

Diseño Estructural de pavimentos para Aeropuertos

• *Diego Eduardo Hoyos G.*

I. Introducción

Pavimento es una estructura de una o varias capas de materiales seleccionados que se colocan sobre la subrasante, diseñada, construida y mantenida técnicamente de tal forma que sea resistente y durable, para proporcionar al usuario una superficie cómoda y segura, buscando que sea justificable desde el punto de vista económico.

II. Variables que participan en el diseño y Comportamiento de Pavimentos

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

- a) Analítico o racional, el cual considera los factores básicos de diseño como estructurales, tráfico, 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 tienen la finalidad del dimensionamiento del pavimento, sin embargo la diferencia radica en la



definición de la estructura misma del pavimento mencionada anteriormente.

De otra parte las dos metodologías, han sufrido un acercamiento progresivo, dando como resultado los métodos semi-empíricos y 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 para carreteras 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".

Uno de los objetivos de este curso, es la difusión de dichos métodos racionales para la implementación en el diseño de pavimentos para aeropuertos en nuestro medio, teniendo 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:

Estructurales

- Terreno de fundación o subrasante, determinar la resistencia de los suelos de subrasante, para lo cual es necesario realizar la evaluación de las propiedades mecánicas de los suelos, el tipo de suelo, sus condiciones de humedad, compactación y potencial de cambio volumétrico entre otros.
- Tipo de pavimentos, de acuerdo con el tipo de estructura escogida el diseño y comportamiento del mismo será particular para cada caso, los tipos de pavimentos para aeropuertos son: Pavimentos flexibles, consiste en una estructura conformada por una capa de superficie bituminosa, una capa de base de material seleccionado y una capa de subbase, generalmente de material granular. Pavimentos rígidos, cuya estructura consiste en una losa de concreto de cemento Portland, una capa de subbase, colocada sobre una subrasante compactada.

Tránsito:

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

- Magnitud de las cargas: esto es, determinar la carga que se considera para el diseño o sea el llamado peso bruto máximo para el decolaje, el cual es función tanto del tipo de avión como

de la altura de la pista sobre el nivel del mar y la temperatura ambiente de la región.

- Geometría del tren de aterrizaje, la forma y distribución de las llantas en cada pata del tren principal de un avión comercial es de tres disposiciones típicas: simple, doble y tándem doble.
- Volumen del tránsito, además de la estimación de la magnitud de las cargas, es necesario determinar también su frecuencia, en términos del avión de diseño.

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 medios de temperatura, humedad, presión, nevadas, régimen de lluvias, vientos y nubosidad.

El estudio de dichas condiciones climáticas, se realiza con base en procedimientos estadísticos de los datos tomados en las estaciones meteorológicas, pero es de anotar que es muy difícil predecir el comportamiento del clima para la vida esperada del pavimento.

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 conservación y mantenimiento, se debe prever un programa de gestión para la estimación de dichos costos.

Factores intrínsecos

Son aquellos que tienen que ver con el comportamiento mismo de la estructura como:

- Resistencia estructural
- Deformabilidad
- Durabilidad

III. Diseño de Espesores Pavimentos Flexibles Métodos tradicionales

Tal vez el método más utilizado para el diseño de pavimentos flexibles en aeropuertos, es el elaborado por la Federal Aviation Administration de los Estados Unidos FAA, 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.

Parámetros de entrada:

- Propiedades de los suelos de la subrasante
- Magnitud de las cargas
- Geometría del tren de aterrizaje
- Volumen de tránsito

Para la evaluación geotécnica de la subrasante, el método tiene su propia clasificación de suelos basada en la granulometría, el límite líquido y el índice plástico, por medio de la cual establece el valor relativo del suelo como material de fundación y el requerimiento o no de subbase, considerando además las condiciones de drenaje existentes y la influencia de las heladas, de la siguiente manera:

Suelo	Análisis mecánico				Subrasante				
	Ret N 10	% Pasa No. 10			LL	IP	Buen dren.	Dren. pobre	
		Ret No. 40	Ret. 200	Pasa 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 1.1 Clasificación de suelos de la F.A.A.

