UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMA DE ADMINISTRACION DE PAVIMENTOS PARA AEROPUERTOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA
(T R A N S P O R T E)

P R E S E N T A :

GERMAN LUYANDO LOPEZ

DIRIGIDA POR: ING. ROBERTO SOSA GARRIDO

MEXICO, D. F. 1999

DEDICATORIA

Con cariño y admiración

A mis padres:

Guillermo Luyando Bueno

Elia López de Luyando

A mis hermanos:

Elia.

Elda.

Gerardo.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Roberto Sosa Garrido por su valiosa dirección en la realización de la presente tesis.

Al Ing. Víctor Zarraluqui Such por el apoyo y las facilidades otorgadas para la elaboración de este trabajo.

INDICE

INTRODUCCIÓN

Introducción

Hasta hace poco tiempo Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) administraba 58 aeropuertos de la República Mexicana, los cuales se encontraban agrupados en metropolitanos, turísticos, regionales y fronterizos.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes ha iniciado la concesión de 35 aeropuertos que administra ASA. Este organismo estudió la posibilidad de conformar grupos de aeropuertos por regiones, donde cada uno de ellos cuentan con un aeropuerto como centro de operaciones. Hasta ahora se han concesionado dos grupos: el Pacífico, con Guadalajara como centro y el Sureste, con Cancún como centro. El próximo a concesionar será el grupo del Norte, teniendo como aeropuerto centro el de Monterrey y por último el integrado únicamente por el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), el cual será el último en concesionar.

Se estima que México ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en cuanto al tamaño de su red aeroportuaria (58 aeropuertos, 45 con servicio para vuelos nacionales e internacionales y 13 para vuelos nacionales). Además ocupa el décimo sitio en lo relativo en movimiento de pasajeros, y el décimo cuarto lugar en cuanto al número de aterrizajes y despegues.

Según datos oficiales la inversión estimada de aquí a un par de años, para la conservación y rehabilitación que los futuros operadores de los aeropuertos tendrán que realizar, será superior a los siete mil millones de pesos, cantidad que se tendría más que duplicar para el 2006 para llegar a 16 mil millones de pesos, según las propias proyecciones oficiales.

Dentro de ese rubro ASA estima que se requerirá una inversión de 320 millones de pesos para la modernización y ampliación de pistas y plataformas, 785 millones de pesos para construcción de nuevas pistas y plataformas y 275 millones de pesos en estudios y proyectos para el año 2000.

De acuerdo con la dependencia federal mencionada, en los títulos de concesión de los aeropuertos, se establece como obligación modernizar la infraestructura aeroportuaria del país, por lo que se están definiendo las áreas que requerirán inversiones y que van desde el mejoramiento de pistas o incluso la construcción de nuevas terminales.

Hay que mencionar que cada uno de los aeropuertos de la red requiere de labores permanentes de conservación de pistas, calles de rodaje y plataformas para sostener su estado en óptimas condiciones.

Frecuentemente los pavimentos de los aeropuertos sufren falta de conservación sistemática, con lo que su vida se acorta imprevisiblemente. Esto sucede sobre todo por la escasez de recursos o impostergables necesidades sociales para la construcción de obras nuevas. Evidentemente ambas razones no pueden ignorarse, pero las aeropistas, calles de rodaje y plataformas son un costoso patrimonio nacional del que muchas cosas dependen y que tampoco puede dejarse deteriorar en forma indiscriminada. Los países que sientan la necesidad social de dedicar casi toda su energía a construir obras nuevas, deberán tener lógicamente la mayor necesidad de conservar las ya hechas.

Un sistema total de administración de pavimentos puede ayudar a los organismos a lograr el mejor valor posible para el presupuesto público.

El referido sistema tiene el propósito de, sobre las bases de identificar y evaluar la condición integral de los pavimentos existentes, generar información fidedigna y útil que apoye y oriente la fundamentación del destino de los recursos, la programación de actividades y en forma oportuna la organización y ejecución de las labores de conservación necesarias para sostener la red aeroportuaria, en condiciones adecuadas de operación.

Las ventajas brindadas por el sistema en cuestión lo pueden convertir en un instrumento de apoyo a las metas de lograr una asignación más atinada de los recursos disponibles, y una organización más efectiva de las actividades a emprender, condiciones ambas, fundamentales para alcanzar resultados satisfactorios, apreciables en los contextos de los costos de transporte, de la actividad comercial y finalmente de la economía nacional.

Por lo anterior es conveniente que los concesionarios de los aeropuertos estudien la viabilidad de implementar un Sistema de Administración de Pavimentos, como una herramienta que puede optimizar los recursos que tienen que realizarse en las actividades de diseño, construcción, operación y conservación de los mismos.

CAPÍTULO 1

DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS

1. Definición de un Sistema de Administración de Pavimentos

Antes que nada, si nos apoyamos en los conceptos clásicos que se refieren a un pavimento se puede formular y estar de acuerdo en la siguiente definición:

Pavimento es una estructura compuesta por un sistema de capas que se coloca sobre las terracerias y que tiene como función, la de soportar cargas de tránsito, sin deteriorarse en forma importante durante su vida de proyecto, ofreciendo una superficie de rodamiento cómoda y segura. En aeropuertos existen dos tipos de pavimentos: el pavimento flexible y el pavimento rígido. La estructura de estos tipos de pavimentos se muestran en la siguiente figura.

