



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“PAVIMENTOS AERONÁUTICOS”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

DIANA LORENA ROLLAND ARRIAGA

DIRECTOR DE TESIS:

ING. FEDERICO DOVALÍ RAMOS



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/051/12

Señorita
DIANA LORENA ROLLAND ARRIAGA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. FEDERICO DOVALÍ RAMOS, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"PAVIMENTOS AERONÁUTICOS"

- INTRODUCCIÓN
- I. CONCEPTOS GENERALES DE UN PAVIMENTO
 - II. CONCEPTOS PARA ANÁLISIS DE DISEÑO. MÉTODOS MÁS USADOS
 - III. DIFERENCIAS ENTRE PAVIMENTOS DE CARRETERAS Y DE AEROPUERTOS
 - IV. COMPARACIÓN ENTRE TIPOS DE PAVIMENTOS PARA USO EN AEROPUERTOS
 - V. EJEMPLOS BÁSICOS DE DISEÑO. DETERMINACIÓN DEL AVIÓN CRÍTICO DE DISEÑO
 - VI. ESPECIFICACIONES Y PLANOS DE CONSTRUCCIÓN
 - VII. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS
 - VIII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 17 de mayo del 2012.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México mi Alma Matter.

A mí querida Facultad de Ingeniería y profesores por todos los conocimientos adquiridos.

Al Ing. Federico Dovalí Ramos por su apoyo y paciencia para conmigo en el desarrollo de este trabajo; estaré siempre agradecida por sus enseñanzas.

Al Ing. Marcos Trejo Hernández por ser mi tutor y guía durante toda la carrera.

A mis padres Arturo Rolland Constantine y Lorena Arriaga Gaona por brindarme la oportunidad de estudiar, por todo su apoyo, dedicación y acompañamiento en todas las etapas de mi vida; ustedes son mi ejemplo a seguir.

A mi hermana Ma. Fernanda Rolland Arriaga por compartir a mi lado todos aquellos momentos buenos y malos, además de ayudarme a mantenerme motivada a continuar.

A la persona más importante de mi vida mi esposo Luis Daniel León Segura por ser mi compañero de viaje y profesión, por tus palabras de ánimo para hacerme seguir adelante en el camino de la Ingeniería, por no permitir que me rindiera en ningún momento y sobre todo por respaldarme continuamente con tu amor, confianza y cariño incondicional.

A todos ustedes dedico este trabajo escrito por estar conmigo a lo largo de este proceso.

Gracias por creer en mí.

ÍNDICE

ANTECEDENTES	1
1. CONCEPTOS GENERALES DE UN PAVIMENTO.....	3
1.1. GENERALIDADES	3
1.2. PROPÓSITOS	4
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.4. REQUERIMIENTOS DE PROYECTO, CONSTRUCCIÓN, SUPERVISIÓN Y MANTENIMIENTO	4
1.5. TIPOS DE PAVIMENTOS.....	9
2. CONCEPTOS PARA ANÁLISIS DE DISEÑO. MÉTODOS MÁS USADOS.....	19
2.1. GENERALIDADES	19
2.2. VARIABLES QUE PARTICIPAN EN EL DISEÑO DE LOS PAVIMENTOS AERONÁUTICOS	23
2.3. MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS	26
3. DIFERENCIAS ENTRE PAVIMENTOS DE CARRETERAS Y DE AEROPUERTOS. EFECTOS EN EL PROYECTO Y MANTENIMIENTO.....	45
3.1. GENERALIDADES	45
4. COMPARACIÓN ENTRE TIPOS DE PAVIMENTOS PARA USO EN AEROPUERTOS.....	55
4.1. GENERALIDADES	55
5. EJEMPLOS BÁSICOS DE DISEÑO. DETERMINACIÓN DEL AVIÓN CRÍTICO DE DISEÑO. 63	63
5.1. GENERALIDADES	63
5.2. DIMENSIONES DE LA AERONAVE.....	63
5.3. DETERMINACIÓN DEL AVIÓN CRÍTICO DE DISEÑO	66
6. ESPECIFICACIONES Y PLANOS DE CONSTRUCCIÓN. INTEGRACIÓN CON OTROS PROYECTOS, CÁLCULO DE TRANSICIONES, CURVAS DE INTERACCIÓN, OBRAS DE DRENAJE, AYUDAS VISUALES.....	70
6.1. GENERALIDADES	70
6.2. PROYECTO DE PISTAS	70

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

6.3.	PROYECTO DE CALLES DE RODAJE	73
6.4.	PROYECTO DE PLATAFORMAS DE ESTACIONAMIENTO	75
6.5.	AYUDAS VISUALES	76
6.6.	SEÑALES	79
6.7.	ILUMINACIÓN DE PISTAS	86
6.8.	DRENAJE	90
7.	EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS.....	95
7.1.	GENERALIDADES	95
7.2.	PROCESO DE EVALUACIÓN	95
7.3.	REPORTE DE EVALUACIÓN.....	101
8.	CONCLUSIONES.....	102
	BIBLIOGRAFÍA.....	106

ANTECEDENTES.

El origen de los aeropuertos se remonta a la época de los primeros campos de aviación a principios del siglo XX, los cuales tenían la función de abastecer de combustible a las aeronaves así como asegurar un espacio para el despegue y aterrizaje de las mismas. En aquella época, la superficie de estos campos era de terracería o en ocasiones de pasto, quedando inservibles durante la temporada de lluvias.

Algunas de las ciudades más importantes tuvieron la idea de pavimentar de forma rudimentaria estos campos, para dar solución al problema de las lluvias; sin embargo, aún no se contaba con un estudio de diseño profundo ni la tecnología adecuada para desarrollar ni construir los pavimentos que existen en la actualidad.

Los procedimientos de diseño así como la construcción y mantenimiento de pavimentos aeronáuticos, han evolucionado debido a la experiencia y la práctica adquirida durante todos estos años, así como las pruebas de campo y la aplicación de conceptos teóricos.

El pavimento de un aeropuerto es algo más que una superficie “dura y resistente” al peso y al deslizamiento de las aeronaves; es una estructura formada por una o varias capas de material convenientemente colocadas sobre un suelo acondicionado como desplante o cimentación. Esta estructura debe ser capaz de permitir la operación de las aeronaves y de los medios auxiliares, además de resistir el desgaste producido por el tráfico así como de las agresiones del clima y otros agentes de su entorno.

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

Existen dos grupos de estructuras de pavimentos; por un lado, el grupo de estructuras rígidas que están formadas principalmente por losas de concreto hidráulico, mientras que el otro grupo lo constituyen las estructuras flexibles, las cuales están integradas por concretos asfálticos.

El proyecto de un pavimento aeronáutico debe considerar su operación para cualquier época del año, sin importar las condiciones meteorológicas, lluvias o estiaje, y solo dejará fuera de las consideraciones de diseño aquellos estados en los que la operación de las aeronaves queden totalmente imposibilitadas o sean calificados como estados de inseguridad. Es por ello que la calidad del pavimento depende de un buen diseño y mantenimiento adecuado.

1. CONCEPTOS GENERALES DE UN PAVIMENTO.

1.1. Generalidades

Se entenderá por pavimento aeronáutico, al conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben las cargas del tráfico de las aeronaves, transmitiéndolas a los estratos o capas inferiores en forma proporcional, obteniendo una superficie de rodamiento formada por una capa que dependiendo del tipo de pavimento, puede ser flexible (concreto asfáltico) o rígido (concreto hidráulico), los cuales deben funcionar eficientemente

Los pavimentos aeronáuticos se utilizan en la construcción de:

- Pistas
- Calles de rodaje
- Plataformas de estacionamiento en los aeropuertos

Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento de los pavimentos aeronáuticos son las siguientes: ancho, resistencia adecuada a las cargas para evitar fallas y agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre los neumáticos del tren de aterrizaje de la aeronave y el pavimento aún en condiciones húmedas. Así mismo, deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tráfico aéreo, la intemperie, los cambios de temperatura y el agua.

1.2. Propósitos

Los pavimentos aeronáuticos son construidos con el propósito de proveer una adecuada transmisión de las cargas impuestas por las aeronaves, de tal manera que se provoquen esfuerzos aceptables en las diferentes capas del pavimento.

Con el fin de cumplir satisfactoriamente estos requerimientos, es necesario que el pavimento sea de buena calidad y que las capas que lo componen o constituyen, tengan el espesor suficiente y necesario para evitar eventuales fallas por la acción abrasiva del tráfico de las aeronaves.

1.3. Objetivos

Un pavimento aeronáutico tiene como objetivo principal el permitir el tráfico de los aviones de manera segura y cómoda con las velocidades requeridas en las plataformas de estacionamiento, calles de rodaje y pistas de los aeropuertos.

1.4. Requerimientos de proyecto, construcción, supervisión y mantenimiento

Para producir pavimentos de buena calidad, se requiere de una excelente coordinación durante la realización del proyecto y su posterior construcción, supervisión y finalmente mantenimiento.

Los procedimientos de proyecto, construcción y mantenimiento empleados en los pavimentos aeronáuticos, han evolucionado con la experiencia, la práctica, las pruebas de campo y la aplicación de bases teóricas.

Los pavimentos aeronáuticos antes, durante y después de la vida útil, afrontan diferentes criterios que permiten comprender la degradación a la que están sujetos.

En algunos aeropuertos se ha detectado que las pistas, calles de rodaje y plataformas de estacionamiento, no se encuentran en condiciones óptimas de funcionamiento a causa de varios factores, como pueden ser:

- Diseño inadecuado. El pavimento debe diseñarse en función de las cargas y las condiciones del terreno natural.
- Una mala elaboración y/o ejecución de los procedimientos constructivos.
- Malas inspecciones que no detecten deterioros y fallas.
- Posteriores tareas preventivas y en su caso correctivas del programa de mantenimiento, entre otras.

1.4.1. Requerimientos de proyecto

Para la ejecución de los pavimentos, se han elaborado procedimientos y normas de proyecto tanto para los pavimentos flexibles como los rígidos, los cuales tienen como objetivo servir de guía para la elaboración de los trabajos requeridos bajo ciertos requerimientos, que garanticen que estos se llevan a cabo de la mejor forma posible.

La primera etapa del proyecto, es la investigación de campo y la recopilación de información, para proceder después a la toma de decisión sobre la metodología a utilizar en el proyecto. Esta investigación comprende la búsqueda de:

- La información disponible.
- Los análisis de tráfico aéreo.
- La calidad de los materiales de bancos disponibles en canteras y zonas locales.
- Ensayos de laboratorio.
- La planimetría y los niveles finales del pavimento.
- Tipo de pavimento, flexible o rígido.

Luego de realizar la debida recopilación de datos, trabajos de campo y los ensayos de laboratorio, se procede al diseño correspondiente. El procedimiento de diseño, consiste en escoger una adecuada combinación de espesores de capas y características de materiales, para que los esfuerzos y deformaciones causados por las sollicitaciones a que se somete la estructura, permanezcan dentro de los límites admisibles durante la vida útil de la estructura de la cual forman parte.

1.4.2. Requerimientos de construcción

La construcción de cualquier tipo de pavimento, debe de cumplir con los procedimientos constructivos, las especificaciones generales y particulares, los controles de calidad con criterios de aceptación o rechazo y que en conjunto

deben ser llevados a cabo de manera correcta y debidamente plasmados con anterioridad en el proyecto.

También es necesario considerar lo siguiente:

- Un estudio del suelo para determinar las características del terreno natural.
- Ubicaciones que eludan terrenos problemáticos como los de arcillas expansivas, arcillas finamente estratificadas, terrenos pantanosos y laderas inestables.
- Adaptar las características geométricas de las cargas a utilizar.
- La sección debe incluir un drenaje apropiado.
- Tender el suelo en capas delgadas bien compactadas, controlando el contenido de humedad para obtener densidad máxima. Los suelos menos estables, se deberán colocar donde causen el menor daño en los rellenos y pendientes laterales o bajo el peso de materiales selectos que proporcionen el drenaje e impidan el ascenso capilar de la humedad.
- Llevar a cabo todo lo anterior bajo la supervisión de personas entrenadas en los principios y aplicaciones de la Ingeniería de Suelos.

1.4.3. Requerimientos de supervisión

Tanto los requerimientos de proyecto como los de construcción deben responder, entre otras cosas, a los procesos de calidad, los cuales deben garantizar lo siguiente:

- Confianza de que todo se está cumpliendo conforme a lo establecido previamente en el proyecto.
- Iniciar acciones correctivas si se detecta algún incumplimiento durante la construcción del pavimento.
- Evaluar constantemente los sistemas de calidad, introduciendo mejoras en el mantenimiento cada vez que sea necesario.

1.4.4. Requerimientos de mantenimiento

El mantenimiento es la actividad necesaria para conservar la estructura del pavimento en las condiciones de soporte de carga con las que inicialmente se construyó, así como su nivel de servicio en términos de seguridad y comodidad.

En todo tipo de pavimento los deterioros pueden ser pequeños al principio, pero más adelante probablemente sean más serios y aceleren una posible falla del mismo; por ello, los pavimentos requieren de un plan periódico y rutinario de mantenimiento para asegurar su vida útil y proporcionar un servicio adecuado.

Los pavimentos se deterioran a medida que pasa el tiempo debido a las cargas del tráfico aéreo y el intemperismo, por lo tanto los pavimentos aeronáuticos tienen que estar bien mantenidos para asegurar que cumplan con su función.

El objetivo de cualquier programa de mantenimiento, es proporcionar las seguridades aeronáuticas adecuadas a las operaciones de los pavimentos con el menor costo posible.

1.5. Tipos de Pavimentos

Existen varios tipos de pavimentos utilizados en los aeropuertos; los principales son mencionados a continuación.

1.5.1. Pavimentos rígidos para aeropuertos

Son los pavimentos que se construyen con losas de concreto hidráulico, conformadas por una mezcla de cemento Portland, agua, agregado grueso y fino. El espesor de estos pavimentos es variado, dependiendo del volumen de tráfico aéreo que deba soportar; en ocasiones, se emplea arena o grava fina como base para reforzarlo.

El pavimento rígido tiene un costo inicial más elevado que el flexible y se diseña para una vida útil de 20 años y el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa comúnmente en las juntas de las losas.

Los pavimentos rígidos están constituidos por diferentes capas, las cuales se mencionan a continuación:

Terreno Natural (Terreno de Desplante)

Es la capa de suelo que se encuentra inmediatamente debajo de la estructura del pavimento, la cual se prepara durante la construcción para soportar las cargas transmitidas por el mismo. Esta capa está formada por el cuerpo de terraplén que es la capa sub-rasante.

Para preparar esta capa de suelo, se debe llevar a cabo un despalme que consiste en extraer la vegetación, nivelando y creando las pendientes planificadas

mediante operaciones de corte o relleno y compactando el suelo a la densidad con el porcentaje necesario.

Sub-Base

Formada por lo general con material pétreo de granulometría variable de inferior calidad y costo. De la misma manera que los materiales de la capa de base en el caso de los pavimentos flexibles, estos materiales pueden haber sido tratados con agentes estabilizantes, y su finalidad es la de distribuir las cargas sobre el terreno.

Losa (Capa de rodamiento)

Conformada por una mezcla de agregados pétreos y cementante, esta capa debe ser capaz de resistir las cargas, el desgaste y los efectos del rodamiento provocados por las aeronaves así como por el intemperismo.

Las losas utilizadas, pueden ser fraguadas directamente in situ (en el sitio) sobre la base o bien ser prefabricadas.

La Imagen 1 muestra una sección transversal con las capas que conforman el pavimento rígido.

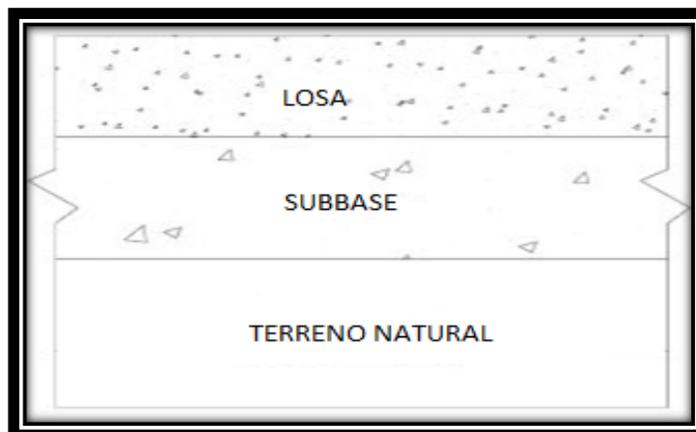


Imagen 1 Capas que conforman un pavimento rígido

Los pavimentos rígidos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Pavimentos de concreto simple
- b) Pavimentos de concreto con refuerzo de acero estructural
- c) Pavimentos de concreto pretensado
- d) Pavimentos de concreto simple con juntas

El más usado es el de concreto simple con juntas, ya que los otros representan mayor complejidad en su procedimiento constructivo, mayor impacto económico o bien, no cubren las necesidades de resistencia ante los esfuerzos que le demandan tanto las cargas de las aeronaves así como los efectos de contracción y dilatación por temperatura.

Así mismo, los pavimentos de concreto simple con juntas están constituidos por losas de dimensiones en general entre 4 y 7.5 m de largo y entre 3 y 4 m de ancho. Los espesores varían de acuerdo con el diseño del mismo. El espesor de una pista oscila alrededor de los 20 cm generalmente. La Imagen 2 ilustra este tipo de pavimentos.

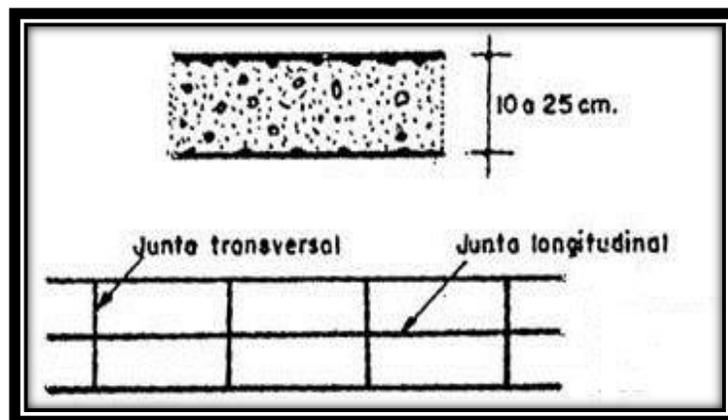


Imagen 2 Pavimento de concreto simple con juntas

Las juntas son pequeñas barras de acero, que se colocan en la sección longitudinal y/o transversal del pavimento, en las juntas de contracción. Su función estructural es transmitir las cargas entre losas adyacentes, mejorando así las condiciones de deformación en las juntas. De esta manera se evitan los desplazamientos verticales diferenciales (escalonamiento).

Las juntas suelen hacerse mediante insertos removibles o ranurando el concreto, pero garantizando la continuidad a través de la junta de apoyo de concreto contra concreto, o provocando una ranura que se rellena de algún material.

Las juntas suelen denominarse longitudinales o transversales, según el sentido en que estén dirigidas dentro de la pista, calles de rodaje y plataformas de estacionamiento.

En los pavimentos rígidos, las juntas pueden distinguirse entre cuatro grupos principales, según la forma en que se desempeñen:

- Las **juntas de contracción** controlan el previsible agrietado durante el fraguado, producido por la disminución de la humedad en el material, por descenso de la temperatura u otras causas del concreto.
- Las **juntas de expansión** proporcionan espacio suficiente para la expansión térmica y elástica de las losas sin destruirse. Algunas de ellas permiten asimismo la transferencia de las cargas.