También se ha encontrado una relación entre el tipo de suelo y un rango de valores típicos de CBR de subrasante, así:

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 1.2 Relación CBR Tipo de subrasante

En cuanto a la magnitud de las cargas, el método considera para el diseño el llamado peso bruto máximo para el decolaje, que a su vez es función del tipo de avión, de la altura de la pista sobre el nivel del mar y la temperatura ambiente de la región.

De la geometría del tren de aterrizaje, pues 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 sólo tipo de avión que es el avión de diseño y éste es aquel con el que harán uso de la pista, requiere un mayor espesor de pavimento para su respectivo número de decolajes.

Es necesario disponer de pronósticos de salidas anuales por tipo de aeronave, para el diseño del pavimento; la aeronave de cálculo deberá seleccionarse como la que requiera mayor espesor de pavimento, la cual no es necesariamente la más pesada, pues depende de la cantidad de decolajes. Sin embargo el pronóstico de tráfico es una mezcla de diferentes aeronaves que poseen diferentes tipos de trenes de aterrizaje y diferentes pesos, razón por la cual se deben utilizar los siguientes factores de conversión.

Para convertir de	a	multiplicar por
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 1.3 Factores de conversión

Una vez se hayan agrupado los aviones en la misma configuración del tren de aterrizaje, debe realizarse la conversión a salidas anuales equivalentes de la misma aeronave, mediante la siguiente expresión:

$$\text{LOG (R1)} = \text{LOG (R2)} * \sqrt{W2/W1}$$

Donde:

R1= Salidas anuales equivalentes de la aeronave de cálculo

W1= Carga sobre la rueda de la aeronave de cálculo

R2= Salidas anuales expresadas en el tren de aterrizaje del avión de cálculo

W2= Carga sobre la rueda de la aeronave en cuestión

Ejemplo de aplicación:

Subrasante: Arcilla de baja compresibilidad tipo CL, CBR=6%

Datos de tráfico:

Aeronave	Tipo de Tren	Salidas anuales	Peso máximo
727-100	ruedas gemelas	4250	72600
727-200	ruedas gemelas	8780	86500
707-302B	bogie de 4 ruedas	3360	148500
DC-9-30	ruedas gemelas	6530	49000
CV-880	bogie de 4 ruedas	1200	83950
737-200	ruedas gemelas	1890	52440
L-1011-100	bogie de 4 ruedas	1850	204120
747-100	bogie doble	107	317800

Nave de diseño:

727-200 ruedas gemelas

Conversión de la aeronave a salidas anuales equivalentes de la de diseño:

Aeronave	PBM (95%)	Carga por rueda	D. Esperad.	D. Corregid.	D- Equival.
727-100	68970	17240	4250	4250	2109
727-200	82175	20540	8780	8780	8780
707-302B	141075	17630	3360	5712	3023
DC-9-30	46550	11640	6530	6530	744
CV-880	79750	9970	1200	2040	202
737-200	49818	12450	1890	1890	356
L-1011-100	*129295	16160	1850	3145	1266
747-100	*129295	16160	107	182	101

Total: 16581

* Las cargas por rueda de los aviones de cabina ancha para el cálculo de repeticiones equivalentes, se calculan suponiendo que el avión ES de tipo convencional con tren bogie doble y peso bruto máximo para descolaje de 136100 Kg.

En el ábaco de diseño, figura 4-37, se determina el espesor total del pavimento el cual es de 40 pulg. o sea 100 cm.

En el mismo gráfico puede apreciarse que el espesor requerido de la capa de rodadura, es de 10 cm. para las áreas críticas.

El material disponible de Subbase debe garantizar un CBR mínimo de 20% y con el mismo ábaco se calcula el espesor requerido con este valor:

Entonces, estando a nivel de subbase granular se requiere una estructura de base + rodadura de: 50 cm.

Espesor de la subbase: $100 - 50 = 50$ cm.
Base + capa de rodadura = 50 cm.

Capa de rodadura = 10 cm en las áreas críticas

Base: $50 - 10 = 40$ cm.

Estructura final:

Capa de rodadura	10 cm.
Base	40 cm.
Subbase granular	50 cm.
Total	100 cm.

