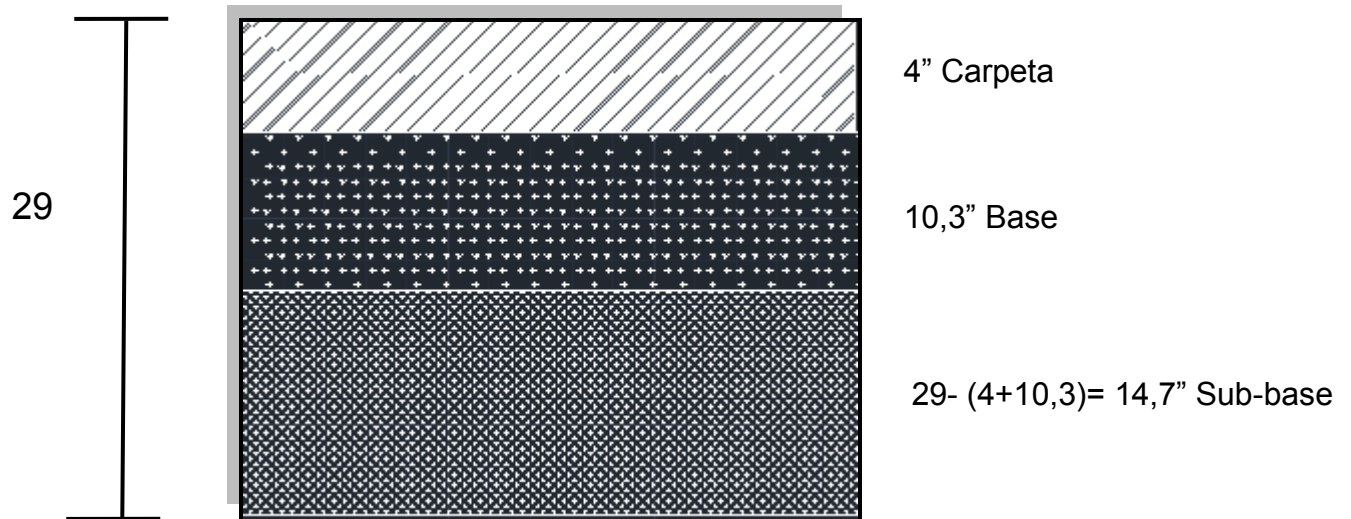


* El espesor total no se modifica

Este método indica la comprobación del espesor mínimo necesario, se entra nuevamente en el monograma anexo B que se encuentra en la página 75 y subsecuente para una revisión del espesor mínimo de base, con el CBR de la subrasante

El espesor que nos da fue de 10,3, como este espesor es mayor al que tenemos para la base = 10, por lo tanto se hace la corrección del espesor, y se vuelve determinar el valor de la sub-base.

Zona Crítica



Bases y Sub Base Estabilizadas

Estas son necesarias para aviones de diseño, con un peso de despegue iguales o mayores a 100000 lb.

Utilizar los factores de equivalencia, los cuales son sensibles a diferentes variables tales como espesor de la capa, tipo de agente estabilizador y la localización de la capa estabilizada dentro de la estructura. La excepción a la utilización de bases estabilizadas se puede hacer, cuando los materiales que se piensan colocar como estructura proviene de una roca dura, tienen gradación cerrada y son el 100 % producida dentro de un proceso de trituración. Además deben registrar una resistencia al ensayo del CBR mayor del 100% para materiales de Base y 35% para materiales de Subbase. Se recomienda no utilizar materiales de menor calidad en sustitución de otros de mejor calidad.

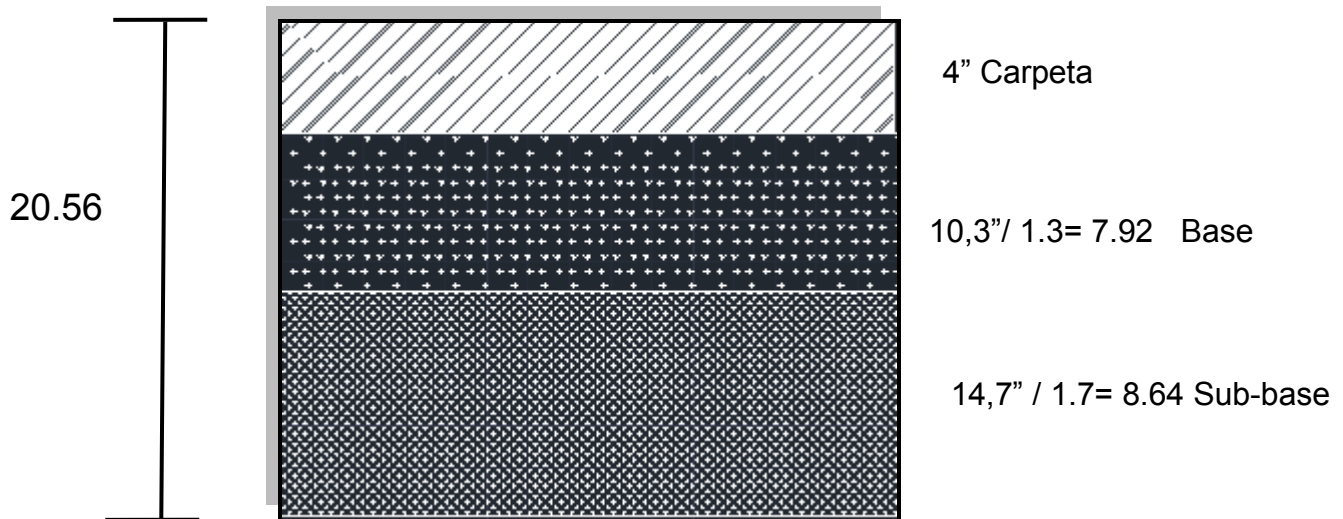
Otro requisito en su utilización, es que el espesor mínimo total del pavimento una vez se haya hecho todas las sustituciones, no debe ser menor que el espesor total de pavimento requerido cuando se utiliza una Subrasante de CBR de 20.