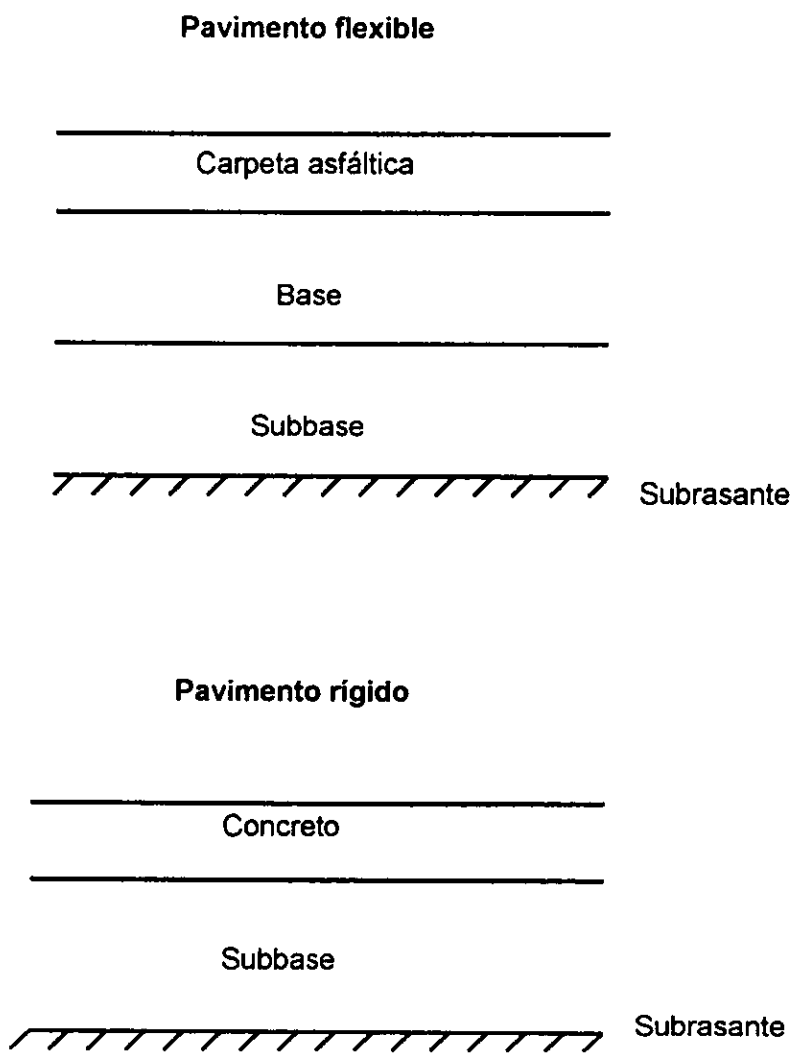

Figura 1.1 Tipos de pavimentos

El pavimento flexible consta de una carpeta asfáltica que es una mezcla de agregados bien graduados, aumentados con el asfalto. Debe ser una capa resistente, poco deformable y da ciertas característica de impermeabilidad. Abajo de esta capa está la base, que debe tener una resistencia tal, capaz de absorber los esfuerzos cortantes y debe ser de material triturado. Después le sigue la sub-base, que está conformada por agregados pétreos y es la capa subdren del pavimento. Es decir, es la capa que defiende hidráulicamente al pavimento, ya que casi no tiene nada de finos. Esta capa debe tener poca deformabilidad plástica y debe estar constituida de un material filtrante.

El pavimento rígido consta de una losa de concreto y de una sub-base que puede tener las mismas características que en un pavimento asfáltico.

Nadie puede negar la gran importancia que tienen los pavimentos, sobre todo al repasar los siguientes conceptos:

El funcionamiento de una vialidad con o sin una superficie debidamente pavimentada, significa una diferencia enorme en la velocidad de desplazamiento de los vehículos, que a su vez significa diferencia en horas hombre, horas máquina y por consiguiente en sus costos correspondientes de transportación de pasaje y carga.

El costo inicial de construcción de un pavimento bien diseñado y bien construido llega a cifras significativas en cualquier proyecto. Por eso, es necesario considerarle la importancia debida ya sea en su etapa de construcción, o en etapas posteriores de conservación.

En general hay que recalcar que los pavimentos no pretenden ser elementos que puedan llamar la atención por su belleza o por su diseño atrevido, desempeñan una función muy importante al proporcionar una superficie de rodamiento segura y eficiente para el tránsito de los vehículos. Por eso es necesario que su diseño, construcción y conservación se ajusten a las tecnologías modernas que le facilitan cumplir con su función.

Desgraciadamente se tienen todavía algunos errores de criterio por parte de los ingenieros para con los pavimentos. Uno de los más comunes es el de considerar que las etapas de diseño inicial, construcción, operación y conservación puedan considerarse como independientes. En vez de esto, las técnicas modernas nos recomiendan la aplicación de sistemas de administración de pavimentos que complementan al diseño inicial, ligándolo a las fases de control durante la construcción, conservación y operación con métodos de evaluación apropiados.

Un sistema total de administración de pavimentos consiste en un conjunto de actividades coordinadas, todas dirigidas hacia la óptima aplicación de los fondos públicos y privados disponibles para proporcionar pavimentos seguros y económicos. Esto es un conjunto de actividades, que puede ser caracterizado en términos de componentes y subsistemas principales. Un sistema de administración de pavimentos debe aplicarse a diferentes necesidades de administración o niveles y debe interactuar con el sistema de administración del transporte implicado.

Este sistema también se puede definir como el procedimiento sistematizado que ayuda a coordinar y a controlar todas las actividades orientadas a conservar los pavimentos. Asimismo, dicho sistema ofrece con el tiempo, información útil no sólo para el manejo de la red aeroportuaria, objetivo primario de éstos, sino también para proyectos relacionados con la evaluación de las causas de deterioro o la determinación de las soluciones más convenientes, incluso para el desarrollo de conocimientos técnicos o para el establecimiento de normas más adecuadas de construcción y de conservación de pavimentos.

La administración de pavimentos debe ser capaz de ser usada global o parcialmente por varios niveles técnicos y administrativos de dirección, en hacer decisiones respecto tanto a proyectos individuales como a una completa red de aeropuertos. Todos los tipos de decisiones deben ser incorporadas en el proceso, incluidas aquellas relacionadas con las necesidades de información, deficiencias proyectadas, necesidades de mejoramiento para el aeropuerto, presupuesto, programación, diseño de proyecto, construcción y conservación, requerimientos de recursos, monitoreo en servicio e investigación.

También se debe involucrar la identificación de estrategias óptimas a varios niveles de administración así como la implementación de estas estrategias. Es un proceso que cubre todas aquellas actividades referentes al suministro y conservación de los pavimentos en un nivel de servicio adecuado. Esto viene de un rango desde la adquisición de información inicial hasta la planeación, programación y ejecución de nueva construcción, conservación y rehabilitación, a los detalles del proyecto de diseño y construcción individual; al monitoreo periodico de los pavimentos en servicio.

La administración de pavimentos de ninguna manera remplaza o interfiere con un buen diseño de pavimento, materiales, conservación, u otras actividades, sino que provee una metodología para sintetizar estas actividades y para maximizar la vida útil del pavimento y los beneficios que de este puede obtenerse.