Las **juntas de construcción** corresponden a las interrupciones de las operaciones de colado y por el proceso constructivo mediante franjas, debiendo garantizar la continuidad estructural. Estas juntas son inevitables, por tratarse de una estructura construida en partes.

- Las **juntas de alabeo o juntas articuladas** tienen por misión evitar los agrietamientos a lo largo del eje central de los pavimentos o en las líneas de unión de las diferentes hileras de losas que se producirían al elevarse sus bordes cuando la losa es cargada.

La Imagen 3 ilustra una junta típica entre losas rígidas.

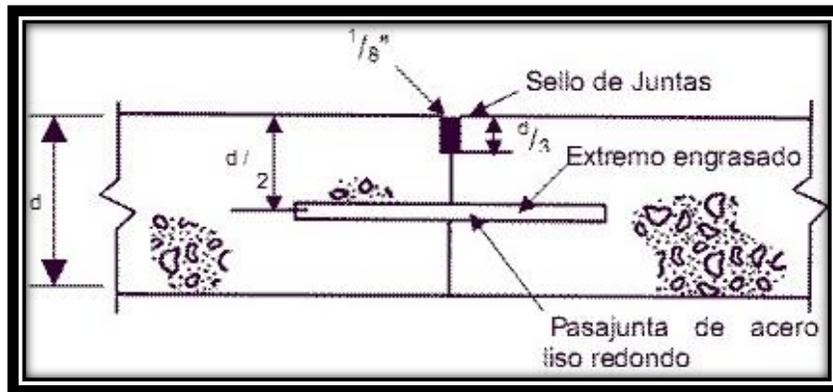


Imagen 3 Junta de acero liso redondo

Entre lo más novedoso de sus procedimientos constructivos, al colocar las juntas en las losas de concreto para hacer la transmisión de cargas de una losa a otra (generalmente colocadas manualmente), se utiliza un sofisticado sistema de colocación automática con equipos de inserción de barras, de modo que al momento que se está colocando el concreto, se va dando forma a las losas e insertando las barras de acero o juntas en medio de las losas, embebidas en mitad del espesor del concreto; dichas barras se instalan perpendiculares o paralelas a los ejes de la pista.

Este manejo es muy importante ya que cuando las llantas de la aeronave pasan de una losa a otra no hay escalonamiento, de tal manera que las ruedas no lo perciben.

Este procedimiento, conjuntamente con otros llevados a cabo en México, indica que la tecnología constructiva en el ámbito de infraestructura aeroportuaria, está al mismo nivel que en países como Estados Unidos. Cabe decir que la capacidad de aeronaves y la frecuencia de los vuelos, determinan si se trata de un aeropuerto internacional o regional; existen además aeropuertos con vocación de carga, diseñados para aviones más pesados y con pistas más largas y de mayor capacidad.

1.5.2. Pavimentos flexibles para aeropuertos

Son los pavimentos compuestos por una capa de rodamiento o carpeta asfáltica, es decir, una mezcla de agregado grueso o fino (grava y arena) con material bituminoso (concreto asfáltico) obtenido del petróleo.

Esta mezcla es compacta, pero lo suficientemente plástica, para absorber deformaciones y soportar un elevado volumen de tráfico aéreo pesado.

El pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial pero se diseña para una vida útil de entre 10 y 15 años, pero tiene la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil.

Los pavimentos flexibles están constituidos por diferentes capas, las cuales se mencionan a continuación:

Terreno Natural (Terreno de Desplante)

Es la capa de suelo que se encuentra inmediatamente debajo de la estructura del pavimento, que se prepara durante la construcción para soportar las cargas transmitidas por el mismo. Esta capa está formada por el cuerpo de

terraplén que es la capa sub-rasante; su función es la de resistir los esfuerzos transmitidos por las capas superiores y distribuirlos de manera uniforme y adecuada sobre el terreno natural.

En algunos casos, estas capas inferiores actúan como auxiliares en el drenaje de las aguas del subsuelo y en la prevención de los efectos destructivos de las heladas, que pueden llegar a agrietar fácilmente las estructuras.

La resistencia del terreno de desplante, es un elemento importante que debe tenerse en cuenta para la evaluación o el diseño de un pavimento y depende mucho de la humedad del terreno, que debe evaluarse para el estado que se prevé lograr in situ.

Sub-Base

Formada por lo general con material pétreo de granulometría variable de inferior calidad y costo. De la misma manera que los de la capa de base, estos materiales pueden haber sido tratados con agentes estabilizantes, y su finalidad es la de distribuir las cargas sobre el terreno.

Base

Es la capa de mayor estabilidad y densidad; su función principal es la de soportar las cargas generadas en la capa de rodamiento y distribuir las convenientemente a las capas siguientes, para evitar posibles deformaciones o desplazamientos.

La capa de base, situada inmediatamente debajo de la de rodamiento, se construye normalmente con material pétreo de granulometría variable (grava y

arena) que pueden ser previamente tratados con diversos agentes estabilizantes, como asfalto, cal o cemento.

Carpeta Asfáltica (Capa de rodamiento)

La capa superior de un pavimento flexible es la llamada de rodamiento, que será la sometida a los máximos esfuerzos y las más extremas condiciones operacionales. Esta capa deberá resistir los efectos de las cargas aplicadas sobre ella, distribuyéndolas a las capas inferiores.

Asimismo, deberá soportar el deterioro causado por el medio ambiente y el tráfico aéreo proporcionando siempre una superficie firme, resistente al deslizamiento y estable, y permanecer libre de agentes contaminantes tales como agua, polvo, hielo, entre otros.

La Imagen 4 muestra una sección transversal con las capas que conforman un pavimento flexible.

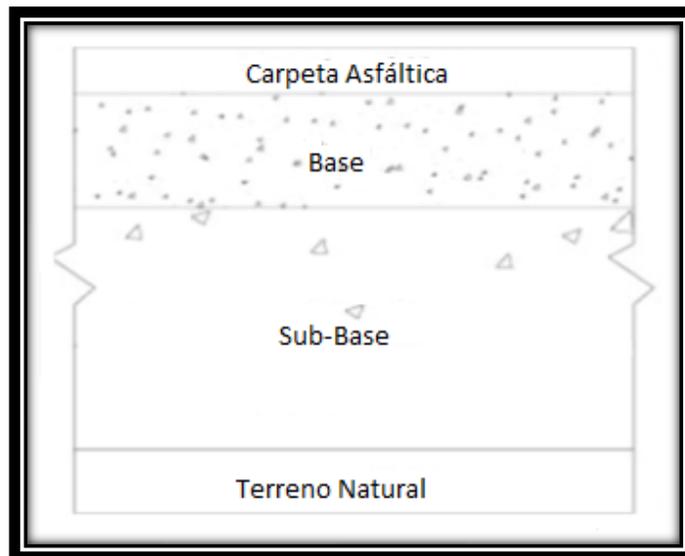


Imagen 4 Capas que conforman un pavimento flexible

1.5.3. Pavimentos mixtos

Son los pavimentos que cuentan con estructuras rígidas y sobre ellas se colocan capas de rodamiento de material asfáltico, por ejemplo, bases estabilizadas con cemento o losas de concreto y sobre estas se colocan carpetas asfálticas de espesor variable, aunque también se puede colocar una losa de concreto hidráulico sobre una carpeta asfáltica, ver Imagen 5.

Las características de los pavimentos mixtos son:

- Derivadas del concreto:
 - ✓ Elevada resistencia al desgaste.
 - ✓ Alta capacidad portante.
 - ✓ Buena resistencia a la formación de roderas.
 - ✓ Impermeabilidad.
 - ✓ No hay alteraciones por variaciones de temperatura.
- Derivadas de las mezclas asfálticas:
 - ✓ la formación de un pavimento continuo sin juntas.
 - ✓ Buena resistencia a ciclos hielo/deshielo.
 - ✓ Rápida construcción.
 - ✓ Rápida puesta en servicio.

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

Cuando se coloca una carpeta asfáltica sobre una losa de concreto hidráulico, las losas continúan trabajando y esto se ve reflejado en la carpeta asfáltica, por lo cual se requiere de una capa intermedia (Geotextiles) que rechazan o eliminan la reflexión de las juntas de la losa de concreto original.

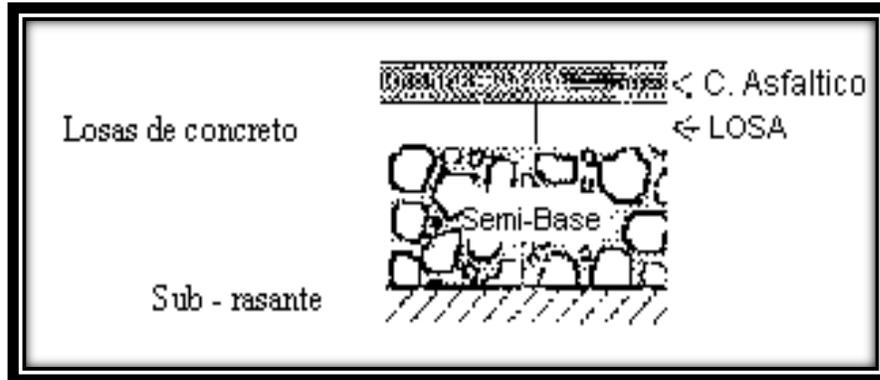


Imagen 5 Sección transversal de un pavimento mixto

2. CONCEPTOS PARA ANÁLISIS DE DISEÑO. MÉTODOS MÁS USADOS.

2.1. Generalidades

Sin importar el método utilizado para el diseño de pavimentos aeronáuticos, se deben tener las siguientes consideraciones:

1. Resistencia Estructural

La metodología para el análisis de la resistencia de un pavimento es proporcionada por las teorías de falla pertenecientes a la mecánica de materiales; de estas teorías, la más aceptada para los pavimentos flexibles es la del esfuerzo cortante y para los pavimentos rígidos es el momento flexionante.

Además de los esfuerzos anotados, en los pavimentos actúan otros esfuerzos adicionales producidos por la aceleración, el frenado, los giros de las aeronaves y los esfuerzos de tensión que se desarrollan en los niveles superiores de la estructura en los pavimentos flexibles, a cierta distancia del área cargada, cuando ésta se deforma verticalmente.

Otro aspecto de la resistencia estructural de un pavimento, se debe en general en relación a los materiales utilizados para la elaboración del mismo, pues aunque los materiales de la terracería sean de muy mala calidad, el espesor protector que el propio pavimento representa, hace que los esfuerzos que llegan a aquellos niveles, alcancen valores inferiores a la carga requerida para su falla.

La determinación de la resistencia de los materiales que constituyen un

pavimento, es un problema difícil de resolver satisfactoriamente; influye no solo el tipo de suelo y su tratamiento, sino también su interacción con los efectos de la intemperie, de los que la variación del contenido de agua es el más importante. El contenido de agua es necesario para el proyecto, que suele tender a definir la resistencia en esa condición crítica.

Otro factor que influye substancialmente en la resistencia del pavimento, es el tipo de carga que se le aplica y la velocidad de las aeronaves.

2. Deformabilidad

En pavimentos las deformaciones interesan desde dos puntos de vista:

- e) Las deformaciones excesivas que están asociadas al estado de falla.
- f) Un pavimento deformado puede dejar de cumplir las funciones para el que fue diseñado, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural.

Las cargas producen en el pavimento deformaciones de varias clases:

- Las deformaciones elásticas que son de recuperación instantánea y las deformaciones plásticas que permanecen en el pavimento.
 - a) La deformación elástica puede llegar a generar falla por fatiga si la deformación es importante y los materiales son susceptibles a esta.
 - b) La deformación plástica tiende a hacerse acumulativa bajo carga móvil y repetitiva y esta puede llegar a alcanzar valores inadmisibles.

Actualmente la deformabilidad de los pavimentos es un punto importante a considerar en los métodos de diseño (particularmente en los pavimentos aeronáuticos), centrándose en mantener los límites de deformación dentro de la tolerancia.

3. Durabilidad

La durabilidad está ligada con una serie de factores económicos y sociales. En un aeropuerto con alto tráfico aéreo y de gran importancia económica, se requerirán pavimentos de alta durabilidad a fin de no recurrir a costosas interrupciones en el tráfico aéreo. Por lo anterior, los pavimentos aeronáuticos son diseñados para una vida útil de por lo menos 15 años.

4. Costo

Como toda estructura de ingeniería, un pavimento representa un balance entre el cumplimiento de requisitos de resistencia y estabilidad en general por un lado y el costo por otro. Un diseño óptimo será el que llegue a satisfacer los requerimientos necesarios de servicio a costo mínimo.

En general, los pavimentos rígidos demandan menos gasto de conservación y se deterioran poco, pero su costo inicial de construcción es mayor y están sujetos a la disponibilidad de los materiales necesarios y a un equipo de construcción especializado.

Por otra parte, los pavimentos flexibles requieren menor inversión inicial de construcción, pero la conservación es más costosa.

La selección de los materiales que constituirán la estructura de los pavimentos es un factor muy importante, mismo que impacta en los costos en

general, ya que posiblemente los materiales aparezcan de manera abundante en bancos de materiales cercanos al proyecto; el problema va a radicar en establecer una correcta selección del material, pero es posible su carencia a tal grado de obligar al proyecto a aumentar los costos por el acarreo de los materiales desde bancos lejanos.

Otro factor que interviene de manera decisiva en los costos de un pavimento, son los procedimientos de construcción que han de sujetarse a los diferentes materiales para cumplir con los requerimientos de un proyecto determinado.

5. Requerimientos de conservación

Los factores que influyen decisivamente en la vida de los pavimentos y que el proyecto ha de tomarlos en cuenta para su conservación, son los siguientes:

- Los factores climáticos.
- La intensidad del tráfico aéreo.
- El futuro comportamiento de las terracerías, sus deformaciones, etc.
- Las condiciones de drenaje.
- La degradación estructural de los materiales.

6. Configuración

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

El examen de la configuración del tren de aterrizaje, las zonas de contacto de los neumáticos y la presión de los mismos en uso común, indica que se sigue una tendencia determinada relacionada con el peso bruto de la aeronave.

La configuración del tren de aterrizaje, es de suma importancia para el diseño del pavimento aeronáutico, ya que éste será parte importante para determinar el espesor de la capa asfáltica en la parte central de la pista, específicamente en la zona de toma de contacto de la aeronave con el pavimento.



Imagen 6 Configuración de tren de aterrizaje del Airbus 340

2.2. Variables que participan en el diseño de los pavimentos aeronáuticos

El dimensionamiento de un pavimento aeronáutico, se puede abordar desde dos puntos de vista diferentes:

- a) **Analítico o racional**, el cual considera los factores básicos de

diseño como cargas estructurales, tráfico aéreo, variables climáticas, costos y factores intrínsecos, de manera explícita, para determinar el estado de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.

- b) **Empírico**, considerando los anteriores factores de manera global en forma implícita, mediante un proceso basado en la experiencia sobre el comportamiento de los pavimentos ya construidos.

Desde el punto de vista práctico, ambas metodologías tiene la finalidad del dimensionamiento del pavimento; sin embargo, la diferencia radica en la definición de la estructura misma del pavimento mencionada anteriormente.

Por otra parte las dos metodologías, han sufrido un acercamiento progresivo, dando como resultado los métodos semiempíricos que son aquellos procedimientos que se manejan por medio de tablas, gráficos, ábacos y correlaciones para la realización directa de cálculos.

En los últimos años la metodología de diseño racional de pavimentos ha tenido un gran auge, ya que requieren de un análisis por parte del diseñador para combinar la elección de los datos de entrada con la presentación de los resultados, verificando y contrastando el comportamiento del mismo en la realidad, cumpliendo de esta manera con el propósito principal de un diseño racional como es “lograr una estructura que sea técnicamente realizable y económicamente factible”.

Hay que tener en cuenta que la principal utilidad técnica de estos procedimientos, radica en la posibilidad de obtener diferentes soluciones que permiten su comparación.

Para lograr una buena elección de los parámetros de entrada, es necesario primero identificar las diferentes variables que intervienen en el diseño y comportamiento de los pavimentos:

a) Estructurales

Para determinar la resistencia de los suelos de la sub-rasante, es necesario realizar la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, es decir, el tipo de suelo, sus condiciones de humedad, compactación y potencial de cambio volumétrico, entre otros

b) Tráfico aéreo

La finalidad es conocer el nivel de sollicitación que produce la circulación de las cargas sobre la estructura del pavimento, para lo cual es importante analizar los siguientes factores:

- Magnitud de cargas: esto es, determinar la carga que se considera para el diseño, es decir, el llamado peso bruto permisible para el despegue, el cual está en función tanto del tipo de avión como de la elevación de la pista sobre el nivel del mar, el peso del combustible, la carga de paga y la temperatura ambiente del aeropuerto.
- Geometría del tren de aterrizaje, la forma y distribución de las llantas en cada pata del tren principal de un avión comercial. Normalmente son de cuatro distribuciones típicas: simple, doble, doble tándem y triple tándem doble.
- Intensidad o frecuencia del tráfico aéreo: además de la estimación de la magnitud de las cargas, es necesario determinar también su frecuencia

en términos de la acumulación de repeticiones de carga de la flota de aeronaves, que determinarán el tipo de avión de diseño.

c) Clima y condiciones regionales

Es el conjunto de las condiciones atmosféricas de la región geográfica en donde se desarrollará el proyecto, determinados por los valores estadísticos de temperatura, humedad, presión, nevadas, régimen de lluvias y vientos.

El estudio de dichas condiciones climáticas, se realiza con base en la obtención de los datos estadísticos tomados en las estaciones meteorológicas durante 5 años, pero es importante anotar que es muy difícil predecir el comportamiento del clima para la vida esperada del pavimento, por lo tanto, no se pretende predecir el clima.

d) Costos de los pavimentos

- Costos de construcción, los cuales se deben racionalizar desde el diseño, tratando de balancear los aspectos técnicos de éste, con el procedimiento constructivo.
- Costos de mantenimiento, los cuales se deben prever en un programa de gestión para la estimación de dichos costos.

2.3. Métodos de Diseño de Pavimentos

Los métodos más usados para el diseño de pavimentos aeronáuticos se mencionan a continuación:

- Método de la Federal Aviation Administration de los Estados Unidos (FAA).

- Método del Instituto Norteamericano del Asfalto (API).
- Método de Portland Cement Association (PCA).
- Método del Cuerpo de Ingenieros del Ejército (EEUU).

2.3.1. Método de la Federal Aviation Administration de los Estados Unidos (FAA)

2.3.1.1. Pavimento Flexible

Es el método más utilizado para el diseño de pavimentos flexibles de aeropuertos, el cual consta de una serie de curvas que sirven para determinar los espesores de las llamadas áreas críticas, siendo éstas aquellas por las cuales se desplazan las aeronaves a carga máxima.

Los parámetros de entrada a estas curvas son los siguientes:

- Propiedades de los suelos de la sub-rasante.
- Magnitud de las cargas.
- Geometría del tren de aterrizaje.
- Volumen de tráfico aéreo.

Para la evaluación geotécnica de la sub-rasante, el método tiene su propia clasificación de suelos basada en la granulometría, el límite líquido y el índice plástico, por medio de la cual se establece el valor relativo del suelo como material de cimentación y el requerimiento o no de sub-base, considerando además las condiciones de drenaje existentes y la influencia de las heladas.

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

La Tabla 1 muestra la clasificación de los suelos según la FAA (los valores son aproximados).