Se requiere base y sub-base estabilizadas

Sub-base: 1.7

Base: 1.3

Sección Crítica Estabilizada

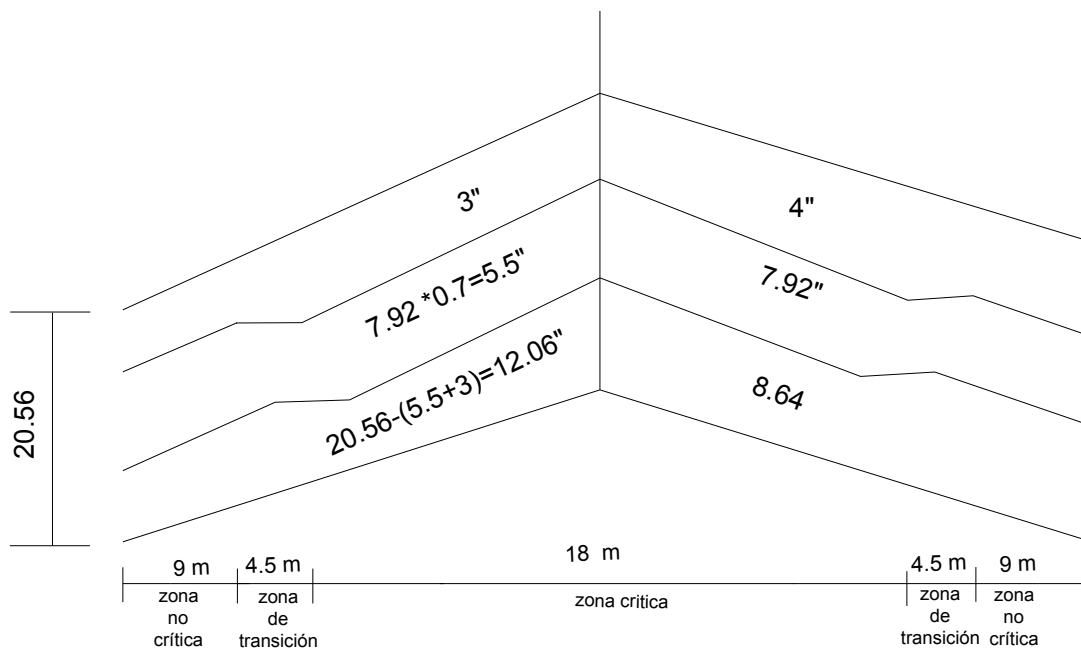


Este método requiere comprobar si el espesor total para un CBR 20 de subrasante es correcto, se entra nuevamente en el monograma anexo A para una revisión de espesor.

Para el CBR= 20, se obtiene un espesor =13

20.56 > 13 por lo tanto se concluye que el espesor del pavimento total en la sección crítica estabilizada es correcto.

Sección de pista pavimento Flexible



Para la sección transversal mostrada se supone un ancho de pista de 45.0 m y un ancho de la maquinaria extendedora de la carpeta de 4.5 m de concreto asfáltico.

El ancho central resulta en 18.0 m valor mínimo cuantificable con los requisitos estadísticos de la canalización del tránsito en pistas.

Diseño de Pavimento Rígido

Datos:

Avión de diseño: 727-100

Salidas anuales equivalentes: 16048

Peso de despegue: 133259

K de la subrasante=100 lb/pulg³

Espesor de la sub-base= 10 pulg propuesto

Resistencia del concreto a la tensión por flexión= $F_f = 650 \text{ lb/pulg}^2$

Para sub-base estabilizada, se determina el K de la sub-base, mediante el monograma del Anexo C que se encuentra en la página 77 y subsecuente, con el espesor propuesto de la sub-base= 10 pulg hasta la curva de K de la subrasante=100 lb/pulg³ y se determina el valor de K de la sub-base = 290 lb/pulg³

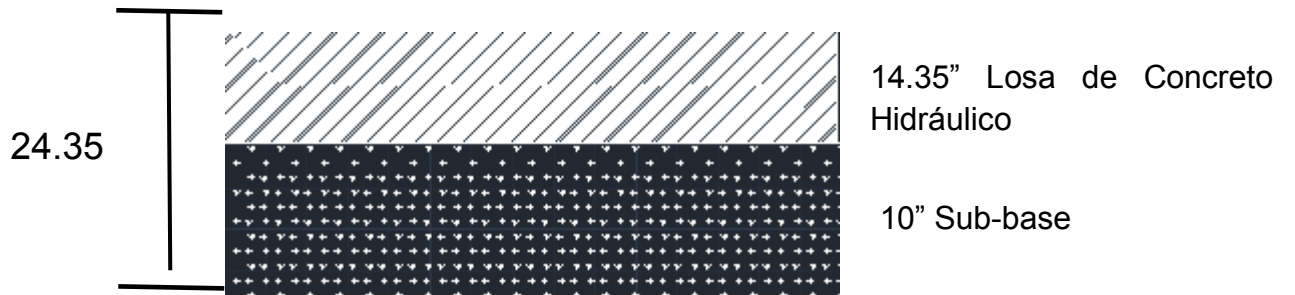
Con el F_f , el k de la sub-base, peso del avión de diseño, y el número de repeticiones se entra el monograma Anexo D que se encuentra en la página 79 y subsecuente, se obtiene el espesor total de la losa de concreto hidráulico, se obtienen dos valores para interpolar.