Conceptual y operativamente el sistema de administración de pavimentos estará compuesto por dos módulos de trabajo, uno técnico, dirigido a determinar el estado de deterioro de los pavimentos y las recomendaciones de conservación y otro económico, orientado a brindar elementos de decisión respecto a la opción de atención más recomendable, según recursos presupuestarios, costos y rendimientos económicos de las acciones por emprender.

Los principales componentes de un sistema de administración de pavimentos son los siguientes:

Nivel de red	**Nivel de proyecto**
Programación.	Diseño.
Planeación.	Construcción.
Presupuesto.	Conservación.

Investigación y estudios especiales.

De esta forma, un sistema funcionaría de la siguiente manera:

Diseño inicial. Para definir las características iniciales para la construcción del pavimento, tales como: espesor y tipo de capas, calidad de materiales y proceso constructivo, se efectúa un estudio que involucra los siguientes parámetros:

Calidad del suelo de apoyo.

Tránsito inicial estimado y su tasa de crecimiento.

Durabilidad inicial (20 años)

Materiales disponibles en la región.

Equipo disponible.

Recursos disponibles.

Con la información anterior se puede a proceder a aplicar alguno de los métodos clásicos de diseño, para definir la geometría y demás características del pavimento inicial.

Evaluaciones periódicas. El tiempo de vida previsto para la etapa inicial no siempre se cumple, porque existen demasiados factores variables que sólo son estimados. Por este motivo es indispensable ejecutar una serie de evaluaciones periódicas que confirmen el

comportamiento real del pavimento, a través del tiempo. Para esto existen diversos métodos que determinan sus condiciones de servicio y sus condiciones estructurales. Algunos de los más importantes son los siguientes:

Índice de perfil. Medición de características del rodamiento con instrumentos que miden la rugosidad superficial o calidad de rodamiento, para definir su capacidad estructural.

Deflexiones. Medición de las deformaciones elásticas del pavimento con las cargas del tránsito, empleando deflectómetros.

Deformaciones permanentes. Medición de deformaciones transversales o longitudinales con regla de 3m o perfilómetros.

Inventario de deterioros superficiales. Inspección ocular, determinando los tipos de daños, extensión y severidad. Los datos que aportan todas estas evaluaciones son muy útiles para registrar la evolución del comportamiento real y para extrapolarlo al futuro.

Diseños complementarios. Con la información anterior, es posible diseñar los trabajos de conservación, y rehabilitación que puedan preverse al futuro. Este sistema permite hacer programas de trabajo e inversión con la suficiente anticipación para definir las prioridades financieras.

Requisitos adicionales. Para que un pavimento pueda desempeñar correctamente su función es necesario que cuente con un buen diseño, pero, además que cumpla con otros requisitos muy importantes como son los siguientes:

- Calidad especificada de materiales de construcción.
- Procesos correctos de construcción.
- Obras complementarias, como drenaje eficiente, pendientes adecuadas, terracerías bien compactadas, etc.
- Especificaciones y verificación de la calidad, dentro de márgenes de tolerancia realistas y adecuados.

No existe un sistema ideal de administración de pavimentos que sea el mejor para todas las agencias u organismos. Cada organismo representa una situación única con necesidades específicas. Por lo tanto, cada organismo debe definir cuidadosamente que es lo que desea de un sistema de administración de pavimentos.

El proceso de administración requiere de un inventario de las facilidades existentes. Dependiendo de los requerimientos del operador del aeropuerto, el nivel de detalle en el inventario variará. Sin embargo, todos los sistemas de administración necesitan al menos un inventario rudimentario del pavimento de un aeropuerto. El banco de datos del inventario proporciona al administrador de los pavimentos una cuantificación de la extensión de los elementos de operación terrestre, los tipos de pavimento, su geometría, niveles de tránsito, condiciones ambientales, etc. Esencialmente, incorpora información de lo que actualmente existe, más información pasada de ciertos aspectos tales como construcción y mantenimiento realizados.

El inventario generalmente se refiere a las características permanentes de los pavimentos de los aeropuertos. Las principales clases y tipos de componentes de un banco de datos de pavimentos son las siguientes:

Datos de condición actual:
Rugosidad (Índice de perfil)
Deterioro superficial (Inventario de deterioros)
Deflexión (Capacidad estructural)
Fricción
Propiedades de las capas de materiales (Características geotécnicas)
Datos históricos:
Historial de conservación
Historial de construcción
Tránsito
Accidentes
Datos de estrategia:
Presupuesto
Alternativas disponibles (conservación)
Datos geométricos:
Dimensiones de sección
Geometría del aeródromo
Pendiente
Corona
Datos de medio ambiente:
Drenaje

Clima (temperatura, lluvia, hielo)

Datos de costos:

Costos de construcción

Costos de conservación

Costos de operación

La base de datos es la característica del sistema de administración de pavimentos tal y como se muestra en la siguiente figura. Esta sirve como depósito de la información requerida para apoyar virtualmente todas las decisiones, además de aquellas concernientes a la conservación. Hay que recalcar que la calidad de la base de datos determinará el valor del Sistema de Administración de Pavimentos.