Métodos Analíticos o Racionales

Los métodos analíticos de diseño estructural de pavimentos se basan en el estado esfuerzos y deformaciones producido por las solicitaciones que se consideren (cargas, temperatura, etc.), con un posterior estudio de lo que significa dicho estado en la degradación de dicha estructura, o sea consta de dos componentes: un modelo de respuesta y un análisis de fallo.

El modelo de respuesta más generalizado en la actualidad, es el mecánico basado en sistemas multicapas y ecuaciones elásticas (teoría de Burmister).

Hipótesis básicas modelo de Burmister:

- El pavimento se representa geoméricamente como una estructura constituida por una serie de capas horizontales paralelas, indefinidas en su plano y de espesor finito constante, apoyadas en un espacio semi-infinito de Boussinesq.
- Cada capa se comporta como un medio elástico lineal, homogéneo, isotrópico y continuo. Se caracteriza mecánicamente por su módulo de elasticidad (E) y su coeficiente de poisson (ν).
- La carga se representa mediante una presión vertical distribuida uniformemente sobre un área circular.
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua; el contacto puede modelarse en condiciones de adherencia total o nula.
- Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos.
- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas.
- Los esfuerzos cortantes que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento, son prácticamente despreciables.

La respuesta de la estructura se obtiene entonces en forma de integrales indefinidas que se resuelven numéricamente, utilizando para ello un programa de computador.

Metodología utilizada:

- Evaluación de las solicitaciones (aisladas o repetidas, estáticas o dinámicas), durante el período de servicio y conversión a cargas equivalentes.
- Modelización de la estructura mediante un sistema multicapa.
- Selección de materiales a emplear en las distintas capas y estimación de sus espesores aproximados (empíricamente o prediseños).
- Cálculo del estado de esfuerzos y deformaciones.
- Comparación con los valores admisibles para cada material, según la ley de fatiga considerada.

- Si la estructura no chequea, es necesario efectuar un nuevo cálculo de espesores o de características de resistencia de las capas.
- Si la estructura chequea, se pueden calcular otras alternativas de diseño, realizando también variaciones en espesores y resistencias, de tal manera que se pueden comparar dimensionamientos prácticos y económicos.

Como resultado del proceso se obtienen unas soluciones para cada combinación de materiales introducida en el modelo.

Finalmente se comparan costos de las diferentes alternativas técnicamente recomendadas.