$h_{15000} = 14.3$

$h_{25000} = 14,8$

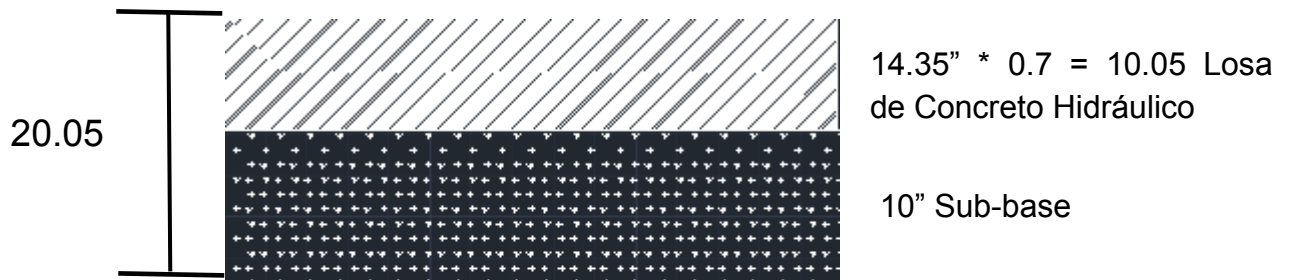
Interpolando obtenemos $h_{16048} = 14.35$

Zona Crítica

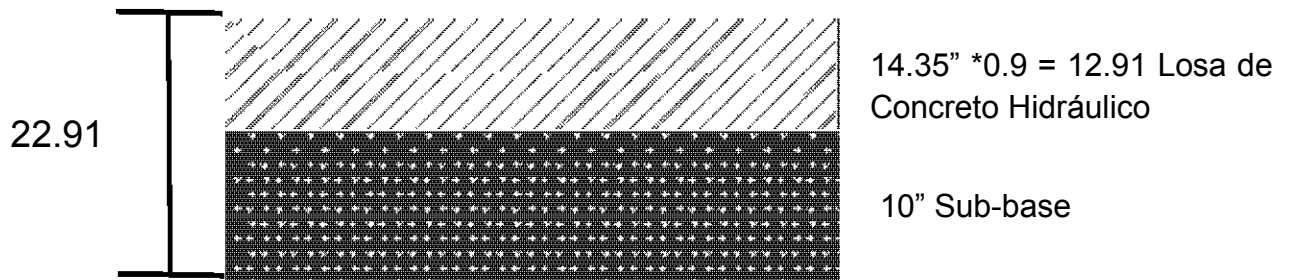


Zonas no Críticas

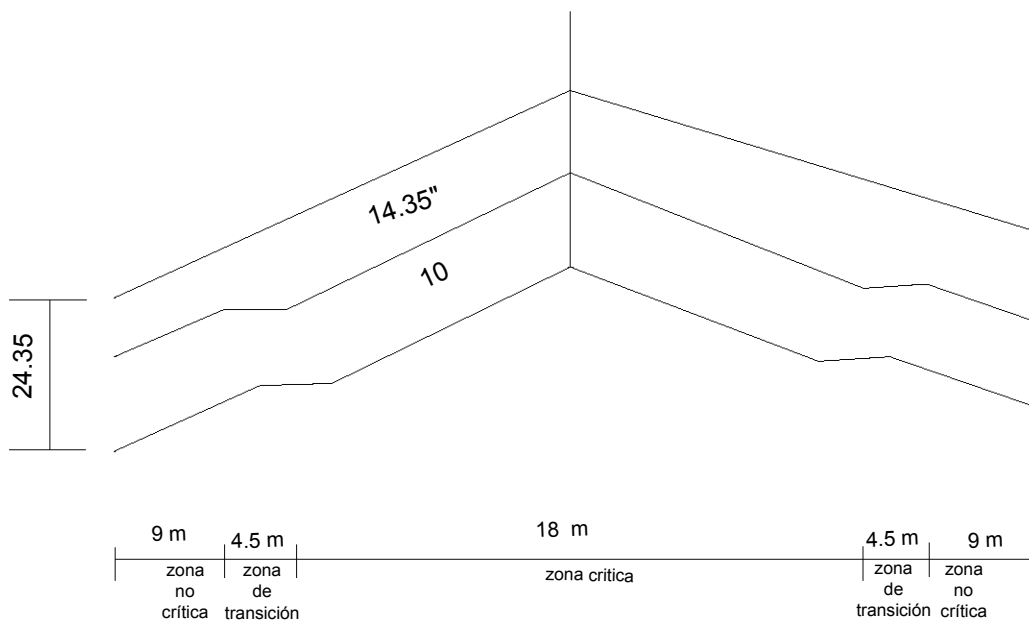
Orilla de pista



Rodaje de Salida



Sección de pista pavimento Rígido



Al igual que en el diseño del pavimento flexible, se supone un ancho de pista de 45.0m y un ancho de la maquina extendedora del concreto hidráulico de 4.5m

7 - Características del mantenimiento de los pavimentos aeronáuticos.