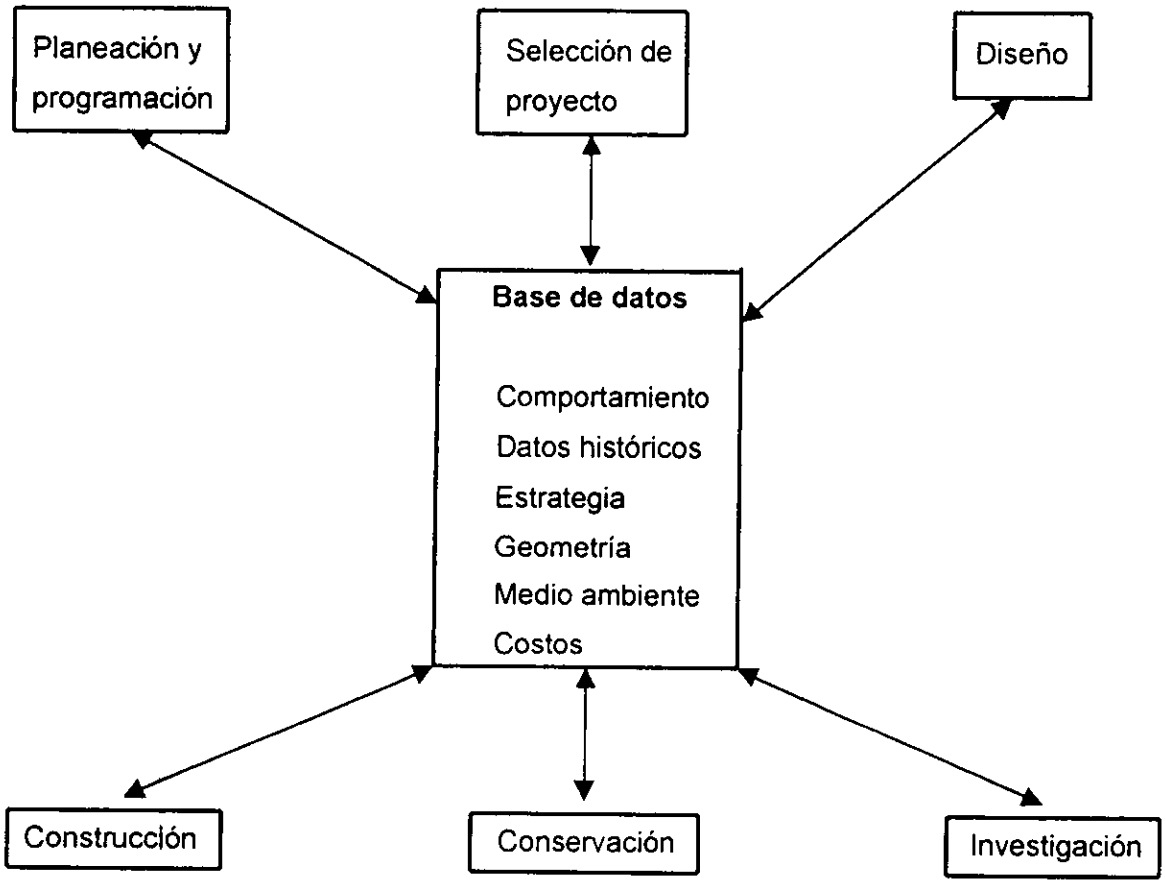

Figura 1.2 La base de datos como característica central del SAP

Es necesario hacer notar que el objetivo de un sistema de administración de pavimentos es el de coordinar las actividades requeridas para la realización y conservación de dichas estructuras. El soporte de estas actividades requiere una base de datos extensa que deba incluir la condición y comportamiento del pavimento, entre otros varios aspectos. Las futuras empresas operadoras de los diferentes grupos de aeropuertos estarán interesadas en saber cual es el estado físico actual de los pavimentos que van a recibir, por lo que es conveniente que las mismas tengan acceso a los resultados de las evaluaciones técnicas realizadas por Aeropuertos y Servicios Auxiliares, o en su caso conocer cuales de éstas son necesarias realizar para conocer el estado físico de los mismos.

El sistema de administración de pavimentos puede ser dividido en dos módulos, uno técnico y otro económico; el primero permite conducir el proceso de captura de la información de campo requerida para los elementos de operación terrestre en estudio, elaborar la base de datos con toda la información obtenida y generar distintos tipos de reportes a partir de dicha base de datos; el módulo económico permite realizar análisis de factibilidad económica para una serie de alternativas posibles de conservación de las diferentes secciones.

Hay que recordar que la evaluación es la parte medular de la administración de pavimentos, debido a que proporciona los medios para poder verificar que los objetivos de la planeación, diseño y construcción hayan sido cumplidos.