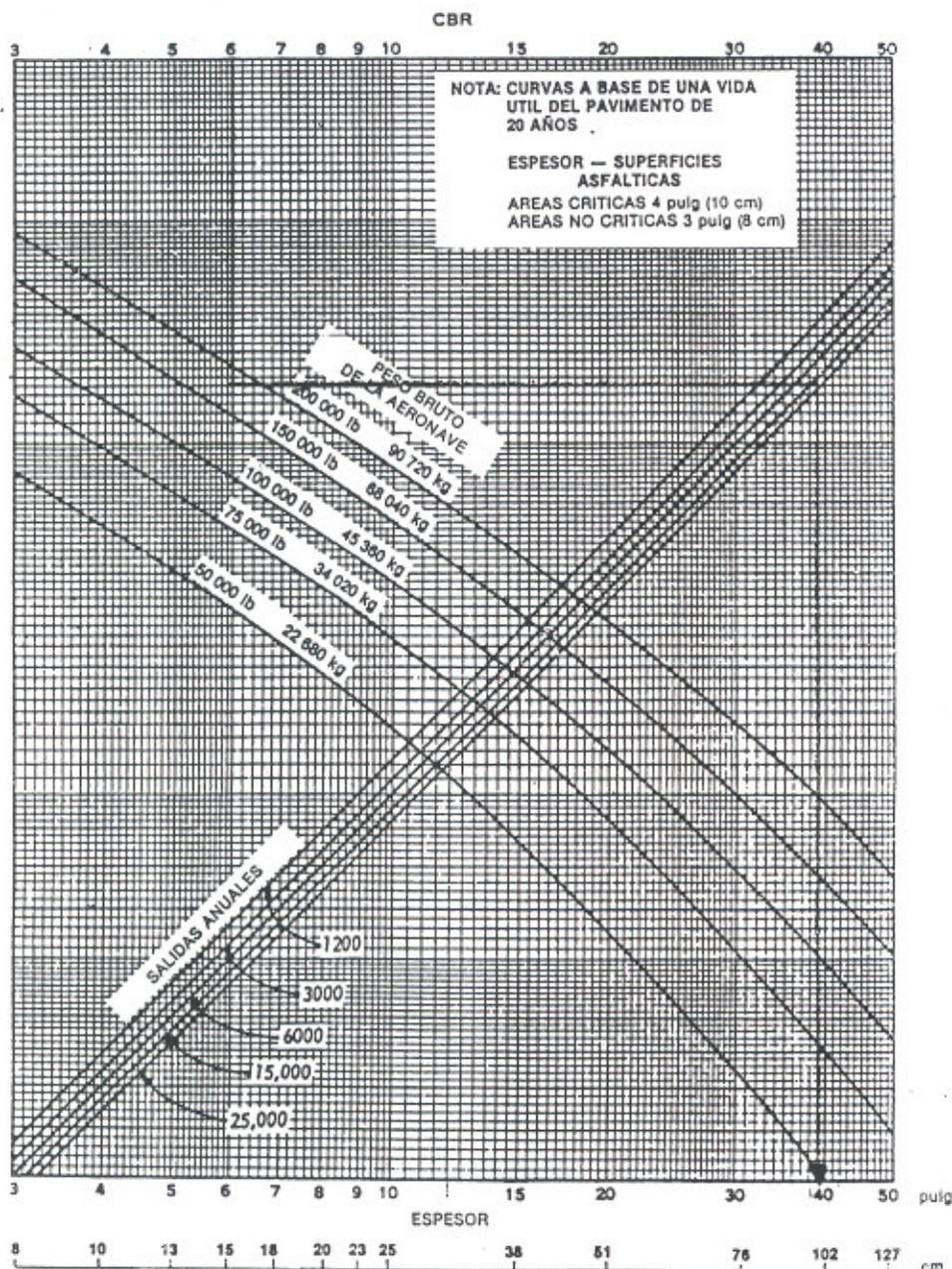


Figura 4-37 Curvas de cálculo de pavimentos flexibles para áreas críticas, tren de ruedas gemelas