El mantenimiento tiene a su vez la finalidad de asegurar que las instalaciones conserven una vida útil compatible con la operación.

Los pavimentos, como cualquier obra de ingeniería, se deterioran con el tiempo bajo la acción del tránsito y cuando son afectados por la acción de los agentes naturales.

En cada aeropuerto se deberán establecer planes a corto, mediano y largo plazo, programas de mantenimiento adecuados para que los pavimentos aeronáuticos se conserven en óptimas condiciones y así, proveer una operación segura de las aeronaves que transitan sobre este.

La superficie de las pistas debe mantenerse en un estado en el cual no existan irregularidades, ni desprendimiento de material que pueda representar un peligro para el tránsito de las aeronaves. Por lo que se hace necesario tener una vigilancia continua al estado de la superficie de los pavimentos y su reparación oportuna.

Tipos de Mantenimiento

Se han dividido en diferentes tipos de mantenimiento como son preventivo, correctivo y emergente. A continuación se hará una breve explicación de cada tipo de mantenimiento.

- ✓ **Mantenimiento Preventivo:** este tipo de mantenimiento nos permite programar planes de mantenimiento que incluye la conservación rutinaria y rehabilitación menor, cuyo propósito es incrementar la vida útil del pavimento con el fin de evitar fallas futuras.
- ✓ **Mantenimiento Correctivo:** este tipo de mantenimiento se realizan cuando ya se ha producido la falla, las tareas que se desarrollan son fundamentalmente reparación y/o reemplazo del tramo afectado por la falla.
- ✓ **Mantenimiento Emergente:** este tipo de mantenimiento se da cuando se presentan fallas no previsibles provocando emergencias.
- ✓ **Mantenimiento Avanzado:** este tipo de mantenimiento se aplica cuando por otras razones se tiene un tramo disponible y se adelanta el preventivo

A continuación se mencionaran los factores que influyen en el deterioro de las pistas.

La fricción superficial de las pistas

Los pavimentos en general comienzan un gradual deterioro que es atribuible a varios factores, entre ellas por la acumulación cargas y eventualmente por el tránsito de cargas superiores a las previstas en el diseño del pavimento.

La superficie del pavimento se ve afectado por el desgaste del tránsito y por los efectos que produce el agua y otros contaminantes.

La acumulación de caucho es producido por las operaciones de aterrizaje de las aeronaves y por lo tanto, se requiere de su eliminación para la operación segura de las mismas.

El caucho acumulado se convierte en un elemento muy resbaladizo y favorece por tanto la generación del fenómeno denominado Acuplaneo.

Se sugieren los siguientes métodos para la eliminación del caucho y otros contaminantes de la superficie del pavimento:

- 1) Alta presión de agua o de arena fina.
- 2) Solventes químicos.
- 3) Barredoras mecánicas

Alta presión de agua: este método se ha utilizado de manera exitosa, se basa en mangueras de agua de alta presión apuntando a la superficie del pavimento quitando los residuos de hule y otros contaminantes. La técnica permite limpiar y remover depósitos de contaminantes de la pista en un tiempo mínimo.



El equipo de alta de alta presión opera a presiones regulables desde 5,000 PSI hasta 20,000 PSI

Acabada la etapa de remoción se procederá a succionar el residuo líquido (caucho con agua) con un camión succionador.

Arena Fina: consiste en lanzar partículas abrasivas (arena) de alta velocidad en la superficie de la pista, este método destruye los contaminantes de la superficie y se puede ajustar para producir la textura superficial deseada.

Solventes químicos: estos también se han utilizado de manera exitosa para remover contaminantes de la superficie de cemento Portland y pavimentos asfálticos.

Los solventes químicos deben tener en cuenta las implicaciones medioambientales y cumplir los requisitos ambientales establecidos para poder hacer uso de estos.

En Estados Unidos la dependencia encargada de esta regulación es EPA (United States Environmental Protection Agency) Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

En México la dependencia encargada de esta regulación es PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente)

Los productos químicos a base de ácidos son utilizados en pavimentos de concreto y los productos químicos alcalinos son utilizados en pavimentos de asfaltos

Barredoras Mecánicas: utilizan un cepillo principal para recoger desechos, los cuales se envían hacia una banda transportadora y se depositan en un contenedor de desechos o tolva.

La Crosswind FSX de Elgin o "Crosswind de barrido rápido" limpia pistas a velocidades superiores y cuenta con un motor auxiliar sobrealimentado, un cabezal de recolección sin igual y un ventilador centrífugo con un increíble poder de succión para el barrido a alta velocidad. Estas barredoras incluyen opciones como ruedas pivotantes de trabajo pesado para el cabezal de recolección y una poderosa ráfaga de aire lateral (única o dual) que dirige una corriente de aire concentrada a alta velocidad por conducto de una apertura, para remover desechos de luces sobresalientes y otros obstáculos a los que los cepillos laterales no pueden llegar.



8 - Conclusiones

Los pavimentos juegan un papel importante en el sistema de transporte aéreo, este trabajo consistió en la aplicación de un ejercicio práctico utilizando la metodología de la Federal Aviation Administration (FAA), los datos que se utilizaron fueron supuestos de acuerdo a la experiencia de ejemplos prácticos de la asignatura impartida por el Ingeniero Federico Dovali y datos suministrados de la circular Circular FAA AC150/5320-6D Airport Pavement Design and Evaluation.

Se usaron para el diseño 4 tipos de avión que fueron: 727-100, 707-320, 737-200, 747-100.