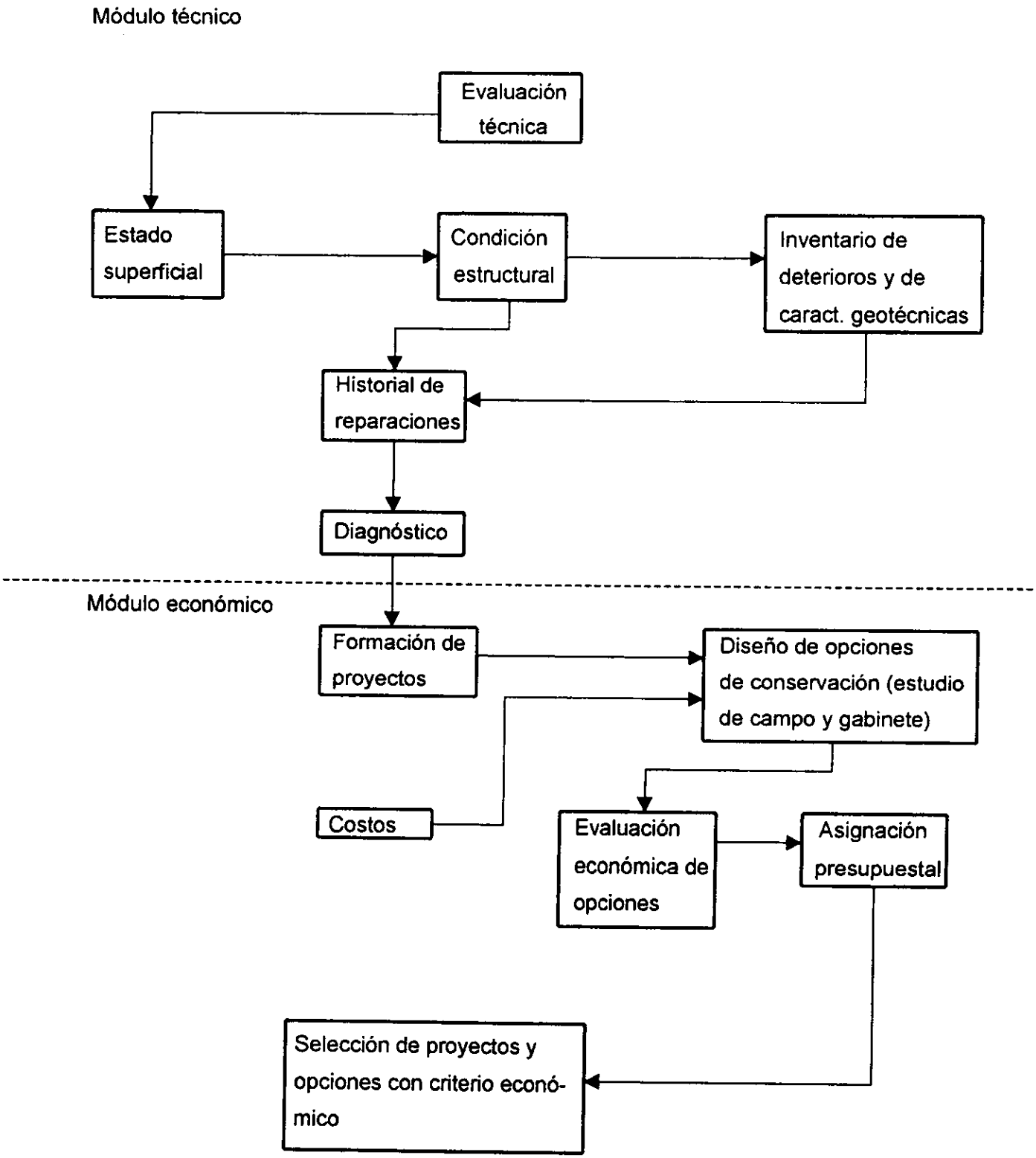

Figura 1.3 Módulos del SAP

Para finalizar este capítulo, es necesario resaltar que existen diferentes elementos de operación terrestre de pavimentos en un aeropuerto determinado y que los mismos tienen distintas funciones, por lo que sus características de comportamiento también son muy diferentes entre sí. A los elementos de operación terrestre también se le conoce como zona aeronáutica de operaciones, la cual está dedicada al movimiento exclusivo de aeronaves. En ésta tiene lugar el despegue, aterrizaje, circulación y estacionamiento de los aviones.

En la siguiente página se presenta un diagrama de los diferentes elementos de operación terrestre de pavimentos que forman un aeropuerto.

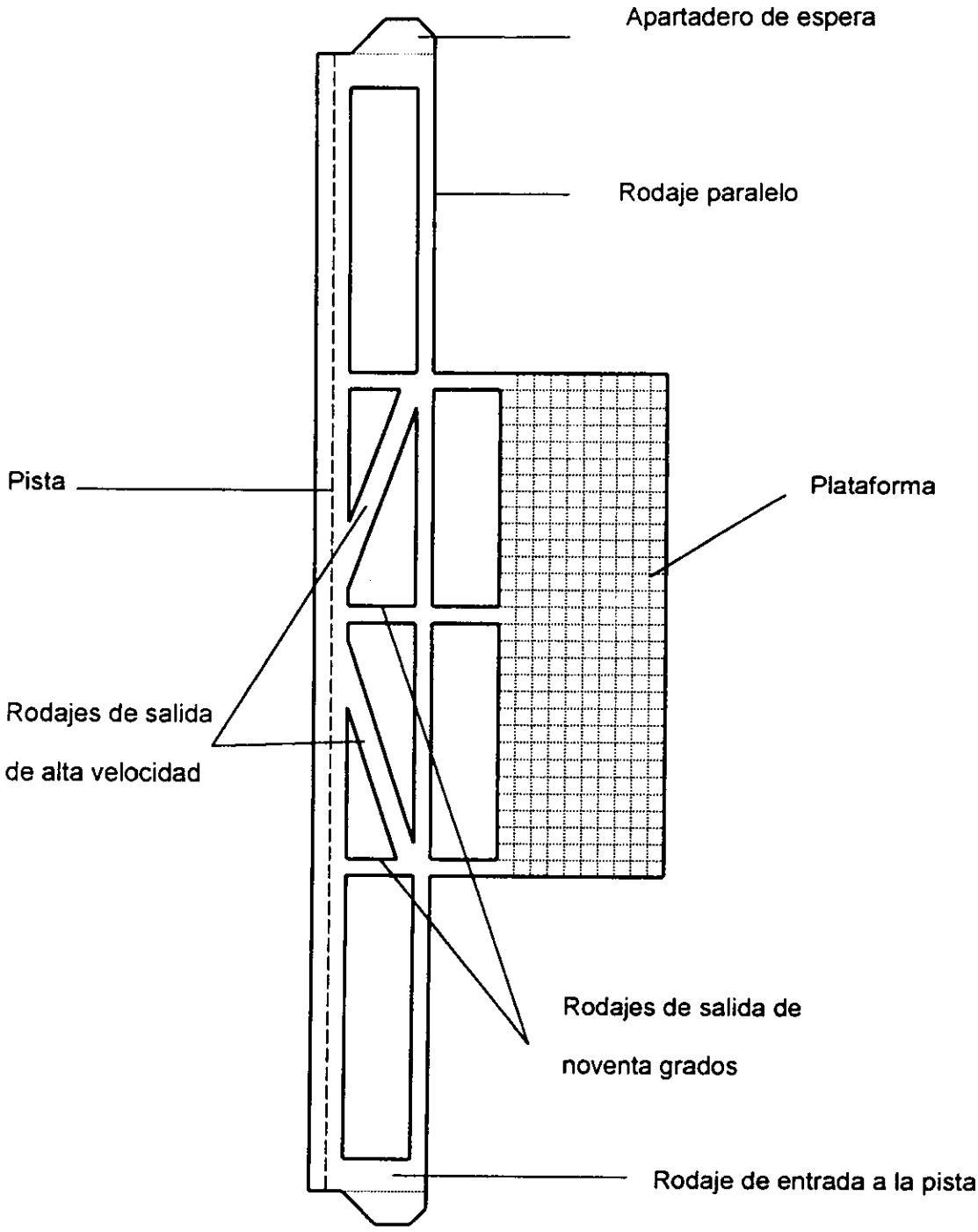

Figura 1.4 Elementos de operación terrestre de un aeropuerto

CAPÍTULO 2

EVALUACIÓN TÉCNICA

2. Evaluación técnica

El propósito principal de la evaluación técnica es el de determinar la condición actual de la estructura del pavimento. Se pueden utilizar diferentes tipos de medidas para caracterizar o definir la condición de un pavimento en los aeropuertos.

En esencia la evaluación del pavimento sirve a las actividades de planeación y diseño de la administración del mismo y puede servir también a las actividades de construcción y conservación.