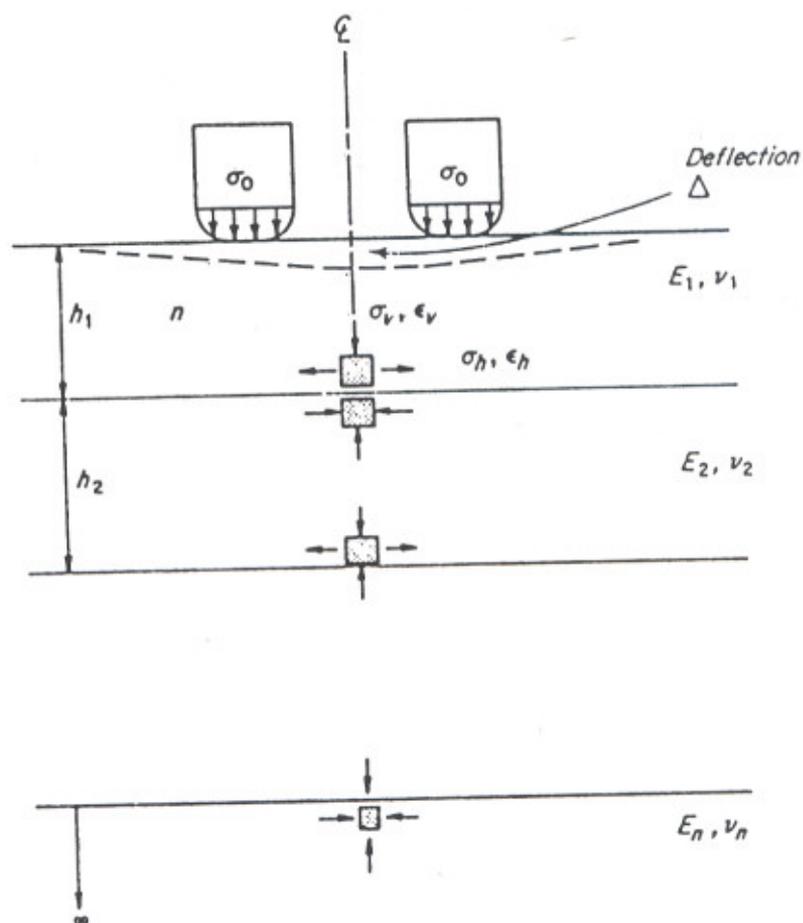
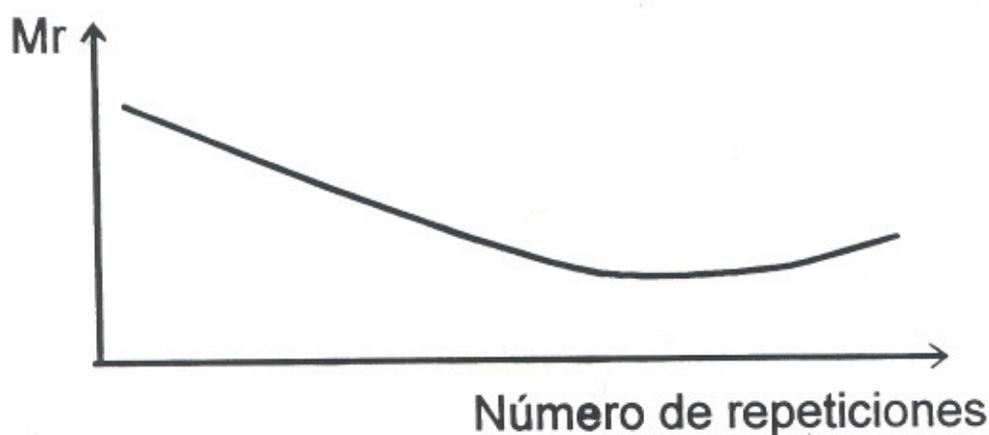
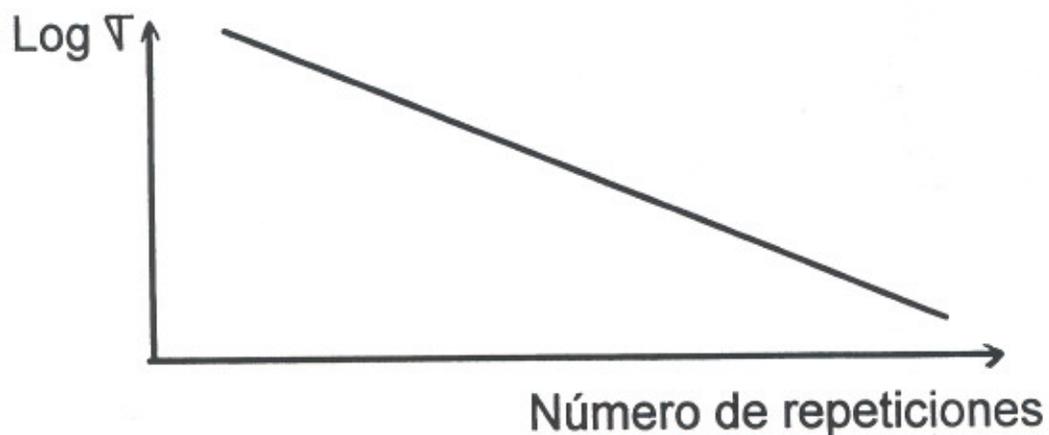