Se determinó el avión de diseño como el 727-100 con un tipo de tren doble, Por lo que las demás deberán convertirse al mismo tipo de tren del avión de diseño.

Los datos de mecánica de suelos

CBR Subrasante=7

Sub-base =18

Base \geq 80

Con los datos anteriores se procedió a determinar los espesores en pavimentos flexibles requeridos para cada capa, como resultado se obtuvo un espesor total de 29" este espesor se distribuye para la zona crítica carpeta 4" , Base 10" y sub-base 15"

Y para la zona no crítica, se aplican factores a la orilla de pista y rodaje de salida, sin modificar el espesor total.

Para zonas no críticas se especifica como mínimo 3" para la carpeta

Por lo tanto para orilla de pista tenemos los siguientes espesores: 3" carpeta, 7" base y 19" sub-base.

Y para rodaje de salida los siguientes espesores 3" carpeta, 9" base y 17" sub-base.

Una de las ventajas de esta metodología es que tiene un método para la comprobación del espesor mínimo de base necesario, por lo tanto se hace la corrección del espesor teníamos un espesor de Base de 10, pero al aplicar la comprobación nos da mayor, por lo tanto los espesores para la zona crítica son: carpeta 4" , Base 10,3 y sub-base 14,7"

A su vez es necesario aplicarle factores a la base y sub-base para tener la sección crítica estabilizado dándonos como espesor total 20.56 que se distribuye en 4" carpeta, 7.92" Base y 8.64" Sub-base

Por último se comprueba la sección crítica estabilizada este correcta, este se realiza mediante la comprobación del CBR=20 de subrasante, en el que se obtiene un espesor de 13, por lo tanto 20.56 que es el espesor total de la sección crítica estabilizada es mayor que 13, por lo que se concluye que es correcto.

Para el diseño de pavimento rígido se propusieron los siguientes valores

Avión de diseño: 727-100

Salidas anuales equivalentes: 16048

Peso de despegue: 133259

K de la subrasante=100 lb/pulg³

Espesor de la sub-base= 10 pulg

Resistencia del concreto a la tensión por flexión= $F_f = 650 \text{ lb/pulg}^2$

Con el espesor propuesto de las sub-base=10" y el K de la subrasante=100 lb/pulg³ determinamos el valor de la sub-base =290 lb/pulg³

Con los datos del F_f , el k de la sub-base, peso del avión de diseño, y el número de repeticiones, se obtiene el espesor total de la losa de concreto hidráulico, se obtienen dos valores para interpolar.

$h_{15000} = 14.3$

$h_{25000} = 14,8$

Interpolando obtenemos $h_{16048} = 14.35$

Los monogramas para el diseño de pavimentos rígidos solo nos proporcionan el espesor de la losa, los demás espesores se determinan por separado y el espesor total del pavimento es la suma de dichas capas.

Los pavimentos son el elemento primordial de la zona aeronáutica terrestre, por lo que se debe estudiar a detalle la correcta selección, ya que esta influirá en el desempeño de sus operaciones.

En el desarrollo se comprobó que la aeronave de diseño no necesariamente es la de mayor peso, Esto se debe a que el peso no es el único valor que influye en la elección, sino también el número de salidas, el tipo de tren de aterrizaje.

Otro factor importante es la conservación y mantenimiento de los pavimentos de aeropuertos, el pavimento rígido es una alternativa si queremos abatir el elevado costo de mantenimiento del pavimento flexible.

El Pavimento Rígido puede ser una mejor alternativa por las diversas ventajas que presenta frente al Pavimento Flexible, entre estas ventajas se resaltan la durabilidad, el costo a lo largo de la vida útil, la resistencia que posee frente a los derrames de combustible de avión, y sobre todo es mucho más amigable con el medio ambiente.

El programa de mantenimiento es muy importante ya que mantiene las condiciones del pavimento con un rendimiento óptimo a un costo mínimo. Proporcionar mantenimiento periódico en el pavimento aeroportuario puede renovar las condiciones del mismo prolongando su vida.

9 - Bibliografía.

Capítulo II. "CLASIFICACION Y DISEÑOS DE PAVIMENTOS". FACULTAD DE INGENIERIA UNAM

Circular FAA AC150/5320-6D Airport Pavement Designand Evaluation

Doc. 9157 –AN/901 MANUAL DE DISEÑO DE AERÓDROMOS. Parte 3 Pavimentos. Segunda Edición 1983. OACI/ICAO, Organización de Aviación Civil Internacional.

Doc. 9137 AN/898 Manual de servicios de aeropuertos. Parte 2 Estado de la superficie de los pavimentos. Cuarta Edición 2002. OACI/ICAO, Organización de Aviación Civil Internacional.

La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas volumen 2. Alfonso Rico y Hermilo Del Castillo. Editorial Limusa

Mecánica de suelos Juárez Badillo –Rico Rodríguez. Limusa Noriega Editores

Manual de diseño de aeródromos parte 3 pavimentos OACI/ICAO, Organización de Aviación Civil Internacional.

Normas y métodos recomendados internacionales. Anexo 14 al convenio sobre aviación civil internacional. Aeródromos Volumen 1 Diseño y operaciones de aeródromos. Sexta Edición 2013. OACI/ICAO, Organización de Aviación Civil Internacional.