La función de la evaluación técnica en un sistema de administración de pavimentos puede ser resumida de la siguiente forma:

1. Verificación de los datos de entrada para el diseño, y actualizarlos si es necesario.
2. Reestructuración de las medidas de conservación.
3. Mejorar los modelos de diseño.
4. Mejorar las prácticas de construcción y conservación.

2.1 División de los elementos de operación terrestre

Para poder realizar la evaluación técnica, es necesario dividir los pavimentos de cada aeropuerto en unidades referidas como facilidades, secciones y unidades muestra. Una facilidad es una sola entidad que sirve a una función distintiva. Por ejemplo, una pista es considerada como una facilidad porque sirve a una sola función (permitiendo a una aeronave despegar o aterrizar).

Debido a la disparidad de características que pueden suceder en una facilidad, es mejor subdividir a ésta, en unidades llamadas secciones. Una sección es una porción de pavimento que tiene un historial de construcción uniforme, la misma estructura del pavimento, e iguales características del tránsito. Las secciones son usadas como unidades de administración para la selección de programas potenciales de conservación y rehabilitación.

La mejor guía para decidir la localización de la sección es pensar en ésta como la unidad de reparación o la porción de pavimento que será administrada independientemente y evaluada separadamente para la conservación. Durante la actual inspección puede ser necesario definir divisiones de sección adicionales si existe un cambio definitivo en la

condición o la superficie. El seccionamiento de los pavimentos debe tener en cuenta las diferencias que afectarán el comportamiento del pavimento en el tiempo. En pavimentos que reciben cargas pesadas, es importante separar áreas con tránsito pesado, debido a que los patrones de deterioro asociadas con estas pueden ser muy diferentes.

Las inspecciones que se realizan de una manera cíclica, permite a la empresa operadora de un grupo de aeropuertos mejorar el balance en el uso de sus recursos y el de mantener a su equipo de técnicos familiarizado con los procedimientos de inspección.

Por otro lado, la ventaja de elegir secciones de pavimentos con características homogéneas da facilidad al análisis de los datos. La condición de cada sección de pavimento puede ser evaluada y consecuentemente pueden ser formulados planes oportunos de conservación y rehabilitación. Los límites de la sección son usualmente definidas en base a parámetros seleccionados de control, tales como inicio o fin de contratos de construcción, niveles de tránsito, conservación, intersección con otro elemento principal, cambio en el tipo de pavimento o geometría, etc. La longitud de la sección puede variar desde unos cuantos metros hasta algunos kilómetros.

Las secciones de pavimento son a su vez subdivididas en unidades muestra para propósitos de inspección. La Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos establece que una unidad muestra para pavimentos rígidos es aproximadamente 20 losas; una unidad muestra para pavimentos flexibles es un área de aproximadamente 5000 metros cuadrados. Para determinar un diagnóstico total de la condición del pavimento y para identificar secciones que necesitan ser reparadas dentro del periodo de planeación, no todas las unidades muestra necesitan ser inspeccionadas. Un índice de muestreo de los elementos de operación terrestre, es normalmente aceptado. En áreas en donde se ha experimentado una gran velocidad de deterioro o volúmenes altos de tránsito, se recomienda efectuar una inspección detallada. Adicionalmente, áreas localizadas que muestren algún signo de debilidad pueden ser seleccionadas para una evaluación más detallada.

2.2 Subsistemas que componen la evaluación técnica

Para realizar el análisis técnico del estado actual de los pavimentos, el SAP debe establecer como primera demanda un inventario suficiente y confiable de los elementos aeroportuarios cuyos datos debe organizar y procesar al interior de sus distintos subsistemas que son los siguientes:

a) Datos generales. Registrar y archivar datos relativos a la ubicación de las pistas y las características del tránsito.

La función de este subsistema es el registro de todos y cada uno de las secciones de los elementos por evaluar. Actúa como un archivo permanente con opción de actualización que proveé de información y retroalimanetación a los demás subsistemas.

En este caso, se debe considerar el crecimiento del tránsito anual, ubicación del aeropuerto, temperatura ambiente del aeropuerto, aeronave tipo, peso bruto, disposición y número de ruedas, carga por pierna, presión de neumáticos, tránsito inicial y porcentaje de crecimiento anual.

Hay que señalar que generalmente que los pavimentos en aeropuertos son diseñados para grandes magnitudes pero pocas repeticiones de carga, contrario a lo que sucede con los pavimentos para carreteras.

b) Índice de perfil. Calificar el estado superficial de la pista.

La rugosidad en el pavimento es un fenómeno experimentado por el pasajero y el operador de un vehículo o aeronave viajando sobre su superficie. Es común ver a la rugosidad en términos de la distorsión de la superficie del pavimento que contribuye a un indeseable o no confortable trayecto. Esta definición requiere una medida y un método de análisis para cuantificar las distorsiones de la superficie del pavimento. Una vez que la medida y el método de análisis es seleccionado, las diferentes agencias pueden establecer escalas de interpretación para determinar la severidad del nivel de rugosidad.

Para muchos propósitos, la rugosidad puede ser dividida en tres componentes de distorsión de perfil: transversal, longitudinal y horizontal.

Las distorsiones de la superficie del pavimento pueden generar tanto aceleraciones verticales como laterales. La aceleración vertical es el factor que contribuye mayormente a la incomodidad del ocupante y derivada de una distorsión longitudinal del perfil del pavimento. La medida del perfil longitudinal en la trayectoria de la rueda de un determinado vehículo provee la mejor muestra de la rugosidad de una superficie de rodamiento. Para pavimentos de aeropuertos las medidas longitudinales de perfil deben ser realizadas en la trayectoria de las ruedas de la aeronave que utiliza las facilidades.

Existen muchos dispositivos usados para la evaluación de la rugosidad del pavimento que no miden el perfil del mismo. En vez de eso, estos miden la respuesta de un vehículo a la rugosidad de la estructura y son por tanto sensitivos a las características del vehículo y a

la velocidad de medida. Mientras estos dos parámetros permanezcan constantes, dichos dispositivos producirán índices confiables de rugosidad. Sin embargo, las limitaciones de estos dispositivos necesitan ser completamente comprendidos, especialmente cuando se analizan sus resultados a través del tiempo, o cuando se comparan los resultados de diversos dispositivos.