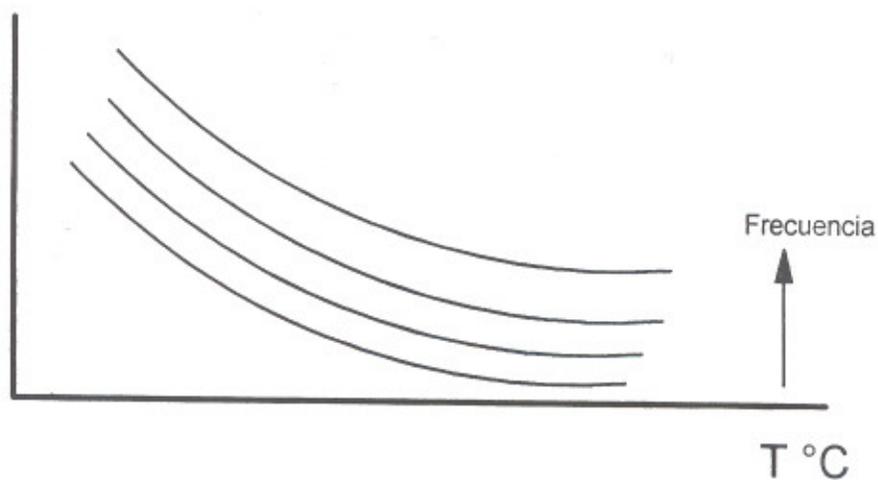
Figura 12-26 Representation of pavement structure as a multilayer elastic system

Ley de fatiga

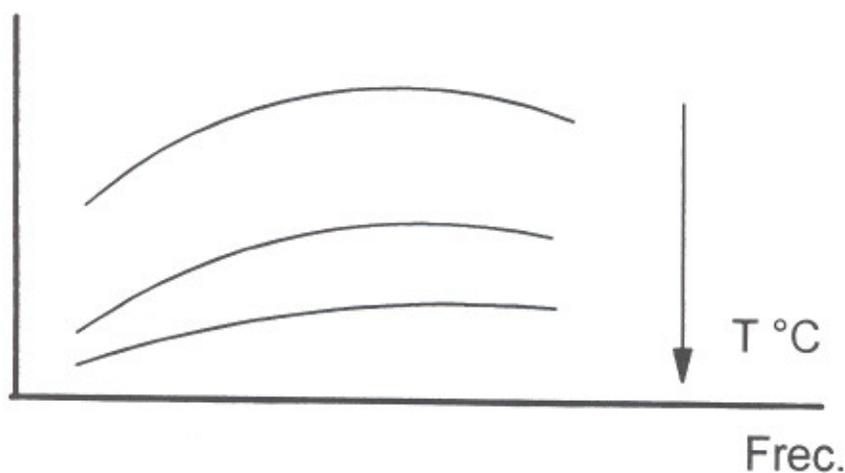


Caracterización de la carpeta asfáltica

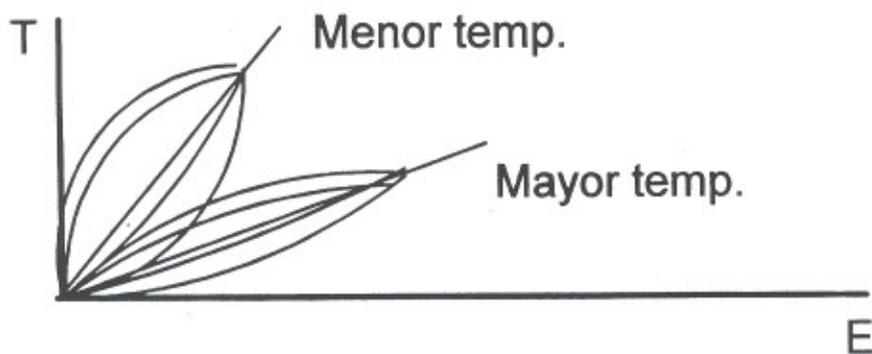
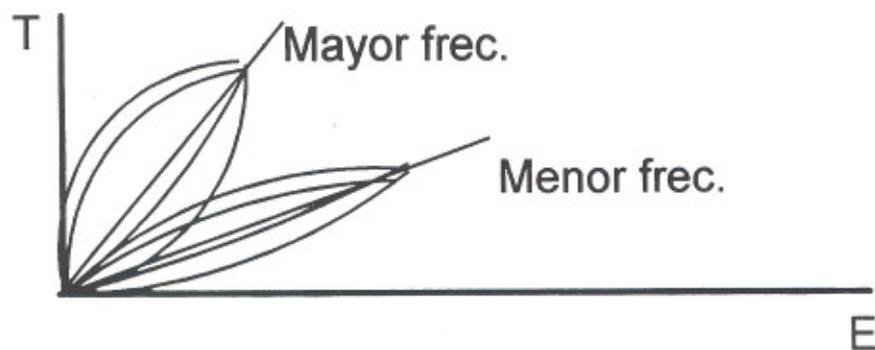
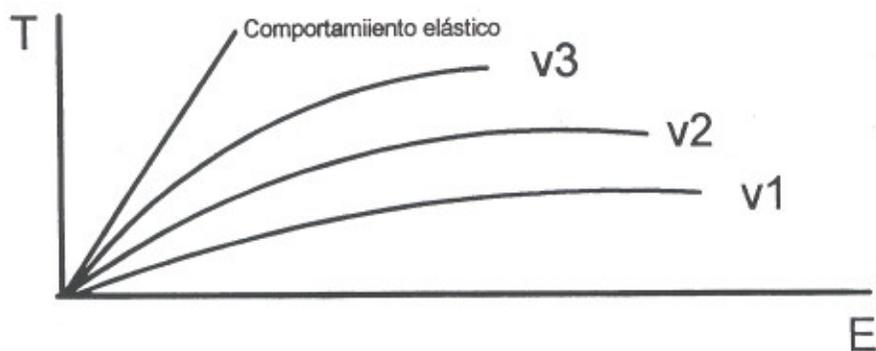
E Din.