Suelo	Análisis Mecánico					Subrasante			
	Ret N 10	% Pasa No. 10			LL	LP	Buen drenaje	Drenaje Pobre	
		Ret. No. 40	Ret. No. 200	Pasa No. 200				No. H	H
Gran									
E-1	0-45	40-	60-	15-	25-	6-	Fa	Fa	F1
E-2	0-45	15-	85-	25-	25-	6-	Fa	F1	F2
E-3	0-45			25-	25-	6-	F1	F2	F3
E-4	0-45			35-	35-	10-	F1	F3	F4
Fino									
E-5	0-55			45-	40-	15-		F3	F5
E-6	0-55			45-	40-	10-		F4	F6
E-7	0-55				45-	50-	10-30	F5	F7
E-8	0-55			45-	60-	15-40		F6	F8
E-9	0-55			45-	40-	30-		F7	F9
E-10	0-55			45-	70-	20-50		F8	F10
E-11	0-55			45-	80-	30		F9	F10
E-12	0-55			45-	80-			F10	F10
E-13									

Tabla 1 Clasificación de suelos de la FAA

También se ha encontrado una relación aproximada entre el tipo de suelo y un rango de valores típicos de CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) de sub-rasante, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Subrasante	CBR
Fa	20>
F1	16-20
F2	13-16
F3	11-13
F4	9-11
F5	8-9
F6	7-8
F7	6-7
F8	5-6
F9	4-5
F10	3-4

Tabla 2 Relación CBR, según el tipo de subrasante

En cuanto a la magnitud de las cargas, el método considera para el diseño el llamado peso máximo para el despegue, que a su vez está en función del tipo de avión, de la elevación de la pista sobre el nivel del mar y la temperatura de referencia donde se encuentra ubicado el aeropuerto.

En cuanto a la geometría del tren de aterrizaje, los gráficos de diseño han sido preparados teniendo en cuenta dichas distribuciones en los aviones convencionales y gráficas especiales para los llamados de cabina ancha.

Finalmente el espesor del pavimento depende no sólo de la magnitud de las cargas, sino también de la frecuencia; para lo cual hay que tener en cuenta que sobre las pistas circulan aviones de diferentes características, por lo tanto, para efectos del diseño se debe trabajar con un solo tipo de avión que es el avión crítico de diseño y es aquel que requiere un mayor espesor de pavimento para su respectivo despegue.

Es necesario disponer de pronósticos de salidas anuales por tipo de aeronave al final de la supuesta vida útil. El avión crítico de diseño, deberá seleccionarse como el que requiere mayor espesor de pavimento, lo cual no es necesariamente el más pesado, pues depende del número estimado de despegues. Sin embargo, el pronóstico de tráfico aéreo es una mezcla de diferentes aeronaves que poseen diferentes tipos de trenes de aterrizaje y diferentes pesos, razón por la cual se utilizan los siguientes factores de conversión mostrados en la Tabla 3.

Para convertir de	A	Factor de conversión
Rueda simple	Ruedas gemelas	0.8
Rueda simple	Bogie	0.5
Ruedas gemelas	Bogie	0.6
Bogie doble	Bogie	1.0
Bogie	Rueda simple	2.0
Bogie	Ruedas gemelas	1.7
Ruedas gemelas	Rueda simple	1.3
Bogie doble	Ruedas gemelas	1.7

Tabla 3 Factores de conversión para diferentes trenes de aterrizaje

2.3.1.2. Pavimento Rígido

El proceso de diseño considera un modo de falla para pavimentos rígidos, es decir, el agrietamiento en la losa de concreto. El agrietamiento en la capa superficial se controla limitando el esfuerzo horizontal en la parte baja de la losa.

La falla en las capas inferiores (sub-base) no está considerada.

Para obtener el diseño definitivo del pavimento rígido, se deben asumir distintos espesores para la base y analizar las propuestas económicas de cada diseño con el fin de obtener la alternativa más conveniente.

Actualmente la FAA considera el programa FAARFIELD para realizar el diseño de este tipo de pavimentos.

En este programa el modelo de elemento finito en 3D es usado para calcular los esfuerzos en la losa. Este modelo tiene la ventaja de considerar los esfuerzos críticos en el diseño de la losa, los cuales normalmente ocurren en los ejes de la losa; además emplea conceptos similares para nuevos diseños de pavimentos rígidos.

De acuerdo a la circular AC 150/5320-6F "Airport Pavement Design and Evaluation" emitida Federal Aviation Administration (FAA) los parámetros de diseño con el programa FAARFIELD son los siguientes:

- Carga: Peso Total del Avión.
- Tipo y geometría del tren de aterrizaje.
- Presión del neumático.
- Volumen de tráfico: Salidas anuales (solo despegues).
- Mezcla de tráfico de aviones (Avión Crítico de Diseño).
- Resistencia de la subrasante (CBR o k, dependiendo del tipo de pavimento flexible o rígido).
- Vida de diseño.

Determinación del módulo de rigidez

Además de los sondeos, análisis y clasificación de los suelos para condiciones de subrasante, se requiere la determinación del módulo de rigidez para ser asignado a esta capa. Dicho módulo puede ser expresado por "k" o como el módulo elástico E y puede ser ingresado al programa directamente de cualquier forma; sin embargo, todos los cálculos estructurales son conformados en función del módulo de elasticidad "E".

Si se introduce el valor “k”, el programa calcula el módulo “E” en función de k.

$$E_{SG} = 26k^{1.284}$$

En donde:

E_{SG} , es el módulo de resiliencia de la subrasante en psi.

k, es el módulo de elasticidad de la subrasante en psi.

Para pavimentos existentes, el módulo “E” puede ser determinado en campo a través de pruebas no destructivas, si hay manera de llegar a la subrasante, el valor “k” puede determinarse directamente mediante una prueba. Si este módulo puede ser determinado o si otro está disponible, k podría introducirse directamente en el FAARFIELD.

El método preferido para determinar el módulo de la subrasante, es mediante una sección representativa, la cual ha sido construida con las especificaciones requeridas. El procedimiento de la prueba está en AASHTO T-222. Si no es práctico hacer esta prueba, la conversión del CBR al valor de “k” puede hacerse de la siguiente manera:

$$k = \left[\frac{1500 \times CBR}{26} \right]^{0.7788}, (k \text{ in pci})$$

Determinación del espesor de la losa de concreto hidráulico

El programa diseña el espesor de la losa en función de la suposición de los ejes de carga. La presión de contacto se ubica en forma tangente y perpendicular

al eje de la losa y el esfuerzo mayor, reducido 25% para dar cuenta de la transferencia de carga a través de la junta, es tomada como el esfuerzo de diseño para determinar el espesor de la losa. El uso del programa requiere cinco grupos de datos para alimentarlo: esfuerzo a la tensión del concreto, módulo de la subrasante, vida de diseño en años, información de la capa estructural e información del avión crítico de diseño.

El programa calcula únicamente el espesor de la losa de concreto hidráulico, siendo el espesor mínimo, de 6 pulgadas (15 cm); el espesor de las capas inferiores debe ser seleccionado por el proyectista.

Resistencia a la flexión del concreto hidráulico

El espesor requerido del pavimento de concreto hidráulico, está relacionado con su resistencia. Para el diseño de pavimentos, la resistencia del concreto está caracterizada por la flexión, ya que la acción primaria y modo de falla está en flexión; para los propósitos de diseño de la FAA, la resistencia a la flexión del concreto se mide de acuerdo con la norma ASTM C78.

Aunque la resistencia a la flexión requerida para el diseño del pavimento está relacionada con la resistencia a la flexión de la especificación P-501, éstas no son necesariamente iguales. A menos que la construcción acelerada requiera la apertura del pavimento al tráfico aéreo (menos de 28 días), la especificación P-501 usa una resistencia a los 28 días como una medida práctica de construcción; sin embargo, la resistencia a largo plazo lograda por el concreto, espera que sea al menos 5% mayor que la resistencia medida a los 28 días.

Para establecer la resistencia a la flexión para el diseño del espesor, el proyectista necesita considerar varios factores:

- Capacidad para producir el concreto con la resistencia necesaria.
- Resistencia a la flexión versus información del contenido de cemento de proyectos anteriores en el aeropuerto.
- La necesidad de evitar altos contenidos de cemento, lo cual puede afectar la durabilidad del concreto.
- Requisitos de apertura temprana si hacen necesario el uso de una resistencia inferior a 28 días.

La FAA recomienda un diseño de resistencia a la flexión de 600 a 700 psi (4.14 a 4.83 MPa).

Los requerimientos de resistencias más bajas permiten balancear los componentes de la mezcla de concreto, pero puede dar pie a concretos con mayor espesor. Sin embargo, estas condiciones reducen el riesgo de un agrietamiento temprano, minimizando las deformaciones e incrementando su comportamiento respecto a la falla; la resistencia usada para el espesor de diseño puede reducirse 5%.

Vida de diseño

La vida de diseño estándar para diseño de espesores de pavimentos es de 20 años. El programa puede considerar otro periodo de diseño.

2.3.2. Método del Instituto Norteamericano del Asfalto (API)

Este método se basa en el tráfico aéreo probable en un periodo de diseño de 20 años, referido a una carga por “eje sencillo” de aproximadamente 18, 000

libras (8,164.66 kg aproximadamente), que es la “carga por eje” y considera además el valor portante del terreno de desplante, la calidad de los materiales de la sub-base, la base y la capa de rodamiento que se emplee, además de los procedimientos constructivos a seguirse.

Dicho tráfico probable de 20 años más la carga referida de 18, 000 libras se le denomina “valor de tráfico para el diseño” y es determinado en función del “tráfico diario inicial”, que es el promedio en ambas direcciones de la pista, estimado para el año 1 de servicio.

2.3.3. Método de Portland Cement Association (PCA)

El método de la Portland Cement Association (PCA) es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto.

Este método considera dos criterios de evaluación en el procedimiento de diseño:

- Criterio de erosión de la base por debajo de las losas de concreto
- Criterio de fatiga de las losas de concreto

El criterio de erosión reconoce que el pavimento puede fallar por un exceso de bombeo, erosión del terreno de soporte y la diferencia de elevaciones de las juntas. El criterio del esfuerzo de fatiga reconoce que el pavimento puede fallar presentando agrietamientos, derivado de excesivas repeticiones de carga.

El criterio de fatiga se basa principalmente en la relación de esfuerzos:

$$\frac{\text{Esfuerzos de carga producidos por cada eje}}{\text{Módulo de rotura del concreto}}$$

Las variables que intervienen en el diseño son las siguientes:

- Espesor Inicial del Pavimento.
- Módulo de Reacción K del suelo.
- Tráfico aéreo.
- Propiedades del Concreto.
- Módulo de Ruptura (Considera una reducción del 15% por seguridad).
- Módulo de Elasticidad Fijo = 4,000,000 psi.
- Módulo de Poisson Fijo = 0.15.

El método de la Portland Cement Association (PCA), tiene como base estudios técnicos de los esfuerzos en la losa y las deformaciones del pavimento en conjunto; además se apoya en investigaciones de laboratorio y campo, realizadas originalmente para pavimentos de bases militares con bombarderos, condujeron posteriormente al desarrollo de esta metodología.

La versión actual del método de la PCA fue publicada en 1984 y en la misma, se han introducido numerosos cambios con respecto a la anterior, aparecida en 1966. Para ello se han aprovechado los avances en los métodos de análisis de pavimentos, los cuales han permitido estudiar la influencia de una serie de factores que no pudieron ser considerados de forma adecuada en la versión

precedente, tales como pavimentos con juntas, bases de concreto pobre, bermas de concreto, deterioro del pavimento debido a la erosión de la base, aeronaves con ejes tridem, entre otros.

Un aspecto que se destaca en la versión de 1984, es la introducción del criterio de erosión, el cual reconoce que un pavimento (especialmente si está sometido a un tráfico aéreo pesado), puede fallar por fenómenos de bombeo, erosión de la base y escalonamiento de las juntas, antes que por fatiga debida a excesivas repeticiones de carga.

El pavimento se encuentra en buenas condiciones frente a la fatiga si, para el conjunto de las diferentes cargas, se verifica que:

Aunque la ley de Miner (también conocida como daño por fatiga) se define como la fatiga que genera el esfuerzo aplicado de manera constante a un material, esta ley fue formulada inicialmente para las tensiones de tipo mecánico provocadas por las cargas, la PCA ha adoptado también la misma para evaluar la resistencia frente a la erosión de un pavimento (o, mejor dicho, de la superficie de apoyo de las losas de concreto). De forma similar a lo supuesto en el análisis por fatiga, si un pavimento puede soportar un cierto número de repeticiones “ N_e ” de una determinada carga “ P_i ” antes de que se produzca la erosión de dicha superficie de apoyo, el pavimento se encuentra en buenas condiciones frente a la erosión si, para el conjunto de las cargas, se verifica que, para cada carga “ p ”, el número de repeticiones admisibles frente a la fatiga “ N_f ”, “ i ” no tiene por qué coincidir con el de las admisibles frente a erosión “ N_e ”, por depender en cada caso de factores diferentes.

Por otra parte, debe mencionarse que si bien el análisis de fatiga del método de la PCA se basa en modelos teóricos haciendo uso del método de los

elementos finitos, por lo que su utilización no presenta ningún tipo de restricciones. Por el contrario, para el análisis frente a la erosión, se ha empleado un modelo de evolución de la misma deducido a partir del comportamiento de una serie de pavimentos de EUA, por lo que en principio su aplicación a otros países con circunstancias diferentes, por ejemplo en lo que se refiere a gradientes térmicos o cargas de tráfico aéreo superiores a las de EUA, debe contemplarse con precaución.

2.3.4. Método del Cuerpo de Ingenieros del Ejército (EEUU)

El procedimiento de este método, se basa en ecuaciones que permiten determinar el espesor del material requerido sobre una capa o subrasante de un CBR conocido.

La condición es que el CBR del material de la capa superior, sea mayor que el de la subyacente.

El espesor del pavimento obtenido mediante este método, es tal, que permite un cierto número de cubrimientos, antes de que la estructura alcance un nivel de deformación que corresponda a una servicialidad baja.

Dicha metodología se aplica tanto a pavimentos de carreteras, como de aeropuertos.

Determinación del C.B.R.

El método de la Relación de Soporte de California (en México también conocido como Valor Relativo de Soporte V.R.S.), constituyó el primer intento para

dimensionar los pavimentos flexibles con una base racional, fundada en una correlación empírica entre el comportamiento del futuro pavimento y el de su material constitutivo en una prueba de laboratorio.

El método está basado en la realización y resultados de la prueba del mismo nombre.

Con base en observaciones del comportamiento de pavimentos construidos durante más de 20 años y en correlaciones de tal comportamiento con los valores del C.B.R. exhibidos por las diferentes capas de tales pavimentos, el Cuerpo de Ingenieros Civiles del Ejército de los E. U. A., propone la siguiente expresión para determinar el espesor de un pavimento en las pistas de los aeropuertos:

$$e = 2.5 F \sqrt{\frac{P}{8.1 C. B. R.} - \frac{A}{\pi}}$$

En donde:

“e”, es el espesor total de material que debe colocarse sobre el suelo cuyo C. B. R. aparece en la expresión.

$$F = 0.23 \log C + 0.15$$

“C”, volumen de tráfico aéreo, en cubrimientos. Número de cubrimientos para el que se desea diseñar la pista.

“P”, carga sencilla equivalente al sistema de llantas múltiple del avión de diseño, en kg.

“A”, área de contacto, en cm².

“C. B. R.”, Relación de Soporte de California de la capa sub-rasante.

La ecuación anterior es sólo válida en pistas y para valores de C. B. R. menores que 10 ó 12% lo cual, por otra parte cubre el intervalo de C. B. R. de sub-rasante más frecuente en la práctica; para estos valores la ecuación representa la forma y la tendencia de las curvas de diseño, a las que se llegó por métodos puramente empíricos. Para valores mayores de C. B. R., la fórmula anterior ya no representa a las curvas de diseño, por lo que deberá recurrirse a estas últimas en cada caso particular. Cabe aclarar que las curvas de diseño que a continuación se proporcionan cubren cualquier valor de C. B. R. incluyendo el intervalo cubierto por la fórmula, por lo que en la práctica basta manejar las curvas.

La manera de utilizar las gráficas de diseño en un caso concreto sería el siguiente:

Determinado el C. B. R. de la capa superior de la terracería, la utilización de la gráfica que corresponda, dará el espesor necesario de material que ha de cubrir a la terracería para lograr un comportamiento satisfactorio; la Imagen 7, Imagen 8 e Imagen 9 se muestra el uso de las curvas de diseño.

Se abre de inmediato una interrogante que el método en si no resuelve y que se refiere a con qué material ha de darse el espesor de cubrimiento requerido. La lógica, pero no el método de diseño, indica que debe utilizarse un material de mejor calidad que la propia terracería; en estos casos, lo que se hace es proporcionar una sub-rasante sobre la terracería, cuyo espesor va del orden frecuentemente de 50 cm en las pistas. La única condición que se pide, es que ese espesor de sub-rasante más el espesor de lo que se coloque encima de la sub-rasante, dé el cubrimiento total que la terracería haya requerido.

Por los mismos procedimientos ya indicados, podrá conocerse ahora el

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

C.B.R. de la sub-rasante, sub-base y base consecutivamente y con la misma gráfica que se esté utilizando, podrá conocerse el espesor de cubrimiento total que cada uno de estos materiales requiera.