Los dispositivos utilizados para obtener el índice de perfil son los perfilógrafos, perfilómetros o rugosímetros. Existen varios diseños de dispositivos que operan bajo el mismo principio. Los perfilógrafos consisten en un juego de ruedas de carretón en el frente y en la parte posterior, una rueda registradora en el centro y una registradora de cinta gráfica para la captura del movimiento de la rueda registradora. La rueda registradora es libre de moverse verticalmente cuando el dispositivo pasa sobre protuberancias y depresiones en el pavimento. Los registros de las cintas gráficas de la rugosidad de los pavimentos en aeropuertos son analizadas y el resultado es reportado en pulgadas de rugosidad por milla (figura 2.1).

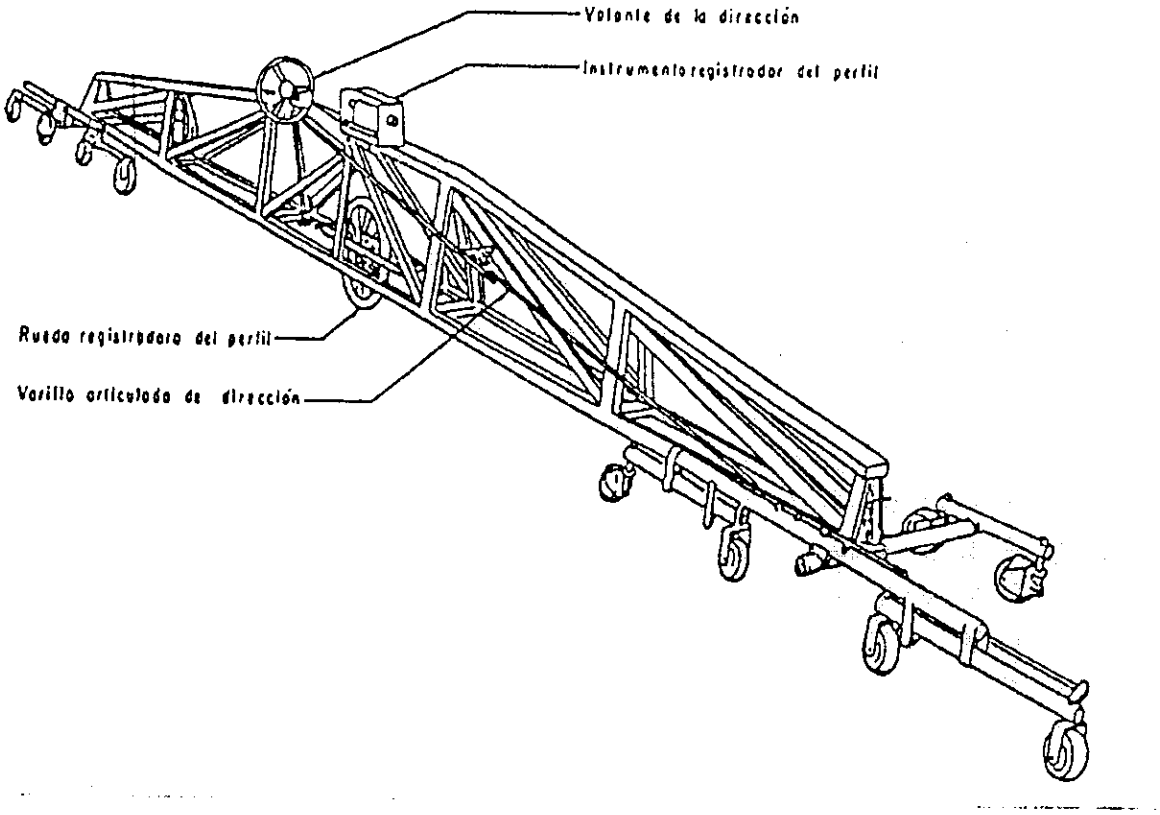

Figura 2.1 Perfilógrafo longitudinal

Los perfilógrafos han sido desarrollados por los departamentos de carreteras de California y Texas. El número y arreglo de las ruedas y la longitud del dispositivo son las principales diferencias entre los distintos tipos de aparatos. Las ventajas que presentan los perfilógrafos son su bajo costo inicial y facilidad de operación. La desventaja que presenta este tipo de dispositivo es su baja velocidad de operación.

Existen dos diseños básicos de rugosímetros, de acuerdo al tipo de respuesta a la rugosidad; aquellos que miden el desplazamiento entre el cuerpo del vehículo y el eje, y aquellos que usan acelerómetros para medir la respuesta del cuerpo o el eje del vehículo a la rugosidad del pavimento.

Los pavimentos de los aeropuertos presentan diversos problemas particulares en el índice de perfil:

1. Existen dos tipos de usuarios, pasajeros y tripulación de vuelo. Es probablemente suficiente el considerar solamente la tripulación de vuelo (particularmente, el piloto) porque su respuesta a la rugosidad es más crítica, principalmente con relación a la seguridad.
2. El rango de tipo de aeronaves presenta una variación mucho más amplia de interacción vehículo-pavimento que la que ocurre en caminos.
3. Los efectos de la rugosidad en pavimentos de aeropuertos están relacionados principalmente a la seguridad y daño por sobrecarga, en contraste con los caminos, los cuales están relacionados más a la variación de la calidad de el trayecto que percibe el usuario.
4. No ha existido una medida ampliamente aceptada del índice de perfil, en términos del usuario, aún desarrollado para pavimentos de aeropuertos. El criterio que utiliza ASA es de un índice de perfil menor o igual a 3.0
5. Largas ondulaciones son más importantes en pistas de aeropuertos que en carreteras debido a las altas velocidades, diferentes configuraciones de tren y rueda, etc.

Durante los pasados años, los dispositivos RTRRMS que miden el tipo de respuesta a la rugosidad y que han llegado a ser utilizados ampliamente para la evaluación de rugosidad en pistas. El perfilómetro dinámico de superficie fue sugerido a principios de 1971 para medir la rugosidad de los pavimentos en aeropuertos y ha tenido desde entonces un grado significativo de uso. Este instrumento tiene la capacidad para medir la rugosidad en términos de varias longitudes y amplitudes de ondas que son importantes para la

interacción piloto-pavimento-aeronave, y es lo suficientemente rápido para minimizar el tiempo que permanezca clausurada la pista para realizar las mediciones respectivas.