Planning and Design of Airports, Robert Horonjeff. Editorial McGraw-Hill

VIAS DE COMUNICACIÓN, caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puerto. Tercera edición. Ing. Carlos Crespo Villalaz. Limusa Noriega Editores

Aspectos generales de los pavimentos de aeropuertos, Gallardo García Edgar, Tesis profesional FI UNAM año: 1996

Drenaje y Pavimentos en Aeropuertos; Narcia Morales Carlos, Tesis profesional FI UNAM año: 2001

Metodología para la planeación y diseño de aeropuertos, Ortiz González Roberto, Tesis profesional FI UNAM año: 1996

M-MMP-1-12/13. LIBRO: MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBAS DE MATERIALES. PARTE: SUELOS Y MATERIALES PARA TERRACERÍAS. TÍTULO: Valor Soporte de California (CBR) en el Lugar

Planeación y construcción de aeropuertos, Ruiz Luis Gabriel, Tesis profesional FI UNAM año: 2001

Apuntes materia Aeropuertos Ing. Federico Dovali Ramos

Apuntes materia Estructuras de Pavimentos Ing. Roberto Sosa Garrido

Páginas de internet:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/529/A5.pdf?sequence=5>

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/504/A6%20Dise%C3%B1o%20de%20Pavimentos%20R%C3%ADgidios.pdf?sequence=6>

<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/2598/CONCRETO%20HIDRAULICO.pdf?sequence=1>

<http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/mecanica7.htm>

<http://es.slideshare.net/santitrujillo1/ensayo-cbr>

http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1640/DELGADO_FABIOLA_Y_QUIspe_CANDY_PAVIMENTO_AEROPUERTO.pdf?sequence=1

http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/018150/018150_Cap5.pdf

<http://elginsweeper.com.es/Products/AirSweepers/CrosswindFSX/tabid/104/Default.asp>