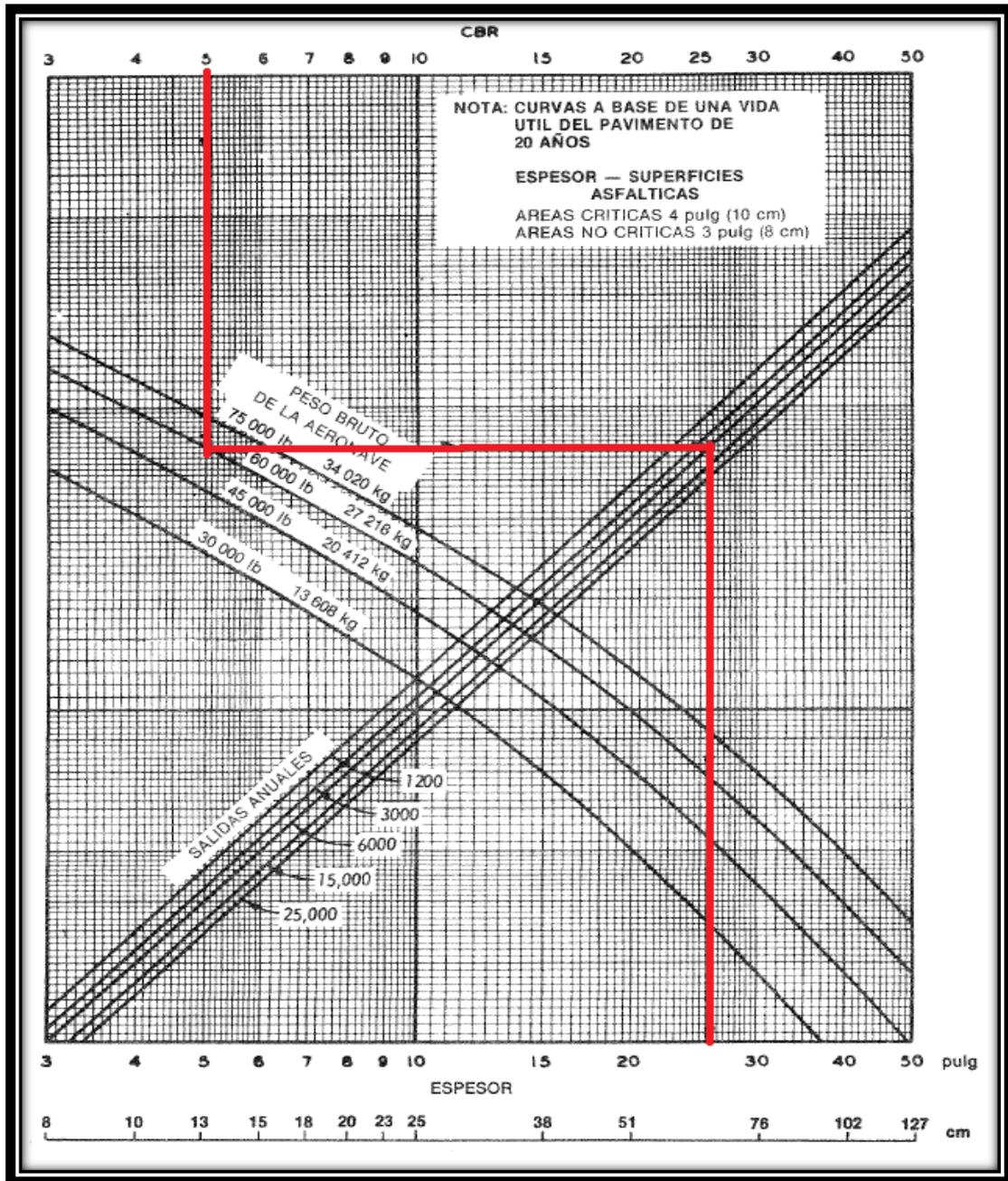


Imagen 7 Curvas de diseño de pavimentos flexibles para áreas críticas. Tren de rueda simple (Organización de Aviación Civil Internacional, 1983)

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

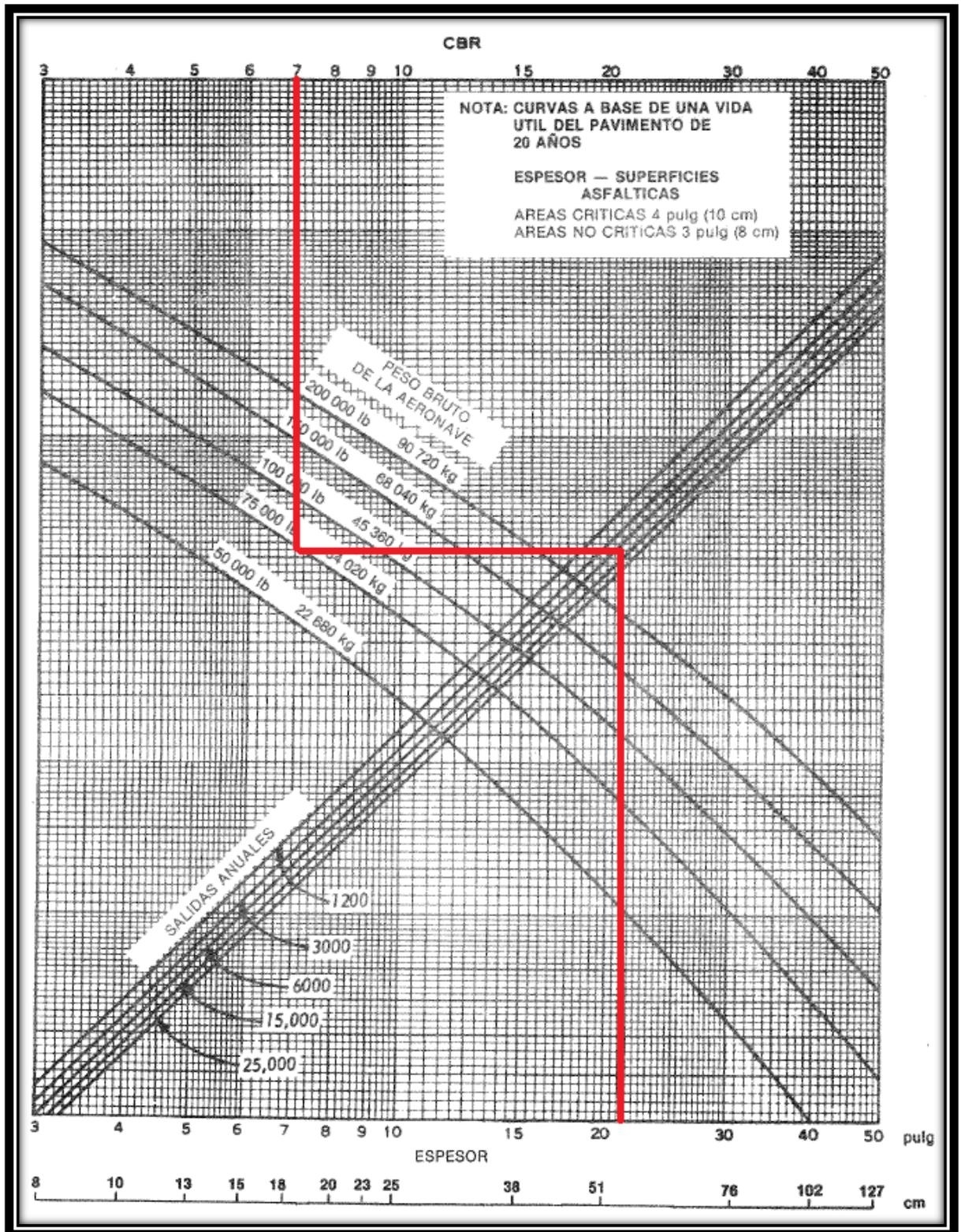


Imagen 8 Curvas de diseño de pavimentos flexibles para áreas críticas. Tren de ruedas gemelas (Organización de Aviación Civil Internacional, 1983)

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

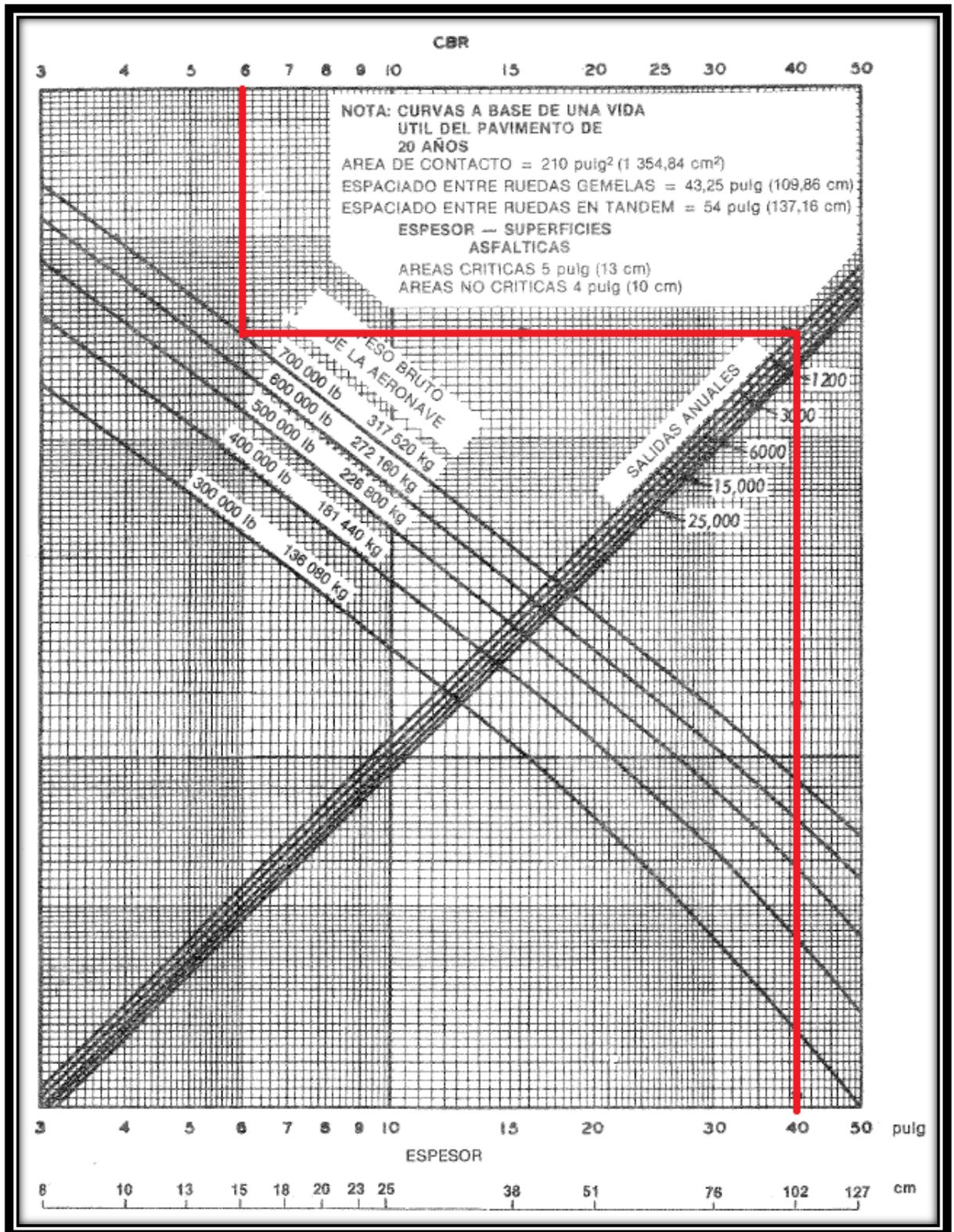


Imagen 9 Curvas de diseño de pavimentos flexibles para áreas críticas. B. 747 (Organización de Aviación Civil Internacional, 1983)

Como se ve claramente, este método es en cadena, que tiene aproximaciones sucesivas y que admite multitud de variantes de diseño. De la misma manera, el método es de poca garantía si no existe una idea preconcebida muy clara sobre la disposición que ha de darse a los materiales disponibles en el lugar.

3. DIFERENCIAS ENTRE PAVIMENTOS DE CARRETERAS Y DE AEROPUERTOS. EFECTOS EN EL PROYECTO Y MANTENIMIENTO.

3.1. Generalidades

La forma como trabajan los pavimentos de carreteras y aeropuertos, difieren en gran medida; por ejemplo, los pavimentos flexibles para carreteras, suelen presentar desperfectos en sus orillas, lo cual no ocurre en los correspondientes para aeropuertos.

Es necesario pues, señalar las diferencias esenciales entre ambas ramas, de las cuales se derivan dispares consecuencias, tanto en el proyecto como en la conservación. Estas diferencias se mencionan a continuación:

3.1.1. Vehículo de diseño

La carga de proyecto para una carretera con un Transporte Diario Promedio Anual (TDPA) grande, va del orden de 4.086 ton. en ruedas dobles y con repetición que varía entre 1, 000 y 8, 000 vehículos por día; en cambio, un avión pesado puede tener cargas por rueda mayores a 47.50 ton., pero solamente pueden considerarse de 20, 000 a 40, 000 cubrimientos para la vida útil del pavimento.

En el caso de las pistas, es actualmente más utilizado el concepto de cubrimiento que el de repetición. Un cubrimiento es el número de pasadas de una

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

rueda que es preciso efectuar para cubrir el tercio central de la pista con trayectorias paralelas contiguas.

La Imagen 10 muestra algunos tipos de aviones comerciales más utilizados actualmente.



Boeing 747



Boeing 777



Airbus A-340



Boeing 767



Airbus A-330



Boeing 757

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS



Boeing 737



Airbus A-350



Embraer 190



Airbus A320



Boeing 787



Airbus A-380

Imagen 10 Aviones comerciales más utilizados actualmente

3.1.2. Frecuencia de tráfico

En relación con la frecuencia del tráfico, la balanza en el número de cargas aplicadas por unidad de tiempo se inclina hacia las carreteras, en el que pueden

llegar a contabilizarse por miles a diario, frente a un aeropuerto que no alcanza tales cifras incluso en pistas con mucho tráfico aéreo.

La frecuencia del tráfico en carreteras, se determina con base en al Transito Diario Promedio Anual de cada carretera en particular.

Para los aeropuertos, la frecuencia del tráfico aéreo es muy diferente, ya que por medidas de control del tráfico aéreo, en ningún momento más de una aeronave pueden transitar por las pistas al mismo tiempo, así como tampoco pueden tener una distancia menor de entre 3 (5.561 m) y 5 millas náuticas (9.269 m) entre cada aeronave, que es la distancia suficiente para que la aeronave pueda aterrizar de manera segura y desalojar la pista para permitir el acceso a las subsecuentes aeronaves. Dicha distancia se dará en función de las velocidades de aproximación y las pistas de aterrizaje.

3.1.3. Canalización del tráfico

En la canalización del tráfico para carreteras, los camiones pesados deben circular por la extrema derecha del pavimento en promedio a 0.5 m del borde del mismo, mientras que la canalización del tráfico para aeropuertos será al centro de la pista sobre los 20.00 m centrales del pavimento, sin importar el tipo de avión que aterrice o despegue.

3.1.4. Cargas

Las aplicaciones de las cargas suelen referirse al concepto de repetición o cubrimiento; se dice que en una carretera o pista, ha tenido una repetición cuando ocurren dos pasadas sucesivas de una misma llanta por un mismo punto. Por ello la carga total de un avión es mayor que el de un camión, pero el número de repeticiones es mucho mayor en carreteras que en aeropuertos.

Los camiones que transitan por las carreteras según la NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008 sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, van del orden de 30 a 65 ton y son camiones unitarios hasta camiones doblemente articulados y pueden tener desde 6 hasta 34 llantas (9 ejes).

Para los aeropuertos las cargas son mucho mayores, aunque con menor frecuencia. La intensidad de carga de un avión al despegue, es diferente a la carga de un avión que aterriza.

A continuación se explica brevemente la composición de la carga de las aeronaves:

Peso total de despegue

Es el peso de la estructura de la aeronave, más la carga de paga, más el combustible y en función de este peso y de la disposición del tren de aterrizaje, se diseñará el pavimento.

Peso básico o vacío

Es el peso propio de la aeronave sin sobrecarga alguna.

Peso de operación

Es el peso básico más el equipo fijo de vuelo, más la tripulación (sin combustible ni carga).

Carga de paga

Es la que requiere de un pago para su transportación.

Peso máximo de aterrizaje

Es el peso máximo con el que puede aterrizar una aeronave sin sufrir daño alguno en su estructura.

Peso máximo de despegue

Es el peso máximo con el que puede despegar una aeronave y está limitado por el ascenso con falla de motor y siempre será mayor que el peso máximo de aterrizaje.

Combustible total requerido para el vuelo

Es la cantidad de combustible necesario para el rodaje en despegue y cubrir la ruta al aeropuerto de destino más el combustible de reserva al alterno.

Para calcular el combustible requerido, es necesario conocer el gasto por hora del avión, la velocidad del mismo, las condiciones meteorológicas a lo largo de la ruta y la distancia real de vuelo entre los aeropuertos (origen – destino).

Calcular el combustible de reserva es necesario para sobrevolar entre 30 y 45 minutos adicionales y poder llegar a un aeropuerto alterno.

Si por alguna circunstancia un avión tiene que aterrizar de emergencia, debe de ajustar su peso máximo permitido en el aterrizaje, en cuyo caso y dependiendo de la causa que origina la emergencia, la reducción del peso puede hacerse de diversas maneras: desalojando combustible o sobrevolando para quemar combustible.

El peso total de un avión, en general está constituido como lo indica la Tabla 4.

Peso vacío	Peso de fluidos Peso de motores Peso de fuselaje Peso de alas Peso de timón Peso de tren de aterrizaje Peso de cables Peso de ductos Peso de alfombras Peso de asientos etc.
	Aceite de motores
Peso de Operación	Equipos de vuelo Equipos de navegación Equipos de rescate Manuales de vuelo completo Tripulación Cocinas Servicios de abordaje
Carga de paga	Pasajeros Equipajes Carga Correo
	Peso del combustible de reserva
Peso de combustible	Peso del combustible a destino
	Peso del combustible en rodaje

Tabla 4 Peso total considerado en una aeronave

3.1.5. Velocidades máximas

Las velocidades de despegue y aterrizaje dependen del peso del avión, la elevación del aeropuerto y la densidad atmosférica.

Regularmente, un avión comercial mediano, como los aviones Boeing 737, de cualquier serie así como los Airbus 320 a 321, necesitan una velocidad promedio de 240 a 270 Km / h al momento del despegue a su máxima capacidad y para el aterrizaje, llega con velocidades que rondan los 280 Km / h. A mayor tonelaje de un avión, mayor será la velocidad de despegue; por ejemplo, un avión Airbus 340 o un Boeing 747 necesitan del orden de 300 Km / h para el despegue y para el aterrizaje llega con velocidades que rondan los 350 Km / h.

La velocidad máxima de circulación en las carreteras de México dependiendo del vehículo, va del orden de 70 hasta 110 km/h; en los aeropuertos la velocidad de las aeronaves al momento que toca pista es del orden de 230 a 300 km/h y en las salidas de las calles de rodaje de alta velocidad, las aeronaves circulan a velocidades de 90 km/h.

Dichas velocidades son independientes de las condiciones del pavimento de las pistas de los aeropuertos, mientras que para las carreteras, la velocidad del vehículo dependerá de las condiciones del pavimento.

3.1.6. Presión de contacto

La presión de las llantas para los camiones, va del orden de 4 a 6 kg/cm² (60 a 90 lb/pulg²), mientras que la presión de las llantas de las aeronaves, van del orden de 13 o 14 kg/cm² (aproximadamente 200 lb/pulg²); esto en función de la configuración del tren de aterrizaje y del peso bruto de la aeronave.

3.1.7. Geometría del pavimento

La geometría del pavimento es extremadamente importante. Las fallas más severas en un pavimento, ocurren donde el tráfico aéreo sigue una trayectoria determinada en las plataformas de estacionamiento, calles de rodaje y cabeceras de las pistas; las fallas más leves, generalmente ocurren en la porción central de las pistas, razón por la cual los espesores varían en las diferentes porciones ya mencionadas. De manera contraria, en las carreteras los espesores de los pavimentos generalmente se conservan constantes.

3.1.8. Ancho

Una de las principales diferencias está en el ancho. Las pistas de aterrizaje tienen una anchura promedio de 45 a 60 m, dependiendo de la clasificación del aeropuerto, del tráfico aéreo, de la envergadura y del ancho del tren de aterrizaje principal.

En carreteras, el ancho promedio varía de 7 m (carretera de dos carriles sin franja separadora) hasta 30 m (carreteras de 8 carriles con franja separadora).

3.1.9. Textura de la superficie

Tanto en carreteras como en aeropuertos, es muy importante que la textura del pavimento provea un adecuado coeficiente de fricción. El coeficiente de fricción puede verse afectado por la temperatura (principalmente en pavimentos flexibles), por lluvia, derrame de combustible, aceites y por desgaste de la propia superficie del pavimento.

El coeficiente de rozamiento disminuye al aumentar la velocidad del vehículo.

3.1.10. Drenaje

En muchas ocasiones, patologías de tipo estructural de los pavimentos, tienen su origen en defectos de drenaje siendo muy importante en ambas infraestructuras tanto en carreteras como en aeropuertos. El problema del drenaje cobra mayor relevancia en estos últimos, debido a que es necesario un mayor tiempo de evacuación por tratarse de áreas más extensas y pendientes menos pronunciadas.