E Din.



Caracterización de la carpeta asfáltica



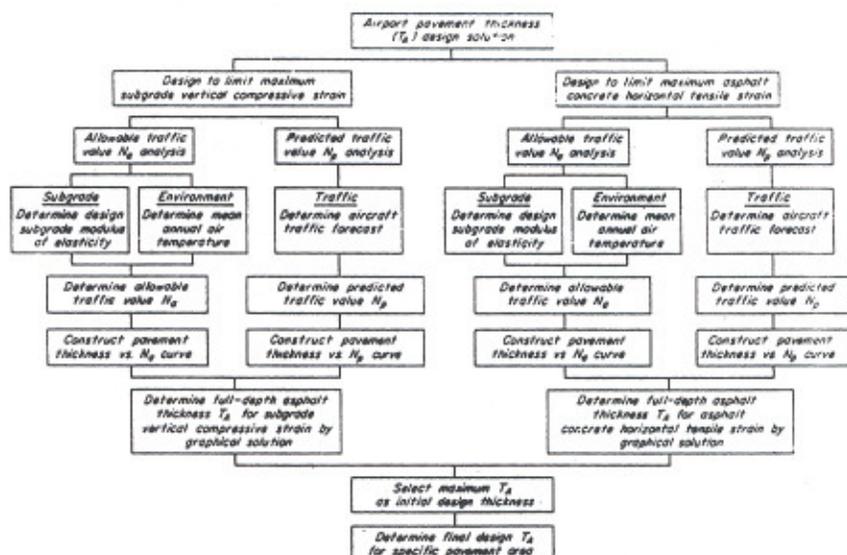


Figura 12-29 Airport pavement thickness design flow chart. (The Asphalt Institute.)

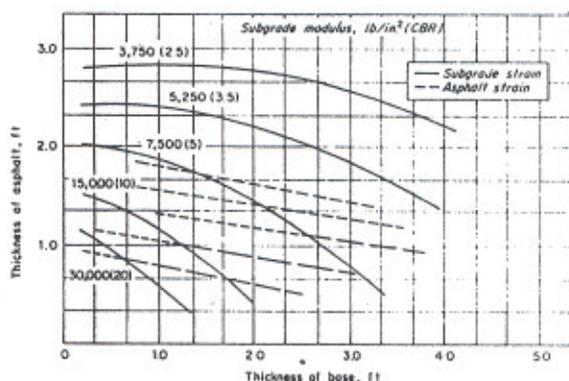


Fig. 12-28 Design curves for II-747. (Shell Oil Co.)