X

ANEXO A

12/7/78

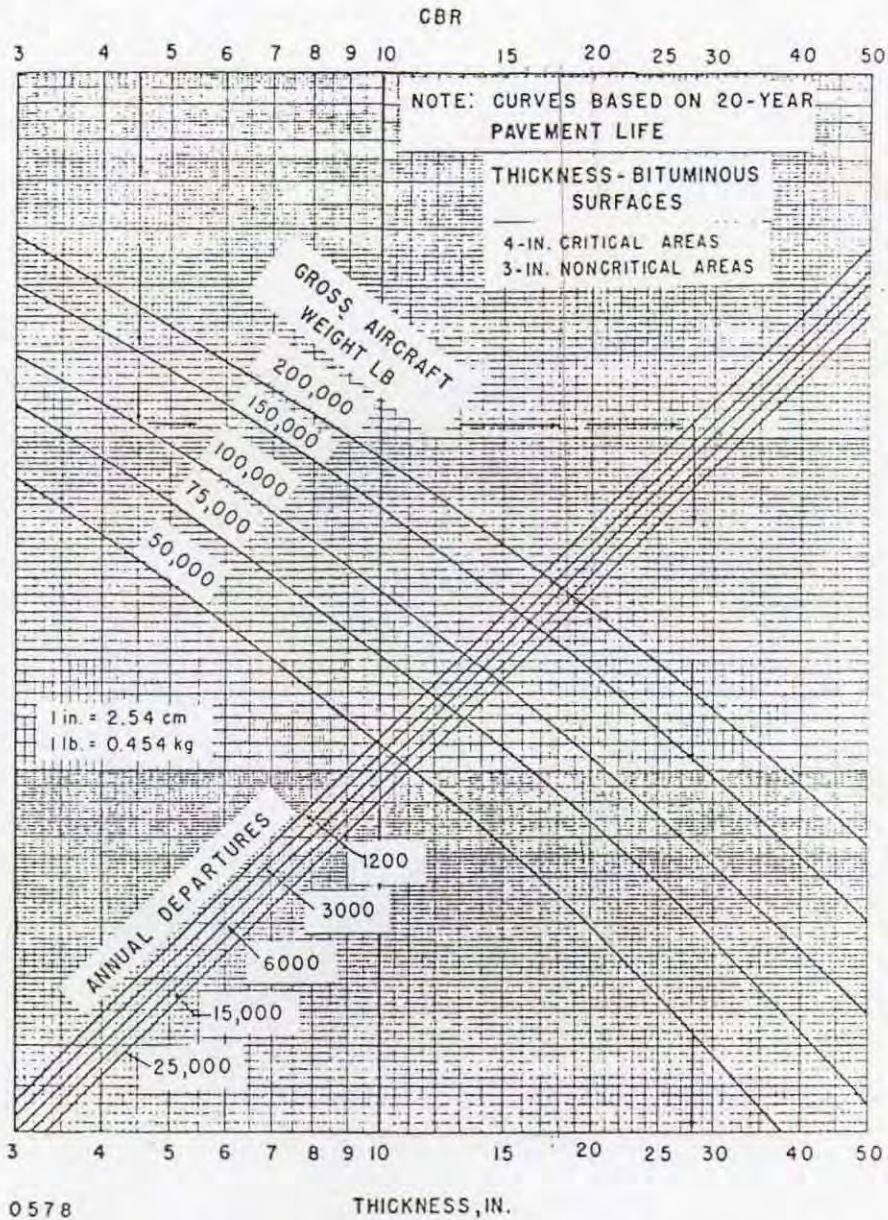


FIGURE 3-4. FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN CURVES FOR CRITICAL AREAS, DUAL WHEEL GEAR

nap 3
ar 31

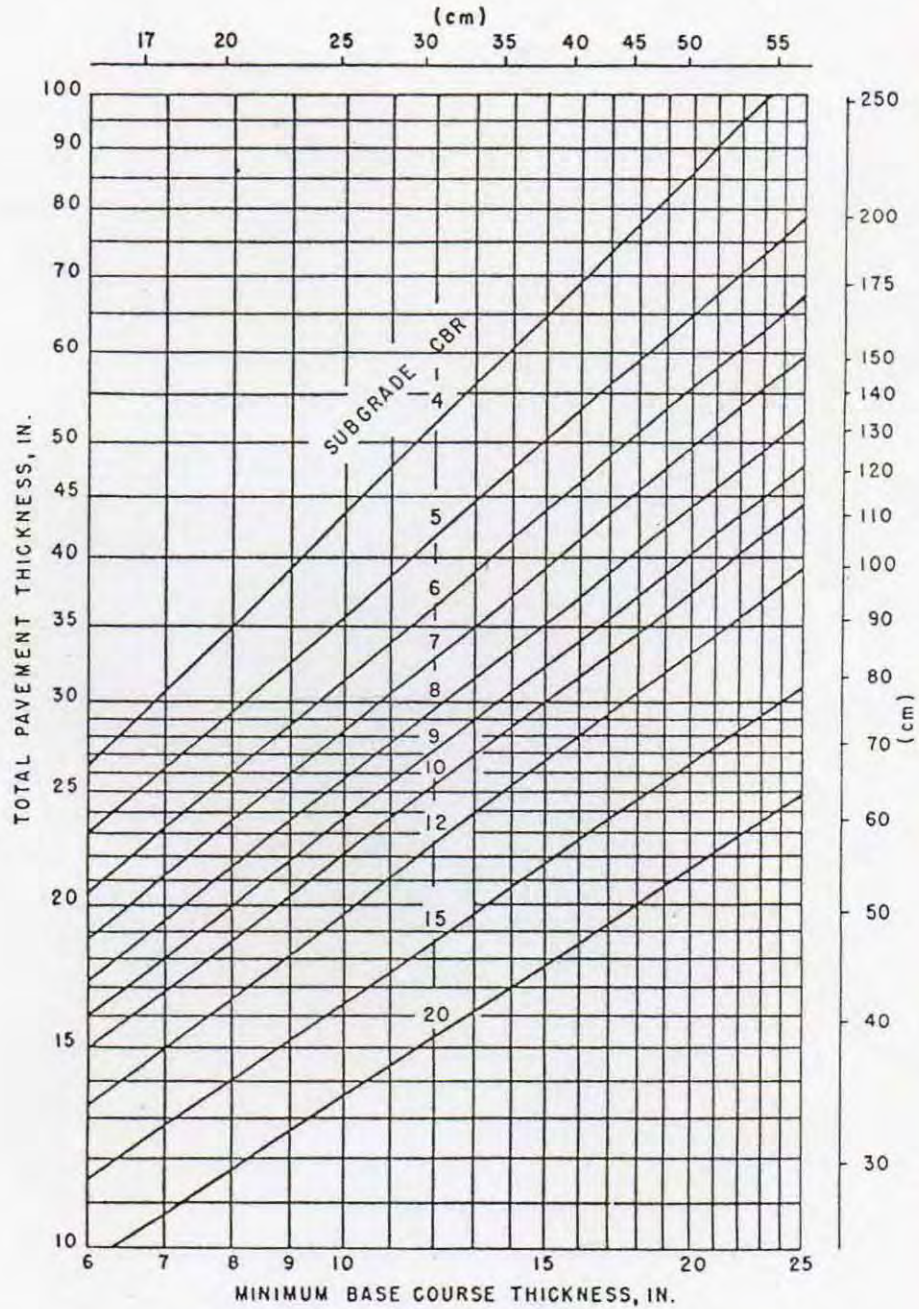
Chap 3
Par 31

Page 45

ANEXO B



AREAS,

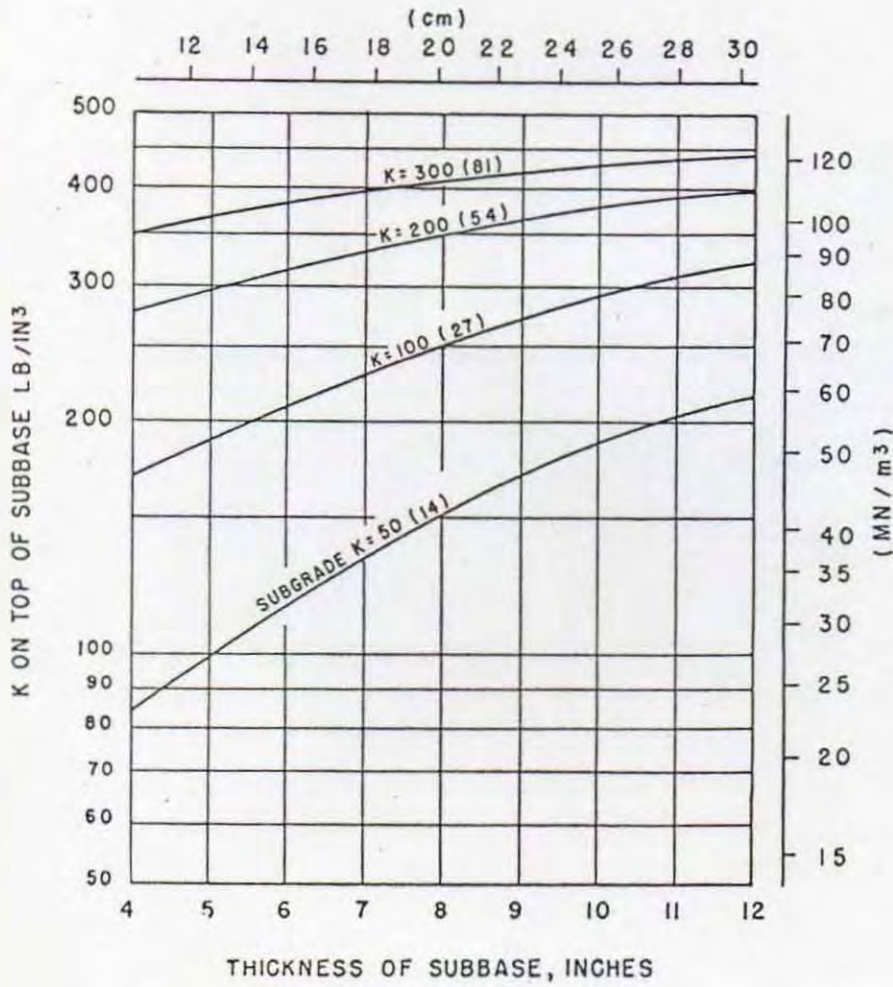


Chap 3
Par 31