3.1.11. Condiciones de operación

En cualquier carretera, es fácil modificar la velocidad de circulación de los vehículos para efectuar reparaciones cuando estas son necesarias, atender accidentes o para efectuar trabajos de mantenimiento rutinario. En los aeropuertos no es posible considerar esto, ya que la velocidad de las aeronaves no puede ajustarse por las condiciones del pavimento, por lo que no es sencillo realizar trabajos de mantenimiento o reparaciones sobre el pavimento de un aeropuerto que ya está en operación.

4. COMPARACIÓN ENTRE TIPOS DE PAVIMENTOS PARA USO EN AEROPUERTOS.

4.1. Generalidades

Los adjetivos rígido y flexible, nos proporcionan una idea sobre como los pavimentos reaccionan frente a las cargas, a las características mecánicas del suelo y al medio ambiente.

4.1.1. Comportamiento estructural

La principal diferencia entre el comportamiento de los pavimentos flexibles y los rígidos, es la forma como se distribuyen las cargas a la sub-rasante. Dada la rigidez de la losa, los esfuerzos que se transmiten a las capas inferiores del pavimento se distribuyen de una manera prácticamente uniforme, cosa contraria a lo que sucede con los pavimentos flexibles en donde las cargas concentran un gran porcentaje de su esfuerzo, exactamente debajo del punto de aplicación de la carga y van disminuyendo conforme se alejan de la misma, como puede apreciarse en la Imagen 11.

La distribución uniforme de las cargas, permite que los esfuerzos máximos que se transmiten al pavimento sean significativamente menores en magnitud, lo que permite una mejor condición y menor deterioro de las capas inferiores del pavimento.

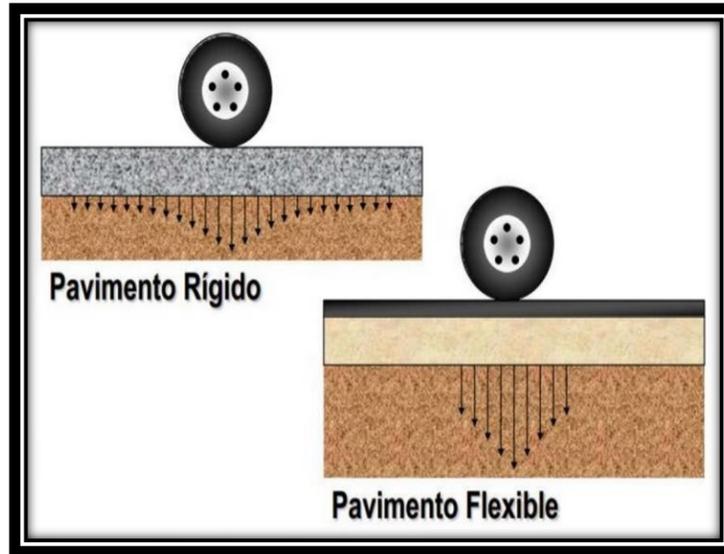


Imagen 11 Distribución de cargas en pavimentos

4.1.2. Tipos de deterioros

La mayor parte de la tecnología que la ingeniería de pavimentos ha ido desarrollando, tiene por objeto aceptar las cargas evitando la aparición de deterioros, que se han ido tipificando y describiendo con el mayor detalle compatible con el nivel del conocimiento y en los que aún más importante, se ha logrado ir estableciendo una relación causa-efecto, que permite desarrollar todo un conjunto de criterios de proyecto, de construcción y conservación.

Los deterioros de los pavimentos pueden dividirse en tres grupos fundamentales, de origen bien diferenciado:

4.1.2.1. Por insuficiencia estructural

Se trata de pavimentos construidos con materiales inapropiados en cuanto a resistencia o con materiales de buena calidad, pero en espesor insuficiente. En

términos generales, este es el deterioro que se produce cuando las combinaciones de la resistencia a los esfuerzos de cada capa y los respectivos espesores, no son los adecuados para que se establezca un mecanismo de resistencia apropiado para las cargas a las que estará sujeto.

4.1.2.2. Por defectos constructivos

Se trata de pavimentos bien proporcionados y formados por materiales suficientemente resistentes, pero en cuya construcción se han producido errores o defectos que comprometen el comportamiento conjunto.

4.1.2.3. Por fatiga

Se trata de pavimentos que originalmente estuvieron en condiciones apropiadas, pero que por el incremento en el peso de las aeronaves y/o por la continuada repetición de las cargas, terminan sufriendo efectos de fatiga, degradación estructural y, en general, pérdida de resistencia y deformación acumulada. Como quiera que estos fenómenos están grandemente asociados al número de repeticiones de la carga, las fallas de fatiga resultan claramente influidas por el tiempo de servicio; son las fallas típicas de un pavimento que durante mucho tiempo trabajó sin problemas.

4.1.3. Deterioros en pavimentos flexibles

Los deterioros dentro de las tres grandes categorías arriba anotadas, se agrupan a su vez en las subcategorías de:

- Desprendimientos

- Alisamientos
- Exposición de agregados
- Deformaciones
- Agrietamientos



Imagen 12 Baches en calles de rodaje

Por su origen, conviene agrupar los deterioros de los pavimentos flexibles por el modo en que suceden y se manifiestan. La Tabla 5 los ilustra:

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

Deterioros de la Superficie	Desprendimientos	Pérdida de Agregados
		Pérdida de capa de rodadura
	Alisamientos	Exudación del cementante
		Desgaste de áridos
	Exposición de Agregados	Pérdida del cementante
Deterioros de la Estructura	Deformaciones	Rodera
		Canalizaciones
		Baches profundos
		Ondulaciones y Corrimientos
	Agrietamientos	Grietas longitudinales
		Grietas transversales
		Fisuras, solas o en retícula
		Piel de cocodrilo

Tabla 5 Tipos de fallas en los pavimentos flexibles

En la Imagen 12 e Imagen 13 se muestran algunos tipos de deterioros en los pavimentos flexibles.



Imagen 13 Bacheo, grietas y roderas en pistas

4.1.4. Deterioros en pavimentos rígidos

Por su origen, conviene agrupar los deterioros de los pavimentos rígidos por el modo en que suceden y se manifiestan.



Imagen 14 Grietas de esquina y longitudinales en calles de rodaje

En la Tabla 6 se mencionan a continuación:

Juntas	Deficiencias del Sellado
	Juntas Saltadas
	Separación de la Junta Longitudinal
	Separación de la Junta Transversal
Grietas	Grietas de Esquina
	Grietas Longitudinales
	Grietas Transversales
Deterioro Superficial	Fisuramiento por Contracción
	Desintegración de la Mezcla
	Bombeo por falla del suelo en juntas

Tabla 6 Tipos de fallas en los pavimentos rígidos

En la Imagen 14 e Imagen 15 se muestran algunos tipos de deterioros en los pavimentos rígidos.



Imagen 15 Grietas de esquina y longitudinales en pistas

Mantenimiento

Los pavimentos de concreto hidráulico, se han caracterizado por requerir de un mínimo mantenimiento a lo largo de su vida útil; sin embargo, es muy importante que el mismo se provea en tiempo y forma adecuados para garantizar las propiedades del pavimento.

Los pavimentos asfálticos se han caracterizado de manera inversa; estos requieren de un mayor y constante mantenimiento a lo largo de su vida útil.

Costos Totales

Los costos totales son los que incluyen los costos de construcción y los costos de mantenimiento. Por un lado tenemos los pavimentos flexibles donde el costo de construcción es relativamente bajo en comparación con los costos de construcción de los pavimentos rígidos; pero por el otro lado, tenemos los costos de mantenimiento para los flexibles, los cuales tienden a ser mayores ya que estos deben repetirse con mayor regularidad al caso contrario de los pavimentos rígidos,

donde su costo de mantenimiento es menor a causa de la baja periodicidad que se requiere en el mismo.

Durabilidad

Las superficies de los pavimentos rígidos tienden a durar más que el de los pavimentos flexibles. Estadísticamente, las superficies de los pavimentos de aeropuertos han soportado hasta el doble de veces su capacidad de carga de diseño, ya que el concreto incrementa su resistencia con el tiempo.

Indeformabilidad

En este apartado, el pavimento rígido es mejor que el pavimento flexible, ya que en las zonas de arranque y frenado de los aviones, el pavimento rígido no se deforma, al contrario del pavimento flexible el cual con el paso del tiempo presenta ondulaciones en la superficie del mismo. Lo anterior mencionado, depende en gran medida de la deformabilidad que pueda presentar la sub-rasante.

Rugosidad

Los pavimentos rígidos tienden a producir el desgaste prematuro de los neumáticos, debido a que ocasionalmente se da una diferencia de altura entre dos losas de concreto y a la rugosidad de la superficie cuando se emplean agregados gruesos.

Por el contrario, en pavimentos flexibles si la composición granulométrica superficial es demasiado fina, se alcanzas deslizamientos en tiempo húmedo que anulan la acción de los frenos de las ruedas, produciéndose el llamado acuaplaneo.

5. EJEMPLOS BÁSICOS DE DISEÑO. DETERMINACIÓN DEL AVIÓN CRÍTICO DE DISEÑO.

5.1. Generalidades

El avión crítico de diseño, es el avión para el que se dimensionan los elementos que conforman la infraestructura del aeropuerto hablando de la parte aeronáutica y será el que requiera mayores espesores de acuerdo a una cierta flota de aviones.

El avión crítico de diseño se determina considerando cada tipo de aeronave, el peso máximo de despegue, la configuración del tren de aterrizaje y el número de despegues que realizará al final del horizonte de proyección en el aeropuerto.

Es importante mencionar que para cada aeropuerto (dependiendo de sus necesidades), puede existir más de un avión crítico de diseño.

5.2. Dimensiones de la Aeronave

Las dimensiones de la aeronave son las siguientes, ver Imagen 16:

Longitud

Es la distancia que existe desde la punta de la proa hasta la cola o timón de dirección del avión.

Envergadura

Es la distancia transversal que existe entre los puntos extremos de las alas.

Radio de giro

Es la distancia que existe entre el centro de gravedad del tren de aterrizaje principal y el centro de giro. Dependerá de la base y ancho del tren de aterrizaje y el ángulo de giro del tren de proa.

Altura total

Es la distancia que existe desde el pavimento al punto más alto del avión.

Punto de referencia de la aeronave

Punto del eje longitudinal de la aeronave que sigue la línea de guía en tierra. En general se acepta que el punto de referencia, está situado verticalmente debajo del puesto del piloto de la aeronave.

Centro de viraje o giro

Centro de viraje de una aeronave en todo momento.

Longitud de referencia

Distancia entre el punto de referencia de la aeronave y el eje teórico que pasa por el tren de aterrizaje.

Centro del tren de aterrizaje principal

Punto de intersección del eje longitudinal de la aeronave y el eje transversal que pasa por el centro de gravedad del tren de aterrizaje principal.

Ancho de vía del tren de aterrizaje principal

Distancia entre las ruedas exteriores principales de la aeronave, incluyendo la anchura de las ruedas.

Ángulo de guía

Ángulo formado por la tangente a la línea de guía y el eje longitudinal de la aeronave.

Ángulo de guía de la rueda de proa

Ángulo formado por el eje longitudinal de la aeronave y la dirección de la rueda de proa.

Línea de guía

Línea indicada sobre el pavimento por medio de señales y/o luces, que el punto de referencia de la aeronave debe seguir durante el rodaje.

Centro de la línea de guía

Centro de curvatura de la línea de guía en el punto de referencia de la aeronave.

Desviación del tren de aterrizaje principal

Distancia entre el centro geométrico del tren de aterrizaje principal y la línea de guía, medida en un sentido perpendicular a esta última.

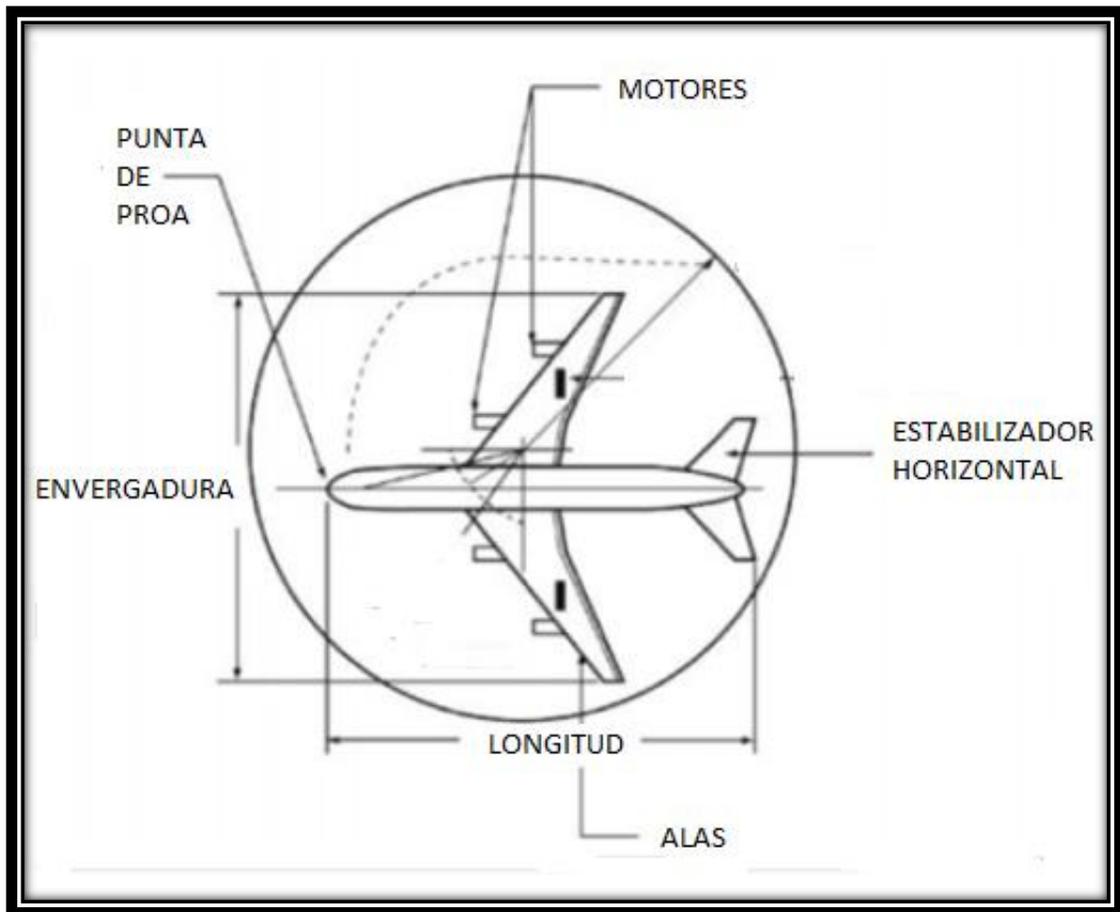


Imagen 16 Dimensiones de una aeronave

5.3. Determinación del Avión Crítico de Diseño

El avión crítico de diseño se puede determinar conforme a lo establecido en el método de diseño de la FAA para pavimentos o bien siguiendo lo establecido en el manual de diseño de aeródromos parte 3 pavimentos apartado 4.4.11.

Ambas publicaciones tienen por principio común la elección del avión crítico de diseño con base en aquella que requiera el mayor espesor de pavimento.

El manual de diseño de aeródromos establece lo siguiente:

El pronóstico de salidas anuales por tipo de aeronave da por resultado una lista de varias aeronaves diferentes. La aeronave de cálculo debería seleccionarse a base de la que requiera el mayor espesor de pavimento. Debería verificarse cada tipo de aeronave del pronóstico para determinar el espesor de pavimento requerido, utilizando la curva de cálculo apropiada, con el número de pronósticos de salidas anuales para cada aeronave. El tipo de avión que determine el espesor mayor de pavimento, es la aeronave de cálculo. La aeronave de cálculo no es necesariamente la aeronave más pesada del pronóstico. (Organización de Aviación Civil Internacional, 1983)

Entre las consideraciones más importantes del método de diseño de la FAA (AC 150/5320-6E) se tienen:

- Se asume que el tráfico aéreo se distribuye normalmente en la sección transversal del pavimento.
- Los pavimentos se diseñan con análisis de cargas estáticas.
- Se considera que las cargas de impacto no incrementan el espesor requerido.
- Los pavimentos se diseñan para una vida útil de 20 años.
- El espesor final depende de:
 - a) Magnitud y características de cargas.
 - b) Volumen de tráfico (despegues).

- c) Concentración de tráfico en ciertas áreas.
- d) Calidad de sub-rasante y materiales componentes del pavimento.

Cuando el avión más pesado que compone la flota es mayor a 30, 000 lbs, pero no incluye el Boeing 777, se procede a diseñar el pavimento para aviones pesados mediante el método C.B.R., el cual es un método empírico pero respaldado con mucha investigación, presentando correlaciones muy confiables. Las curvas de diseño entregan el espesor total de pavimento requerido (capa de rodadura + base + sub-base).

Los aviones se clasifican bajo las siguientes consideraciones: de cargas, presión de neumáticos y volumen de tráfico. Las cargas se basan en el peso bruto del avión y se diseña para el máximo peso de despegue del avión; la presión de neumáticos varía entre 75 y 200 psi, dependiendo de la configuración de ejes y peso bruto.

Para el diseño se requiere del pronóstico de salidas anuales por tipo de avión.

El procedimiento de diseño de pavimento de la FAA, solo considera las salidas por cuanto a las operaciones de entrada, al tener las aeronaves un nivel de combustible menor que en las operaciones de salida y por tanto no aportan al pavimento niveles de tensiones de carga considerables.

La aeronave crítica de diseño, se determina considerando cada tipo de aeronave, su peso máximo de despegue, la configuración de su tren de aterrizaje y su número de operaciones. Usando el programa de la FAA, "Flexible Pavement Desing AC 150/5320-6F", el cual procesa internamente los nomogramas de diseño

que se encuentra en el documento ya citado, puede determinarse el espesor total del pavimento incluyendo los espesores de la capa de rodadura, la base y la Subbase. La sección de pavimento de mayor espesor derivada por este método, determina cuál aeronave es la aeronave crítica de diseño.

Este procedimiento para encontrar el espesor del pavimento, se puede realizar también a través del uso del programa COMFAA V 2.0, programa desarrollado por la FAA que permite realizar tanto el Diseño de los Pavimentos como obtener el valor del ACN (Aircraft Classification Number).

6. ESPECIFICACIONES Y PLANOS DE CONSTRUCCIÓN. INTEGRACIÓN CON OTROS PROYECTOS, CÁLCULO DE TRANSICIONES, CURVAS DE INTERACCIÓN, OBRAS DE DRENAJE, AYUDAS VISUALES.

6.1. Generalidades

La importancia de una pista de aterrizaje bien construida, influye en la seguridad del personal que la usa, en la conservación de la aeronave y en la economía de operación y mantenimiento de un aeropuerto. La vida útil de una pista aérea de despegue y de aterrizaje bien ejecutada, puede llegar hasta a los 30 años en buenas condiciones y extenderse hasta por 15 más con un adecuado mantenimiento.

6.2. Proyecto de Pistas

Para lograr pistas de aterrizaje adecuadas según los estrictos estándares de calidad internacionales regidos por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), se tienen lugar una serie de estudios previos que incluyen el de mecánica de suelos para saber sobre qué tipo de terreno se va a trabajar y, en consecuencia, el tratamiento idóneo, ya que no es lo mismo calcular la resistencia de una pista sobre un terreno rocoso, que sobre uno arcilloso, de terraplén u otro.