$$N_f = k \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^n$$

N_f = applications to failure

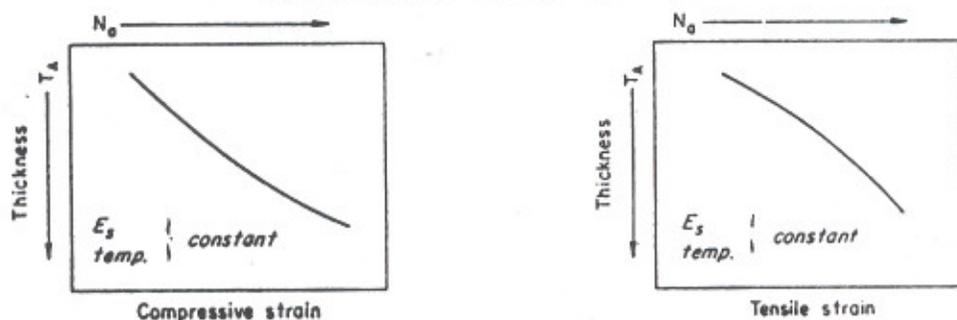
ϵ_t = tensile strain

k, n = experimentally determined coefficients dependent on mixtures characteristics

$$E_3 = 1,500 \text{ CBR (IB/m}^2\text{)}$$

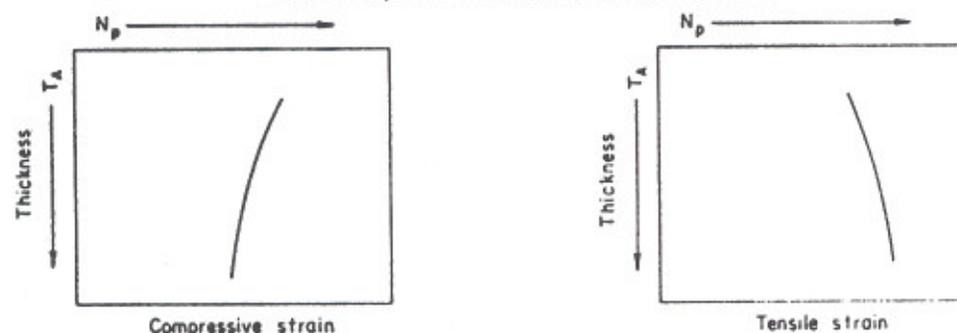
Allowable Traffic Value Analysis

Allowable equivalent DC-8-63F strain repetitions



Predicted Traffic Value Analysis

Predicted equivalent DC-8-63F strain repetitions



Graphical Solution to Obtain Design T_A

Equivalent DC-8-63F strain repetitions

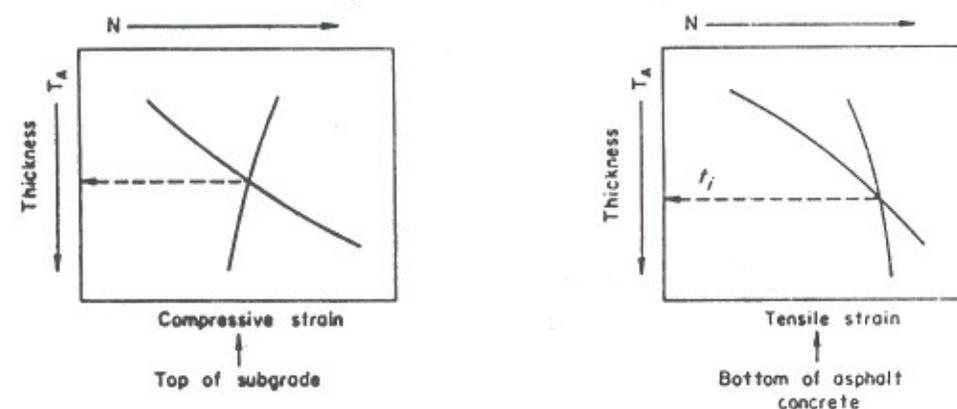


Figura 12-30 Steps used to determine design thickness by the Asphalt Institute procedure (The Asphalt Institute).