Chap 3
Par 31

FIGURE 3-12. MINIMUM BASE COURSE THICKNESS REQUIREMENTS

ANEXO C



ANNUAL DEPARTURES
1200 3000 5000

FIGURE 3-13. EFFECT OF STABILIZED SUBBASE ON SUBGRADE MODULUS

ANEXO D

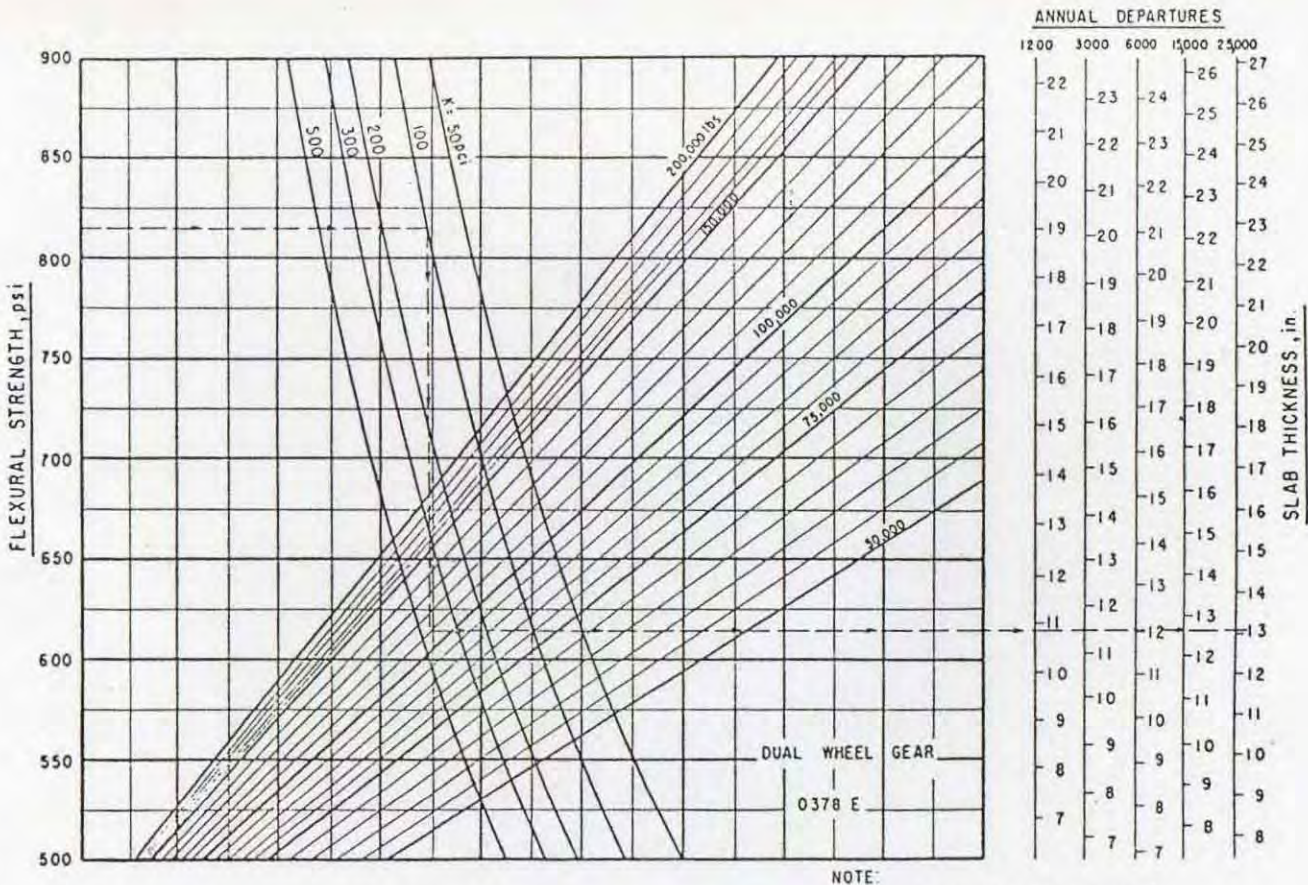


FIGURE 3-15. RIGID PAVEMENT DESIGN CURVES - DUAL WHEEL GEAR



AC 150/5320-6C

12/7/78

12/7/7