Asimismo, se realizan estudios hidrológicos para saber la cantidad de agua contenida en el subsuelo, así como para detectar la presencia de posibles cavidades que pusieran en riesgo la estabilidad de la cimentación, ocasionando fracturas al no ser rellenadas. Con estos estudios, también se puede conocer la presencia de vestigios de antiguos ríos ya rellenados por la tierra, causantes de escurrimientos en determinadas épocas del año. Aunado a esto, se realizan análisis meteorológicos que arrojan información sobre el espesor de la niebla, tipo de vientos del lugar (cruzados, adversos, etc.) su fuerza y orientación, valores a considerar al momento de ubicar la pista.

También se efectúan estudios geográficos para identificar la presencia de obstáculos visuales de tipo natural, como elevaciones considerables del terreno o vegetación. Al respecto, existe un documento de servicios para la navegación en el espacio aéreo mexicano, que orienta sobre el particular. En ocasiones son recomendados análisis socioeconómicos y demográficos para hacer un estimado de crecimiento poblacional de la zona y, sobre esa base, planear la capacidad de la pista o su posible ampliación a futuro.

El segundo dato importante, es la capacidad portante del terreno natural sobre el que será desplantada la pista, a partir de lo cual es diseñada la estructura de soporte de las losas de concreto sobre las cuales se edificará la superficie de rodamiento y, finalmente, la capacidad estructural, que integra en su conjunto todo el pavimento. Cabe explicar que la capacidad portante, es la que determina de qué espesor serán las losas de concreto de la superficie de rodamiento. Entre las principales metodologías para diseñar el espesor de las losas de concreto, están las de la American Civil Pavement Association y la de la Portland Cement Association (PCA) que contemplan dichas variables.

Posteriormente, se inicia el trabajo con el despalme del terreno, dejándolo totalmente limpio de materia vegetal; se excavan aproximadamente de 20 a 30 cm y se coloca la capa sub-rasante realizada con material granular extraído de bancos aledaños a la región. A continuación, sigue la colocación de la sub base compuesta por material que mantiene el agua alejada de la estructura del pavimento.

El material debe ser de fácil compactación y generalmente consiste en tepetate o arcillas; continúa la base y finalmente el tendido de la carpeta cuyo espesor varía de acuerdo con la resistencia requerida, pero generalmente es de 40 cm. Es usual que las cabeceras de las pistas lleguen a tener hasta 48 cm.

Actualmente las mezclas de concreto han sido modificadas a tal punto, que están diseñadas para soportar esfuerzos de flexión con especificaciones de textura para favorecer la fricción, la resistencia al desplazamiento y que exista una buena adherencia entre el neumático del avión y el pavimento. Este texturizado consiste en un rayado longitudinal; adicionalmente se puede aplicar una membrana hecha con telas de yute para brindar cierta rugosidad al pavimento, con la recomendación de dejar una pendiente transversal para drenar el agua de lluvia (que es una de las condiciones críticas del diseño), evitando así el acuaplaneo.

Respecto a la composición de la mezcla, lo más recomendable es elaborarla in situ para lograr y mantener las mejores condiciones y exactitud respecto a los requerimientos iniciales; se recomienda un mezclado uniforme, homogéneo (preferentemente una mezcla seca) y pueden agregarse los aditivos normales como un plastificante y un reductor de agua. Es recomendable hacer pruebas al diseño de mezcla, para verificar el cumplimiento de las especificaciones predeterminadas respecto a las propiedades físicas: módulo de

ruptura, flexión, tensión, revenimiento y rendimiento promedio. En ciertas ocasiones son realizadas pruebas de petrografía al concreto endurecido, para saber cómo están desarrollándose sus diferentes fases químicas, con lo que queda garantizado el resultado requerido.

6.3. Proyecto de Calles de Rodaje

Una calle de rodaje, es parte de la infraestructura de un aeropuerto que permite conectar las zonas de hangares y terminal, con la pista de aterrizaje.

Requisitos funcionales

El diseño del sistema de calles de rodaje deberá:

- Reducir al mínimo las restricciones a los movimientos de aeronaves entre las pistas de aterrizaje y las plataformas de estacionamiento en terminales.
- Permitir atender (sin considerable demora) la demanda de llegadas y salidas de aeronaves para el sistema de pistas.

Principios de planificación

Las pistas y calles de rodaje, son los elementos menos flexibles del aeropuerto y por lo tanto, deben tenerse en cuenta en primer lugar cuando se planifica la construcción del mismo.

El trayecto descrito por las calles de rodaje deberá:

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

- Conectar los diversos elementos del aeropuerto utilizando las distancias más cortas, para reducir al mínimo el tiempo de rodaje y el coste.
- Evitar las áreas en las que el público pueda tener fácil acceso a las aeronaves.
- Existir un número suficiente de calles de rodaje de entrada y salida, que sirvan a determinada pista para atender el tráfico aéreo más intenso de aeronaves que despeguen y aterricen en un momento dado.

Las calles de rodaje situadas en las plataformas de estacionamiento se dividen en:

- Línea de entrada al puesto de estacionamiento de aeronaves, ver Imagen 17.
- Calle de acceso al puesto de estacionamiento de aeronaves, ver Imagen 17.

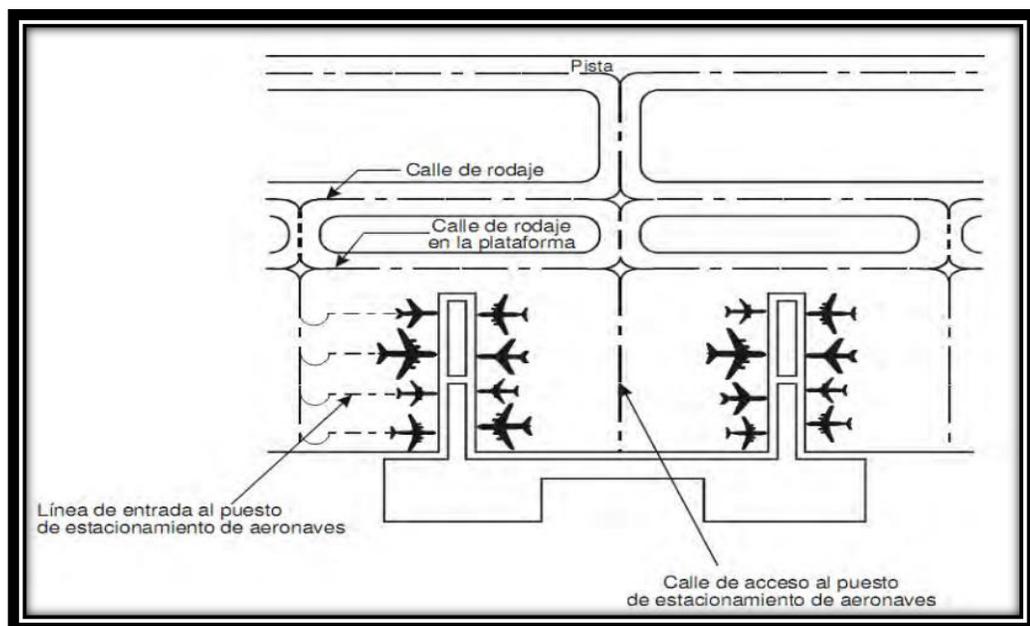


Imagen 17 Calles de rodaje en plataformas de estacionamiento

Distancias de rodaje de las aeronaves

En todo plan general para aeropuertos, independientemente de la magnitud del proyecto, deberá reconocerse la necesidad de reducir al mínimo las distancias de rodaje, especialmente para las aeronaves que despegan, tanto por razones de economía como de seguridad.

6.4. Proyecto de Plataformas de Estacionamiento

Las plataformas son áreas definidas principalmente situadas junto al edificio terminal de los aeropuertos y su fin es para el estacionamiento de las aeronaves para el embarque o desembarque de pasajeros, correo o carga, reaprovisionamiento de combustible, mantenimiento etc.

Requisitos de Proyecto

- Seguridad: El diseño debe tener en cuenta la seguridad que se debe brindar a las maniobras de las aeronaves.
- Configuración geométrica: La superficie total depende del tamaño de las aeronaves, los márgenes de separación, el método de estacionamiento, la disposición geométrica de las calles de acceso a los puestos de estacionamiento de aeronaves, de las zonas de parqueo de los vehículos de mantenimiento, de los caminos utilizados para el desplazamiento de los mismos, etc.

- Variedad en el tamaño de las aeronaves: El número y tamaño de los puestos de estacionamiento debe ajustarse al número y dimensiones de los tipos de aeronaves que se espera utilizarán la plataforma.
- Pavimento: La elección del pavimento depende del peso de la aeronave, de la distribución de la carga, del estado del suelo y el costo relativo de los materiales que se elijan.
- Pendiente del pavimento: Las pendientes de la plataforma deben tener los valores mínimos suficientes para impedir la acumulación de agua.



Imagen 18 Plataformas de Estacionamiento de la T2 del AICM

6.5. Ayudas Visuales

La OACI considera como “ayudas visuales”, todos aquellos elementos expuestos a la vista de los pilotos que se utilizan para el guiado de la aeronave;

también son indicaciones pintadas si son señales de pista (generalmente de color blanco), señales de calle de rodaje y puntos de estacionamiento (generalmente de color amarillo).

Las ayudas visuales consisten en: luces de borde de pista, de ejes de pista, de eje en los rodajes —Alfa, Bravo, Coca, Delta, Eco, Québec y rodaje paralelo Alfa— en zona de hangar; luces de zona de contacto en cabecera 15, en 900 metros de longitud; luces de aproximación y destello en cabecera 30; luces de borde de rodaje; lámparas de borde de parada en todos los rodajes sistema PAPI, sistema de monitoreo y control de luces de ayudas visuales.

6.4.1. Indicadores y dispositivos de señalamiento

Son elementos que se disponen de tal manera que puedan ser vistos desde el aire, es decir, señales terrestres para comunicarse con las aeronaves en vuelo.

También son símbolos o grupo de símbolos expuestos sobre las pistas con el fin de transmitir información aeronáutica.

6.4.1.1. Indicador de la dirección de aterrizaje

Ubicación

Cuando se provea un indicador de la dirección de aterrizaje, se emplazará el mismo en un lugar destacado del aeropuerto.

Características

El indicador de la dirección de aterrizaje deberá ser en forma de “T”. La forma y dimensiones mínimas de la “T” de aterrizaje serán las que se indican en la

Imagen 19. El color de la “T” de aterrizaje será blanco o anaranjado eligiéndose el color que contraste mejor con el fondo contra el cual el indicador debe destacarse.

Cuando se requiera para el uso nocturno, la “T” de aterrizaje deberá estar iluminada, o su contorno delineado mediante luces blancas.

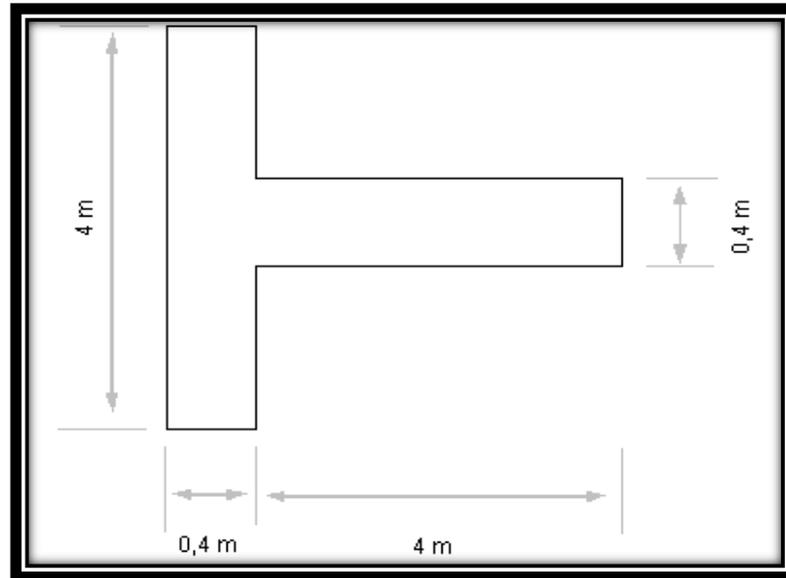


Imagen 19 Dimensiones del indicador de la dirección del aterrizaje (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)



Imagen 20 Ejemplos de paneles de señales

6.6. Señales

Se colocaran señales en toda la pista, para efectuar operaciones tanto diurnas como nocturnas; las señales de la superficie de los pavimentos, deberán ser de material retroreflejante diseñado para mejorar la visibilidad de las mismas.

Las señales ubicadas en el pavimento de las pistas, se mencionan a continuación:

a) Señal designadora de pista

Una señal designadora de pista consistirá en un número de dos cifras, y en las pistas paralelas, este número irá acompañado de una letra. Este número de dos cifras, será el entero más próximo a la décima parte del azimut magnético del eje de la pista, medido en el sentido de las manecillas del reloj a partir del norte magnético. Por ejemplo, la pista 09 tendrá el eje orientado a 90° con respecto al norte magnético. Esa pista, en el sentido contrario será la 27.

Para dos pistas paralelas: "L" "R";

Para tres pistas paralelas: "L" "C" "R";

Para cuatro pistas paralelas: "L" "R" "L" "R";

Para cinco pistas paralelas: "L" "C" "R" "L" "R" o "L" "R" "L" "C" "R", y

Para seis pistas paralelas: "L" "C" "R" "L" "C" "R".

Por ejemplo, en el caso de pistas paralelas, la pista 20 L será la pista izquierda, orientada a 200° con respecto al norte magnético.

Los números y letras tendrán la forma y proporciones se indican en la Imagen 21.

b) Señal eje de pista

Una señal de eje de pista, como se muestra en la Imagen 22, consistirá en una línea de trazos uniformemente espaciados. La longitud de un trazo más la del intervalo no será menor de 50 m ni mayor de 75 m. La longitud de cada trazo será por lo menos igual a la longitud del intervalo, o de 30 m tomándose la que sea mayor.

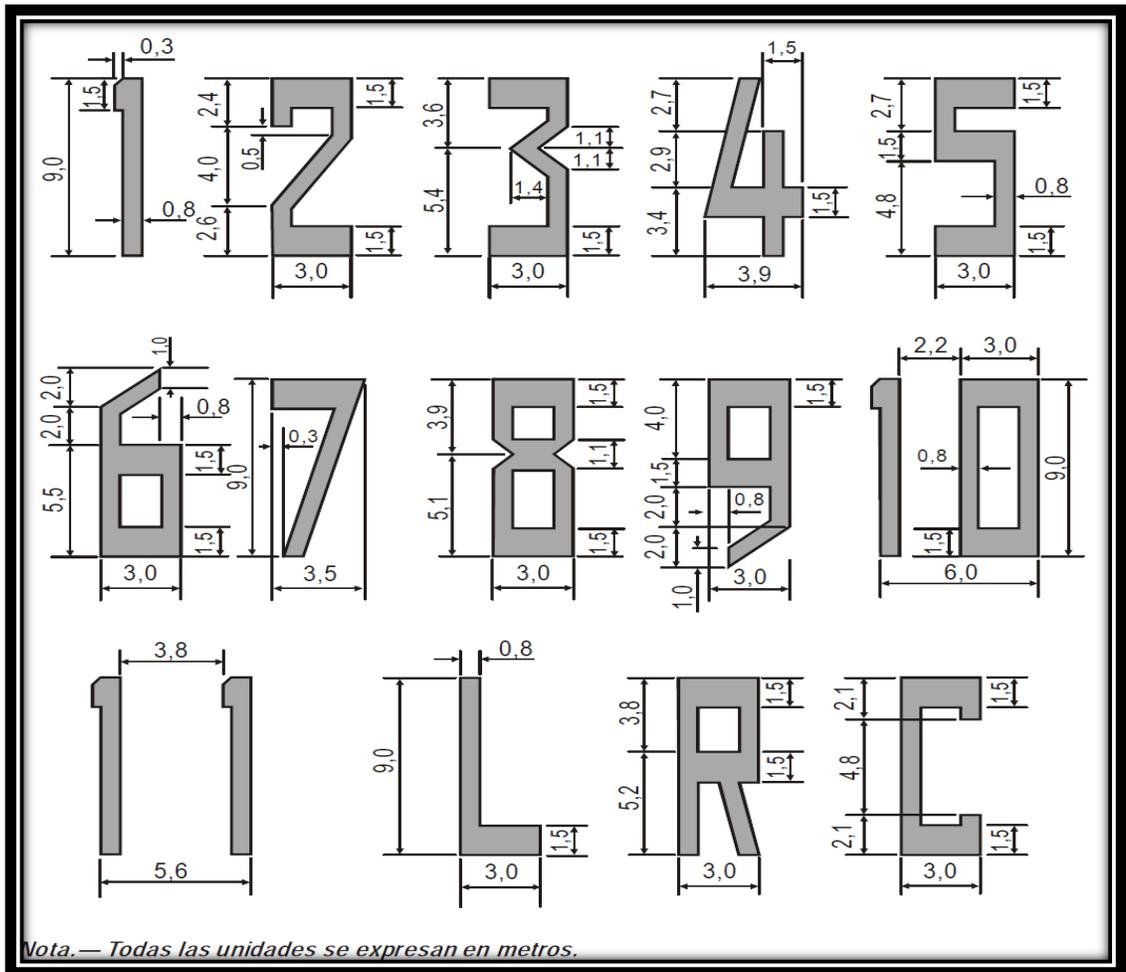


Imagen 21 Forma y proporciones de los números y letras de la señales designadoras de pista (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)

Las señales de eje de pista, se dispondrán a lo largo del eje de toda la pista entre las señales designadoras de pista, tal que como se indica en la Imagen 22

La anchura de los trazos no será menor de:

0.90 m en las pistas para aproximaciones que no sean de precisión de categorías II y III;

0.45 m en pistas para aproximaciones que no sean de precisión cuyo número de claves sea 3 ó 4 y en pistas para aproximaciones de precisión de categoría I; y

0.30 m en pistas para aproximaciones que no sean de precisión cuyo número de clave sea 1 ó 2 y, en pistas de vuelo visual.

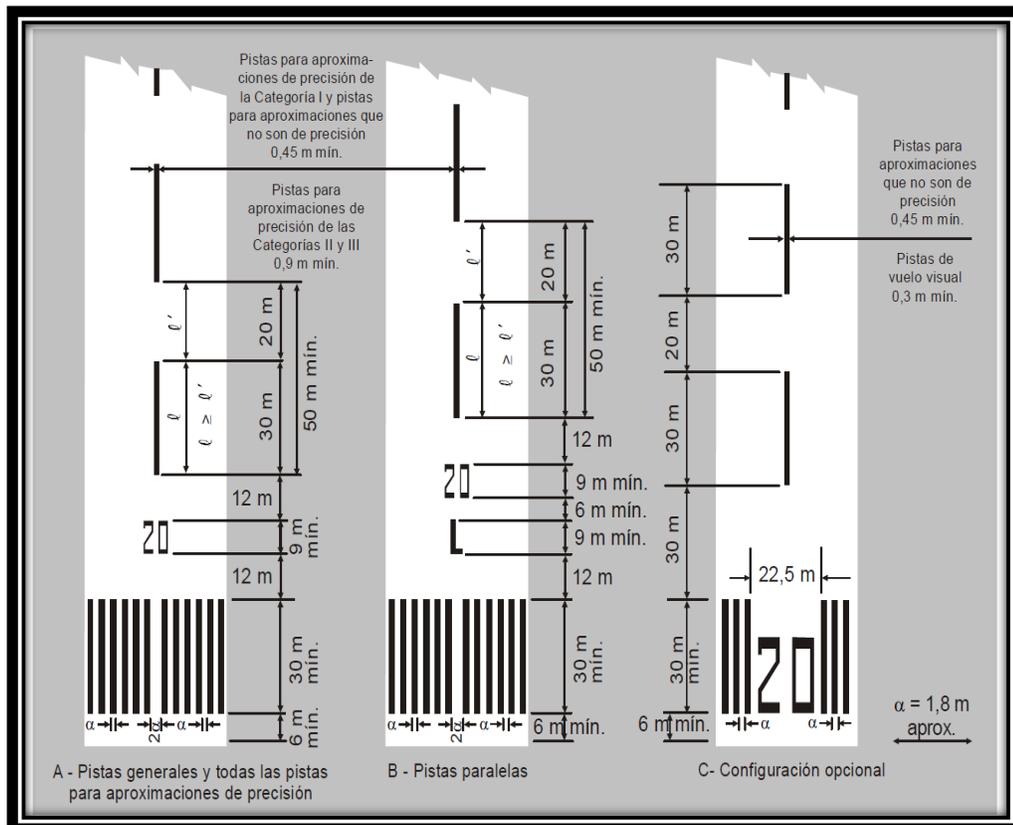


Imagen 22 Señal de eje y umbral (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)

c) Señal umbral

Una señal de umbral de pista, consistirá en una configuración de fajas longitudinales de dimensiones uniformes dispuestas simétricamente con respecto al eje de la pista, como se muestra en la Imagen 22 y la Imagen 23. El número de fajas estará de acuerdo con la anchura de la pista, conforme a la Tabla 7.

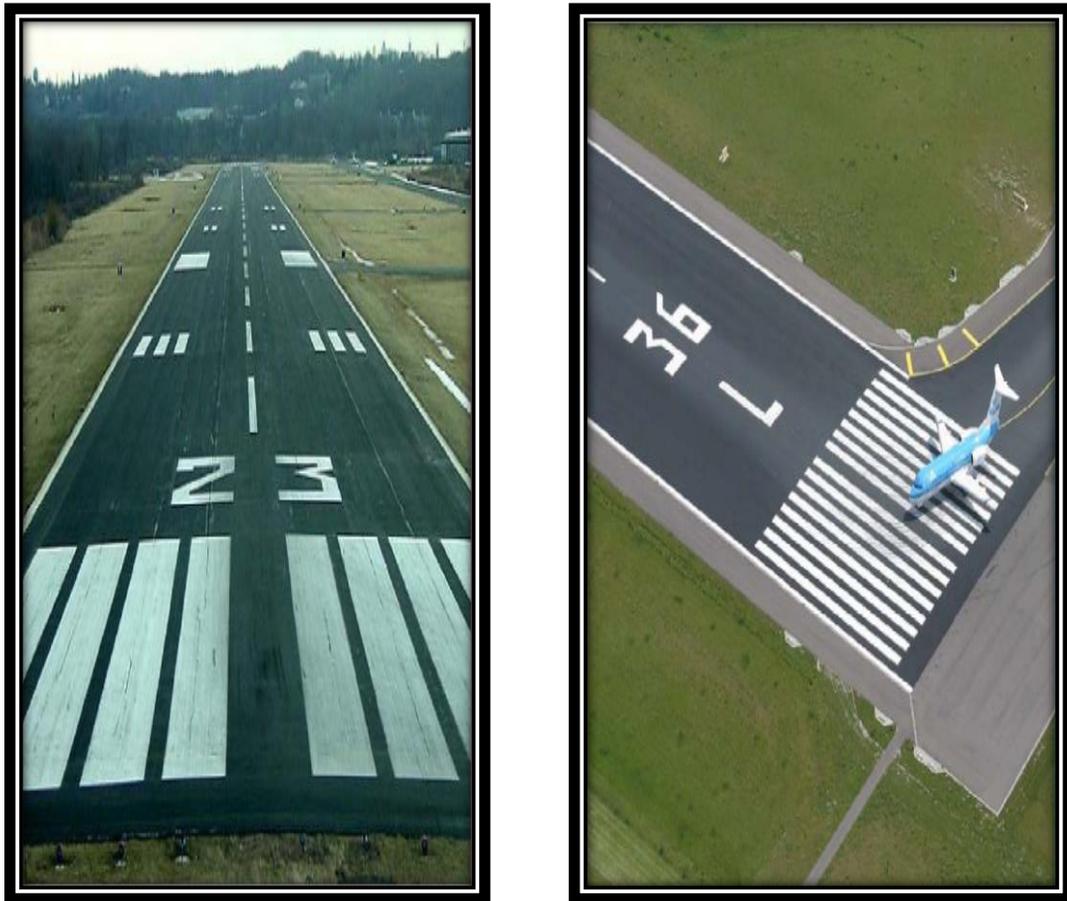


Imagen 23 Ejemplos de señales en pista

Ancho de la pista (m)	Número de fajas
18	4
23	6
30	8
45	12
60	16

Tabla 7 Número de fajas de la señal de umbral (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)

Dichas fajas, empezarán a 6 m del umbral y se extenderán lateralmente hasta un máximo de 3 m del borde de la pista o hasta una distancia de 27 m a cada lado del eje de la pista, según se requiera.

Se dispondrá de una señal de umbral en las pistas pavimentadas de vuelo por instrumentos y en las pistas pavimentadas de vuelo visual cuyo número de clave sea 3 ó 4 y estén destinadas al transporte aéreo comercial internacional.

d) Señal de punto visada o señal de distancia fija

La señal de punto de visada, como la que se muestra en la Imagen 24, consistirá en dos fajas bien visibles; las dimensiones de las fajas y el espaciado lateral entre sus lados internos, se ajustarán a las disposiciones estipuladas en la columna apropiada de la Tabla 8. Cuando se proporcione una zona de toma de contacto, el espaciado lateral entre las señales será el mismo que el de la zona de toma de contacto.

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

Emplazamiento y dimensiones (1)	Distancia disponible para aterrizaje			
	Menos de 800 m (2)	800 m hasta 1 200 m (exclusive) (3)	1 200 m hasta 2 400 m (exclusive) (4)	2 400 m y más (5)
Distancia entre el umbral y el comienzo de la señal	150 m	250 m	300 m	400 m
Longitud de la faja	30-45 m	30-45 m	45-60 m	45-60
Anchura de la faja	4 m	6 m	6-10 m ^b	6-10m ^b
Espacio lateral entre los lados internos de las fajas	6 m ^c	9 m ^c	18-22,5 m	18-22,5 m
a Está previsto utilizar las dimensiones mayores, dentro de la gama especificada, cuando se necesite una mayor visibilidad.				
b El espacio lateral puede variar dentro de los límites indicados, a efectos de minimizar la contaminación de la señal por los depósitos de caucho				
c Se han calculado estas cifras mediante referencias a la anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal, que constituye el elemento 2 de la clave de referencia de aeródromo.				

Tabla 8 Emplazamiento y dimensiones de la señal de punto de visada (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)

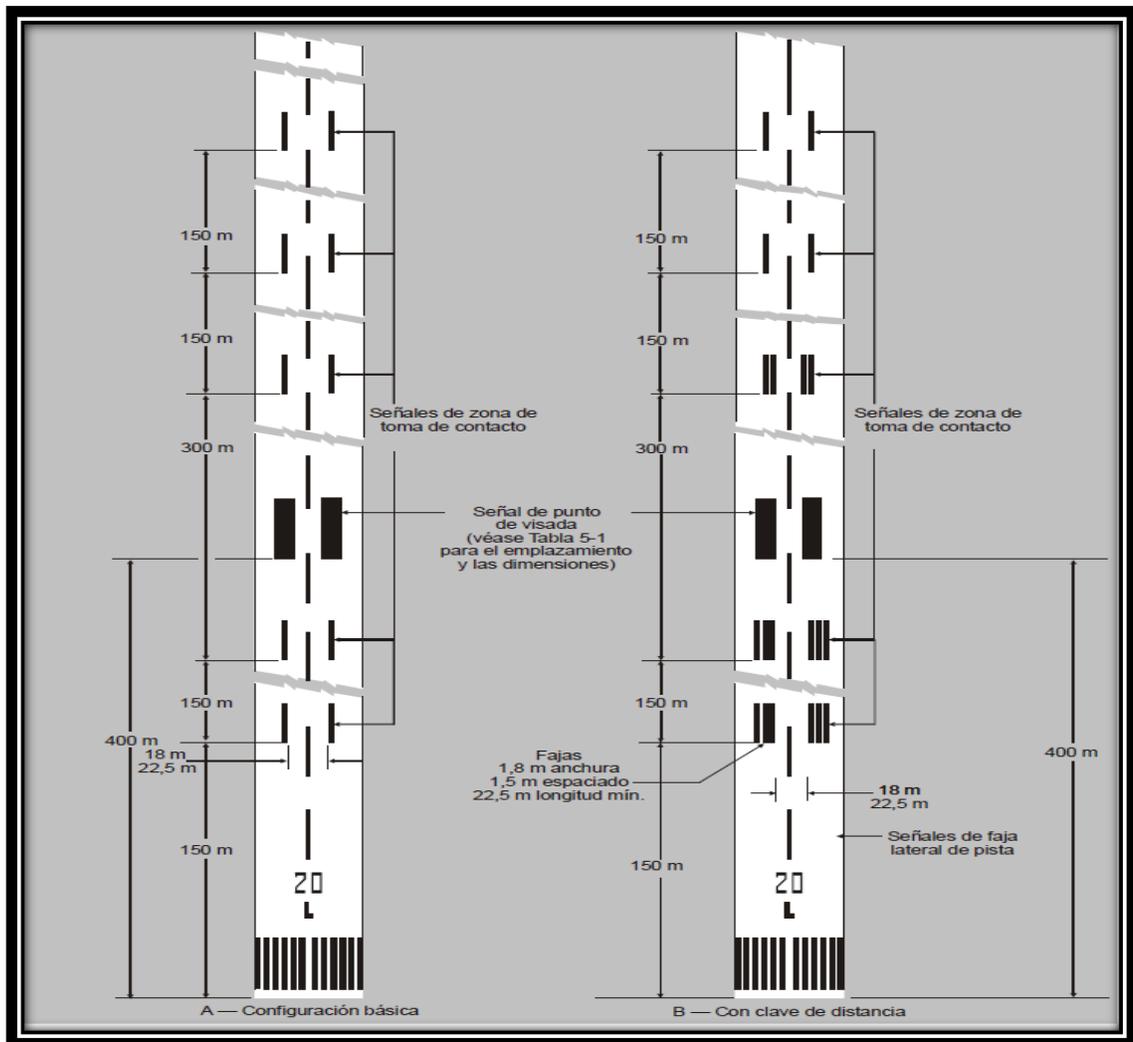


Imagen 24 Señales de punto visada, de zona de toma de contacto y de faja lateral de pista (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)

e) Señal zona de toma de contacto de pista de aterrizaje

Una señal de zona de toma de contacto, como se muestra en la Imagen 24, consistirá en pares de señales rectangulares, dispuestas simétricamente con respecto al eje de la pista; el número de esos pares guardará, con la distancia entre umbrales, cuando deba colocarse en ambos sentidos de aproximación de una pista; las relaciones siguientes se muestran en la Tabla 9.

Distancia de aterrizaje disponible o distancia entre umbrales	Par (es) de señales
Menos de 900 m	1
De 900 a 1,200 m	2
De 1,200 a 1,500m	3
De 1,500 a 2,400m	4
2,400m o mas	6

Tabla 9 Relación de pares de señales de toma de contacto (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)

f) Señal de faja lateral de pista

Una señal de faja lateral de pista, como la que se muestra en la Imagen 24, deberá consistir en dos fajas dispuestas una a cada lado a lo largo del borde de pista, de manera que el borde exterior de cada faja coincida con el borde de la pista, excepto cuando la pista tenga más de 60 m. de ancho, en cuyo caso las fajas deberán estar dispuestas a 30 m. del eje de la pista.

La señal de faja lateral de pista, deberá tener una anchura total de 0.90 m. como mínimo en las pistas con anchura de 30 m o más y por lo menos de 0.45 m. en las pistas más estrechas.

6.7. Iluminación de Pistas

La iluminación de pistas, es de suma importancia para la buena orientación y apoyo de los pilotos de las aeronaves para realizar un despegue o aterrizaje, predominantemente de manera nocturna y en caso de condiciones adversas, de manera diurna.

Es por esto que las luces en la superficie de las pistas, zonas de parada, calles de rodaje y plataformas de estacionamiento, deberán ser diseñadas y dispuestas de manera tal que soporten el paso de las ruedas de una aeronave sin que se produzcan daños a la aeronave ni a las luces. Ver Imagen 25 e Imagen 26.

a) Luces de entrada a la pista

Las luces de entrada a la pista, se instalan para proporcionar una guía visual a lo largo de una trayectoria de aproximación determinada; cada grupo de luces deberá estar integrado por un mínimo de tres luces de destellos, dispuestas en línea o agrupadas.

b) Luces de borde de pistas

Las luces de borde de pista, se emplazarán a todo lo largo de ésta en dos filas paralelas y equidistantes del eje de la pista. Las luces se localizarán a lo largo de los bordes del pavimento o al exterior a una distancia que no exceda los 3 m.

Las luces estarán espaciadas uniformemente en filas, a intervalos no mayores de 60 m en una pista de vuelo por instrumentos, y a intervalos no mayores de 100 m en una pista de vuelo visual. Las luces serán fijas y de color blanco variable.

c) Luces de umbral de pista y de barra de ala

Se instalarán luces de umbral de pista, en las pistas equipadas con luces de borde; estas luces estarán emplazadas en una fila perpendicular al eje de la pista y en ningún caso a más de 3 m al exterior de la misma.

Las luces de umbral de pista serán fijas, unidireccionales, de color verde, visibles en la dirección de la aproximación a la pista, y su intensidad y abertura de haz serán las adecuadas para las condiciones de visibilidad.

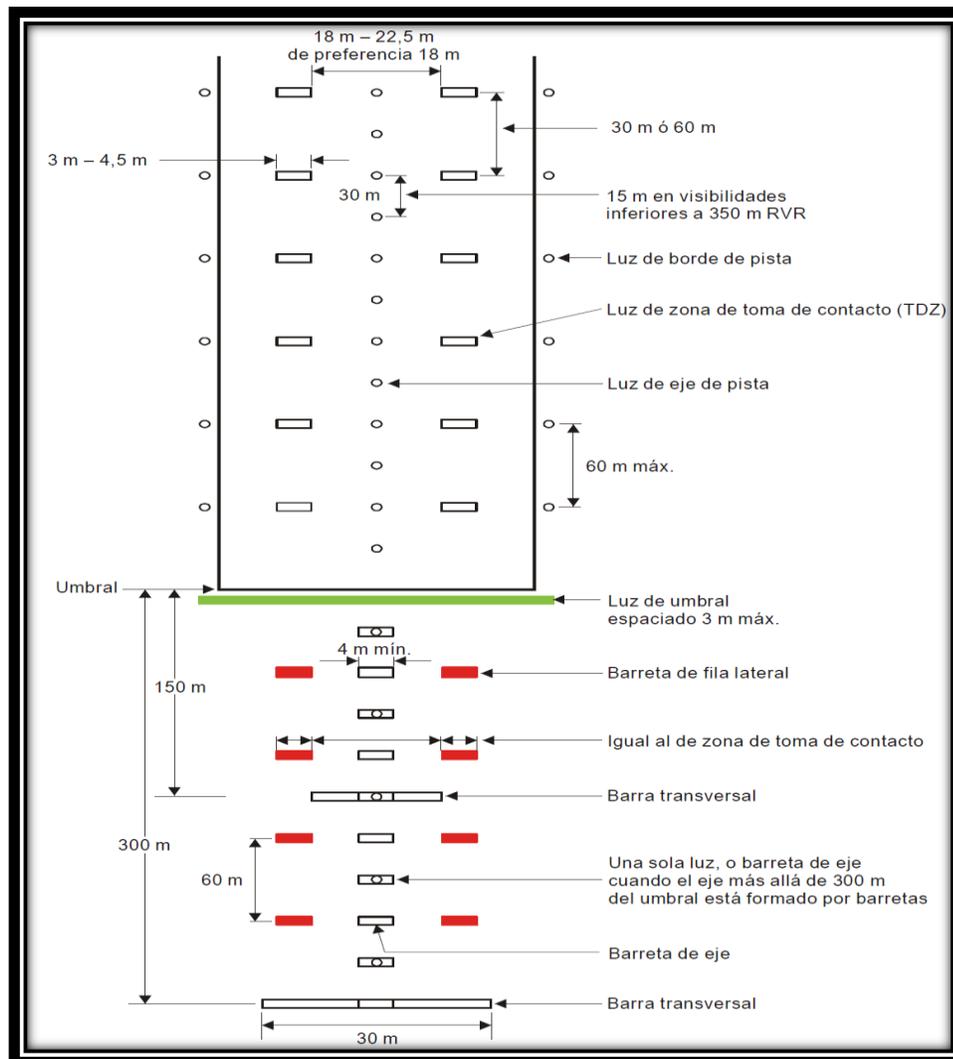


Imagen 25 Iluminación de pista (Organización de Aviación Civil Internacional, 2014)

d) Luces de extremo de pista

Las luces de extremo de pista, serán luces fijas unidireccionales de color rojo, visible en la dirección de la pista.

e) Luces de zona de toma de contacto en la pista

Estas luces se instalarán en la zona de toma de contacto de una pista para aproximación de precisión de categoría II y III.

Las luces de zona de toma de contacto, se extenderán desde el umbral hasta una distancia de 900 m, excepto en las pistas de longitud menor de 1, 800 m, en cuyo caso se acortará el sistema, de manera que no sobrepase el punto medio de la pista.

La instalación estará dispuesta en forma de pares de barretas, simétricamente colocadas respecto al eje de la pista y el espacio longitudinal entre estos pares de barretas será de 30 m o 60 m.

f) Luces de eje de pista

Se instalarán luces de eje de pista, en todas las pistas para aproximaciones de precisión de Categoría II y III.

Las luces se emplazarán a lo largo del eje de la pista, pero, cuando ello no sea factible, podrán desplazarse uniformemente al mismo lado del eje de la pista a una distancia máxima de 60 cm. Las luces serán emplazadas desde el umbral hasta el extremo, con un espaciamiento longitudinal aproximado de 15 m.

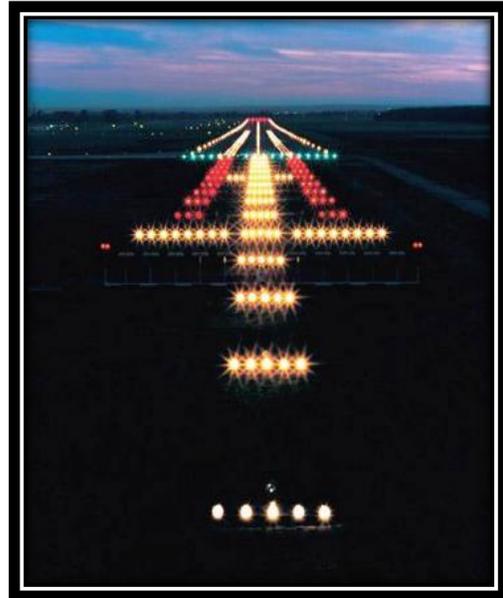


Imagen 26 Ejemplos de iluminación de pista

6.8. Drenaje

El sistema de drenaje de las pistas de un aeropuerto, es una de las características más importantes para la seguridad de las operaciones aéreas en condiciones de lluvia, dado que al encontrarse las pistas situadas en un amplio terreno llano, deben encontrarse convenientemente drenadas y con una adecuada canalización de desagüe para impedir el encharcamiento en las mismas, sobre todo durante las operaciones aéreas en condiciones de lluvia, por lo que la mayoría de los aeropuertos modernos disponen de sofisticadas redes de drenaje que permiten una rápida y eficiente evacuación del agua, dado que ésta puede ser perjudicial para el correcto funcionamiento del aeropuerto.

No todos los aeropuertos precisan de los mismos sistemas de drenaje, ya que factores como su tamaño, tráfico aéreo o incluso su emplazamiento, son determinantes a la hora de diseñar una red de drenaje adecuada, dado que un emplazamiento inadecuado puede producir interferencias con el ciclo hidráulico, recarga de mantos acuíferos de la zona o incluso la contaminación de las fuentes hidrológicas. (Pasion por volar, 2012)

Por ello, una de las necesidades previas a la hora de emprender la construcción de una red de drenaje, es el estudio previo del lugar escogido para la localización del aeropuerto, por lo que se realiza un estudio topográfico así como el exhaustivo análisis del entorno, para tener en cuenta todos los accidentes geográficos que puedan afectar a la circulación del agua, ya sea de origen natural o fruto de la acción del hombre. Es necesario considerar tanto el agua de origen subterráneo, como la procedente de la lluvia en la zona, dado que son una

amenaza constante para el correcto funcionamiento de las pistas y vías de servicio, ya que la formación de charcos puede convertir en inviable o sumamente peligrosa la circulación de las aeronaves por las mismas. (Pasion por volar, 2012)

Por tanto, este tipo de instalaciones son muy complejas a la hora de diseñar y de escoger los materiales adecuados a emplear en la ejecución de la misma, siendo un reto posterior para los servicios de mantenimiento de las instalaciones aeronáuticas, que deben de prever su correcto funcionamiento, mantenimiento y limpieza. (Pasion por volar, 2012)

Los sistemas de drenaje en los aeropuertos son inspeccionados con gran frecuencia, ya que deben encontrarse libres de aguas residuales para impedir la formación de sedimentos, aunque en ciertas ocasiones en épocas de grandes lluvias, éstos son inspeccionados inmediatamente después de niveles pluviales superiores a la media anual, siendo necesario la realización siempre de un mantenimiento preventivo y mantenerlo en óptimas condiciones de funcionamiento de acuerdo con los propios Manuales de Servicios del Aeropuerto. (Pasion por volar, 2012)



Imagen 27 Drenaje para pavimentos

El método más usual para el diseño del drenaje, es el método racional y los factores que influyen en la magnitud del escurrimiento de superficie son:

- Coeficiente de escurrimiento.
- Intensidad de precipitación, duración y frecuencia.

Este método establece:

$$Q = CIA$$

Donde:

Q = Gasto de escurrimiento

C = Coeficiente de escurrimiento

I = Intensidad de la lluvia

A = Área

Clasificación del drenaje

La clasificación del drenaje suele ser muy compleja, aunque un tipo de clasificación puede basarse atendiendo al origen de procedencia del agua a evacuar. En este sentido se habla de:

- Sistema de drenaje subterráneo, cuando el agua procede del subsuelo; se realiza un sistema de drenaje bajo las losas existentes a fin de evitar el efecto perjudicial de aguas infiltradas y/o provenientes del nivel freático. Este sistema de drenaje, constará de una red de tubos

drenantes y un colector paralelo que recibirá los caudales recogidos. (Pasion por volar, 2012)

- Sistema de drenaje superficial, cuando el agua procede de la lluvia; se realiza un sistema de drenaje sobre la propia losa existente y corresponde a la totalidad de agua procedente de la lluvia, que deberá de ser dirigida hacia los correspondientes colectores que recibirán los caudales previstos. (Pasion por volar, 2012)

Igualmente, el drenaje se puede dividir en drenaje total o drenaje de zonas, en función del área del aeropuerto que se abarque. Por regla general, las grandes instalaciones aeroportuarias disponen de drenajes por zona, concediéndose prioridad a las pistas. (Pasion por volar, 2012)

En cualquier tipo de pavimento, el drenaje, es un factor determinante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil, y por lo tanto, lo es también en el diseño del mismo.

Es muy importante evitar presencia de agua en la estructura de soporte, dado que en caso de presentarse esta situación, afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento.

Algunos aspectos que se deben cuidar para evitar que el agua penetre en la estructura del pavimento son:

- Mantener perfectamente selladas las juntas del pavimento (pavimentos rígidos).
- Tener agua atrapada en la estructura del pavimento produce efectos nocivos en el mismo, como pueden ser:

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

- ✓ Reducción de la resistencia de materiales granulares.
- ✓ Reducción de la resistencia de la sub-rasante.
- ✓ Expulsión de finos, mejor conocidos como áridos.
- ✓ Levantamientos diferenciales en suelos expansivos

7. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS.

7.1. Generalidades

La evaluación de pavimentos aeronáuticos es necesaria para valorar la factibilidad de que los pavimentos existentes puedan soportar los diferentes tipos, cargas o volúmenes del tráfico aéreo. La capacidad de carga de los puentes, alcantarillas, bocas de tormenta y otras estructuras existentes, también deben considerarse en estas evaluaciones.

Las evaluaciones, así mismo, también pueden ser necesarias para determinar las condiciones de los pavimentos existentes que serán utilizados en la planeación y en el diseño de las mejoras en los aeropuertos. Este capítulo cubre la evaluación de pavimentos para todas las cargas de las aeronaves (Federal Aviation Administration, 2016).

7.2. Proceso de Evaluación

La evaluación de pavimentos aeronáuticos debe de ser un proceso metódico paso por paso.

Los pasos recomendados en el proceso de evaluación se mencionan a continuación:

7.2.1. Búsqueda de información existente

Una revisión exhaustiva de la información histórica de los datos de la construcción, consideraciones de diseño, especificaciones, métodos de prueba y

resultados, planos “así quedó construido (AQC)” e historial de mantenimiento, deberá ser utilizado. Los registros climatológicos y el más completo historial de tráfico aéreo disponibles, también son partes importantes de este proceso (Federal Aviation Administration, 2016).

7.2.2. Inspección en sitio

El sitio en cuestión, deberá ser visitado y las condiciones de los pavimentos deberán ser anotados por medio de una inspección ocular. Deben incluirse adicionalmente a la inspección arriba anotada, las condiciones del drenaje y las estructuras correspondientes a ésta en el sitio; evidencia de efectos adversos por heladas, expansión de suelos, y otras anomalías, también deben ser tomadas en cuenta durante la inspección ocular (Federal Aviation Administration, 2016).



Imagen 28 Inspección visual del pavimento

7.2.3. Muestreo y ensayos

La necesidad y el alcance de las pruebas físicas y el análisis de los materiales, estarán basados en lo obtenido de la inspección en sitio, de la búsqueda de información y el tipo de la evaluación. Una evaluación completa para un diseño detallado del pavimento, requiere de más muestreos y ensayos, que por ejemplo, una evaluación dirigida para su uso en un plan maestro.

Los muestreos y ensayos, se hacen con la finalidad de obtener información sobre el grosor, calidad y condiciones generales de los elementos que conforman el pavimento (Federal Aviation Administration, 2016).

7.2.3.1. Procedimientos de muestro directo

El procedimiento de evaluación básico para la planeación y el diseño, será por medio de la inspección ocular y las referencias al criterio de la FAA, complementado por muestreos y ensayos adicionales, así como investigación que se requiera por los procedimientos de evaluación. Para pavimentos relativamente nuevos contruidos de acuerdo a las normas de la FAA y que no tengan signos visibles de desgaste o fatiga, la resistencia del mismo se puede basar en la revisión de la forma 5100-1 de la FAA (Diseño de pavimentos de aeropuertos) y de las secciones del mismo según fueron contruidas, con las modificaciones necesarias por cualquier variación o deficiencia de los materiales.

Donde el paso del tiempo o la fatiga del pavimento sean visible, lo cual indica que la resistencia original ya no existe, modificaciones adicionales deben ser aplicadas con base en a juicios basados en la experiencia o bien en combinación con pruebas físicas complementarias. Para pavimentos que

consisten en secciones que no se ajusten a los estándares de diseño de la FAA, la evaluación deberá ser basada en normas de la FAA después de que se han aplicado comparaciones y equivalencias a los materiales utilizados (Federal Aviation Administration, 2016).

7.2.3.2. Ensayos Destructivos

Los ensayos destructivos son aquellos que producen daño o rotura de la pieza sometida al mismo.

Entre los ensayos destructivos más conocidos se encuentran:

Calicatas

Este ensayo permite obtener una visualización de las capas de la estructura expuestas, a través de las paredes de ésta y realizar ensayos de densidad “in situ”. Estas determinaciones permiten obtener el estado actual del perfil a través de las propiedades reales de los materiales que lo componen.

Las calicatas facilitan además la toma de muestras en cantidad, para su posterior clasificación y pruebas físicas y mecánicas en el laboratorio, de cuyos resultados se puede establecer el uso más efectivo, al momento de realizarse las tareas de rehabilitación. Los trabajos suministran información adicional como:

- Espesores de las capas que conforman el pavimento
- Densidades de las capas que conforman el pavimento
- Contenidos de humedad
- Posibles causas del deterioro de la capa (agrietamiento)

- Capacidad de soporte en los materiales de las capas

Por otro lado, se pueden efectuar ensayos mediante perforaciones con la ayuda de equipos de calado, barrenos, saca muestras, etc. Esta metodología, en comparación con las calicatas es más sencilla, menos costosa y más rápida.

7.2.3.3. Ensayos no Destructivos

En cuanto a los ensayos no destructivos, éstos se pueden llevar a cabo mediante medidas de las deflexiones que son una herramienta importante en el análisis no destructivo de los pavimentos. La magnitud de la deflexión deformada producida por la carga, son útiles para investigar las propiedades “in situ” del pavimento. Se trata de aplicar una sollicitación tipo y medir la respuesta de la estructura.

Se dispone de diversos métodos de pruebas no destructivas para pavimentos aeronáuticos; estos métodos proporcionan formas para evaluación de pavimentos que eliminan algunas de los juicios subjetivos que se utilizan en otros procedimientos de evaluación.

Las mayores ventajas de las pruebas no destructivas son:

- El pavimento se sujeta a estas pruebas en el sitio y bajo condiciones reales de densidad, humedad, entre otras.
- La interrupción del tráfico aéreo es mínimo.
- La necesidad para pruebas destructivas se reduce considerablemente.

Las herramientas más comunes que se utilizan para estas pruebas no destructivas son:

Deflectometro de Impacto

Este es un método no destructivo, que sirve para la evaluación estructural de pavimentos y conocimiento detallado de su estado. Esta técnica es de alto rendimiento, además de ser utilizado de forma rápida y precisa.

Estos equipos imparten un impulso de carga al pavimento mediante la caída libre de una barra de acero. La magnitud de la carga dinámica depende de la masa de la barra y de la altura a la cual es liberada; la deflexión resultante de la superficie del pavimento se mide utilizando una variedad de sensores colocados en un orden predispuesto.

Radar de Penetración de Suelo

Este equipo puede ser útil para el estudio no destructivo de las condiciones de las capas inferiores del pavimento. El radar funciona según la obtención de diferencias en constantes dieléctricas que posibilitan la discriminación entre materiales; esta técnica se usa en ocasiones para localizar huecos y/o objetos extraños en los terraplenes.

Termógrafo Infrarrojo

La termografía infrarroja es un procedimiento de prueba no destructivo mediante la cual se pueden determinar propiedades físicas del pavimento por las diferencias en las emisiones infrarrojas. Esta tecnología es capaz de detectar diferentes capas en pavimentos rígidos reforzados y en uniones rígidas sobrepuestas.

7.3. Reporte de Evaluación

Los análisis, pruebas, resultados y conclusiones, deben ser incorporados en el reporte de evaluación, el cual se convierte en un registro permanente para referencias futuras. Aun cuando los reportes de evaluación no necesitan tener un formato en particular, es recomendable que se incluya un diagrama con los límites de dicha evaluación; el análisis de la información obtenida en todos los pasos anteriores, debe culminar en la valoración de la capacidad de carga de las secciones del pavimento que han sido sometidas a la evaluación considerada (Federal Aviation Administration, 2016).

8. CONCLUSIONES.

A lo largo de este trabajo escrito, se ha hablado sobre la importancia que los pavimentos aeronáuticos desempeñan en el plan maestro del aeropuerto, los diferentes tipos de pavimentos (ya sean pavimentos rígidos o pavimentos flexibles) utilizados en los mismos, las diferencias que existen entre ellos (pavimentos rígidos vs pavimentos flexibles), así como también las diferencias que existen en comparación con los pavimentos para carreteras.

Se puede decir que el diseño de un pavimento aeronáutico no es tarea fácil como comúnmente se puede pensar, ya que se puede elegir entre utilizar pavimentos rígidos o flexibles dependiendo de las necesidades propias del aeropuerto, problemas típicos del terreno de desplante, necesidades económicas y con base en ello elegir el mejor método posible.

Es por ello que además de la combinación de tráfico, es importante que se tomen en cuenta diversos factores tales como las condiciones climáticas de la zona, el avión de diseño y sus salidas anuales, además del tipo de mantenimiento que se podrá dar a la estructura del pavimento después de cierto tiempo determinado de vida, etc.

Es muy importante realizar una buena investigación de campo, ya que en esta etapa se recopilan todos los datos para definir el tipo de pavimento a emplearse en las pistas. La elección depende principalmente de las características del terreno natural de desplante y de la materia prima o insumos disponibles cerca de la zona del proyecto para fabricar las diferentes capas que componen la estructura.

A pesar de que se recomienda construir las pistas en terrenos libres de arcillas expansivas, terrenos pantanosos o laderas inestables, se ha observado que este criterio queda subordinado ante otras necesidades que recaen más en el ámbito social y económico, así como la ubicación misma proyecto del aeropuerto, haciendo de los requerimientos de construcción un reto para la ingeniería de pavimentos.

Por otro lado, la supervisión y mantenimiento, son etapas que no deben dejarse de lado ni mucho menos menospreciarse, ya que de ellas depende la conservación de la estructura en condiciones de servicio óptimas para el tiempo de vida para el que fue diseñado el pavimento. Es muy importante cuidar el sistema de drenaje de la estructura en estas etapas, ya que aquí se puede prevenir o corregir, según sea el caso, cualquier problema principalmente de filtraciones que pudieran eventualmente provocar fallas en el pavimento, como por ejemplo, la segregación de áridos.

En el caso del diseño de pavimentos rígidos, es muy importante tomar en cuenta la distribución adecuada de juntas, ya que de ello depende que la estructura trabaje adecuadamente. Unos de los principales problemas que se deben evitar con ayuda de las juntas, es el tema de los dislocamientos verticales diferenciales, ya que con el tiempo esto puede provocar daños mayores no sólo en la estructura del pavimento, sino también en el desempeño de las aeronaves.

Es importante mencionar que la vida útil de un pavimento flexible es menor, además requieren mayor mantenimiento que las estructuras rígidas; lo anterior apunta a la necesidad de hacer evaluaciones económicas para tomar la mejor decisión en la elección del tipo de pavimento.

Una de las variables más importantes a tomar en cuenta en el diseño de un pavimento es el tráfico aéreo, ya que de ello dependen tanto la magnitud como la frecuencia de las cargas que las aeronaves producirán en la estructura. Para ello es necesario contar con las características definidas de un avión crítico de diseño.

Los métodos de diseño mencionados en el desarrollo de este trabajo escrito, siguen filosofías diferentes y es por ello que sus procedimientos y consideraciones cambian de uno a otro; y como se mencionó, el método de la FAA, tanto para pavimentos rígidos como para los flexibles, es el comúnmente empleado porque además de distinguir un procedimiento diferente entre tipos de pavimentos exclusivos para aeropistas, también tiene su propia clasificación de suelos basada en la granulometría y los límites de plasticidad.

La diferencia más importante entre un pavimento aeronáutico y uno para carreteras, consiste en que en el caso del primero, el espesor de la capa de rodamiento en la zona central de la estructura, es mucho mayor debido a que es ahí donde se presenta la zona de contacto con mayor magnitud de esfuerzos provocados por el contacto de las aeronaves, no así en las carreteras, ya que en cambio, la zona de contacto se mantiene de manera uniforme en toda su longitud.

En el caso particular de los pavimentos aeronáuticos, la diferencia recae en diversos aspectos; sin embargo, todos ellos convergen en el costo inicial de construcción, ya que comúnmente los costos asociados al mantenimiento pueden solventarse con el paso del tiempo.

Los proyectos complementarios de un pavimento aeronáutico incluyen las ayudas visuales, comúnmente conocido como señalamiento horizontal, la iluminación y el drenaje; en conjunto pueden garantizar el buen funcionamiento del

pavimento aeronáutico; aunado a ello, el proyecto de las calles de rodaje y plataformas de estacionamiento con buen señalamiento y drenaje cumplirá con el propósito importante de unir el proyecto de la pistas con el proyecto del edificio terminal.

Todo lo anterior mencionado, desemboca finalmente en una de las actividades más importantes en la ingeniería de pavimentos, es decir, la evaluación de los pavimentos aeronáuticos, en la cual si esta actividad de suma importancia se realiza de manera oportuna y correcta, permitirá diseñar y a su vez contar y al mismo tiempo realizar un muy buen programa de mantenimiento, el cual garantizará la prolongación de la vida útil del pavimento aeronáutico.

BIBLIOGRAFÍA.

ICAO (*International Civil Aviation Organization*). (2005). Recuperado el 23 de Mayo de 2016, de <http://www.icao.int>

Pasion por volar. (4 de Abril de 2012). Recuperado el 2015, de www.pasionporvolar.com

Cruz, M. F. (2007). *Aeropuertos: Proyecto, Construcción y Mantenimiento*. Ciudad de México.

Federal Aviation Administration. (2014). *150/5335-5C. Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN*.

Federal Aviation Administration. (2014). *150/5380-6C. Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements*.

Federal Aviation Administration. (2016). *150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation*.

Gabriela, G. S. (2014). *Diseño de Pavimentos para Aeropistas*. Ciudad de México.

IPRF, Fundación de Investigaciones de Pavimentos Innovadores. (2003). *Mejores prácticas para la construcción de pavimentos de concreto con cemento Pórtland (Pavimento rígido para aeropuertos)*.

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2013). *Mecánica de Suelos, tomo 2, Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. México: Limusa.

Organización de Aviación Civil Internacional. (1983). *Manual de Diseño de Aeródromos, Parte 3, Pavimentos*.

PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

Organización de Aviación Civil Internacional. (2005). *Manual de Diseño de Aeródromos, Parte 2, Calles de Rodaje, Plataformas y Apartaderos de Espera.*

Organización de Aviación Civil Internacional. (2006). *Manual de Diseño de Aeródromos, Parte 1, Pistas.*

Organización de Aviación Civil Internacional. (2014). Aeródromos (Anexo 14), Volumen I, Diseño y Operación de Aeródromos.

Shiaffin, Y. G. (2011). *Impacto Ambiental de los Aeropuertos.* Ciudad de México.