En este subsistema puede utilizar el índice de pérfil actual que tendrá un rango entre 0 y 5, siendo la calificación la siguiente:

0 = Intransitable

1 a 2 = Malo

2 a 3 = Regular

3 a 4 = Bueno

4 a 5 = Excelente

c) Capacidad estructural. En general, este aspecto se concreta en calcular la deflexión característica para obtener los refuerzos necesarios, pues se considera que hay una relación directa entre este parámetro y la degradación de la capacidad estructural.

Determinar la capacidad estructural de un pavimento requiere primero de un monitoreo o medidas de algunas características el pavimento. Después se realiza un análisis de los datos obtenidos para estimar la capacidad de carga y la vida de servicio del pavimento bajo las condiciones de tránsito esperadas.

En la evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos, el conjunto de los elementos de operación terrestre aeroportuario y proyectos particulares, o secciones dentro de dichos elementos, necesitan ser consideradas. Por ejemplo, la asignación de fondos será determinada considerando a los elementos, y estas decisiones determinan la disponibilidad de fondos para cualquier proyecto en particular. Deben existir por lo tanto, procedimientos para evaluar el sistema total en un nivel adecuado para poder identificar estructuralmente secciones deficientes. Finalmente, deben ser llevadas a cabo evaluaciones estructurales detalladas en cada proyecto como parte de un diseño de rehabilitación.

La deflexión o medidas de la curvatura de la superficie del pavimento bajo cargas específicas representan los medios usuales para el monitoreo de los pavimentos.

La necesidad para la evaluación estructural y/o deficiencias estructurales pueden ser indicadas por otros tipos de evaluaciones, como lo es el monitoreo del deterioro de la superficie del pavimento.

Por lo anterior, se debe aceptar algún tipo de correlación entre la evolución del estado superficial del pavimento y su condición general, de manera que, cuanto más pobre sea la calidad superficial y más rápidamente se deteriore, peor debe ser la condición estructural.

La deficiencia estructural puede correlacionarse con alguna medida hecha desde la superficie del pavimento. La deflexión parece ser el concepto que mejor sirve para estos fines. Con esta conclusión se acepta que la magnitud de la deflexión mide el defecto estructural, aunque no lo analice ni lo localice.

Cuando las deflexiones muestren deficiencia estructural en el pavimento, sólo la exploración directa permitirá el diagnóstico y la ubicación precisa de dichos daños estructurales.

Los métodos de evaluación son comúnmente clasificados como destructivos o no destructivos. Normalmente, la diferencia consiste en si ocurre o no un disturbio físico de los materiales de la estructura. La evaluación destructiva consiste usualmente en la apertura de calas para muestrear y probar los materiales componentes del pavimento.

Muchas técnicas efectivas de evaluación involucran medidas de superficie de deflexión o de curvatura combinadas con perforaciones de nucleo pequeño para obtener espesores y muestras de material subyacente para pruebas de laboratorio. Estas son consideradas pruebas no destructivas debido a que no hay un deterioro importante en la estructura del pavimento.

Las técnicas de medidas de deflexión son ampliamente usadas para la evaluación estructural de pavimentos. En general, estas técnicas son seleccionadas en lugar de métodos destructivos debido al bajo costo, menor interrupción del tránsito, menor daño a el pavimento, y la facilidad de realizar un número suficiente de mediciones para cuantificar su variabilidad.

Las medidas de deflexión requiere al menos de la interrupción del tránsito del lugar que está siendo sujeto a prueba, y el uso de un dispositivo de medida de deflexión que puede ser relativamente caro. Adicionalmente, habrá costos de transporte para llegar al sitio de prueba. Por lo tanto, la evaluación estructural es un componente relativamente caro, por

lo que debe ser cuidadosamente planeada, que debe incluir la selección del equipo, el plan de recolección de los datos y el método de análisis de los mismos.

La localización de los puntos de deflexión deben ser adecuados para captar la variabilidad en la capacidad estructural del pavimento. Esta variabilidad puede deberse a factores tales como la no uniformidad de los materiales, áreas locales con mucha humedad, variaciones en la construcción, etc. Los pavimentos que presenten gran variabilidad en sus características deben ser sujetos a un mayor número de medidas de deflexión.

Una buena aproximación para la toma de muestras involucra un plan de dos etapas. La primera etapa tendría relativamente largos espacios, y la variabilidad sería luego analizada para determinar el número de lugares de deflexiones requeridas para cuantificar la capacidad estructural a un nivel deseado de confiabilidad.

Esta aproximación puede ser útil en la evaluación de pavimentos para aeropuertos donde el área pavimentada está confinada. Hay que señalar que el no tener una buena cuantificación en la variabilidad de la capacidad estructural de un pavimento puede traer como consecuencia una estrategia de rehabilitación inapropiada.

En general las deflexiones se determinan en las zonas de las trayectorias frecuentes de rodamiento.

Frecuentemente, todas las evaluaciones no destructivas de la capacidad estructural de los pavimentos son realizadas con deflectómetros. Estos pueden ser clasificados en cuatro categorías:

1. Dispositivos estáticos que miden la respuesta del pavimento a una carga estática o una sola aplicación de una carga en movimiento lento.
2. Dispositivos vibratorios que miden la respuesta del pavimento a una carga cíclica o dinámica.
3. Dispositivos de impulso que cargan el pavimento soltando una masa conocida desde una altura también conocida y midiendo la respuesta del pavimento al impacto de dicha masa.
4. Dispositivos multimodo.

Se ha aceptado que el comportamiento estructural de los pavimentos asfálticos está correlacionado directamente con la deformabilidad elástica superficial del sistema.

Dentro de los dispositivos estáticos que más se utiliza se encuentra la viga Benkelman, cuyos resultados, combinados con medidas de la curvatura de la cubeta de deformación producida por la carga aplicada, permiten conocer la respuesta elástica inmediata del sistema.

La viga Benkelman está constituida esencialmente por una palanca interapoyada, con dos extremos móviles, uno de los cuales (detector), se coloca en la superficie del pavimento entre dos llantas, con una presión de inflado de 5.8 kg/cm2, transmitida al pavimento por una rueda de eje sencillo de un camión lastrado, de tal manera que se disponga de una carga normalizada de 4.1 ton. En dicha rueda; en el otro extremo (registrador), se encuentra adosado un extensómetro que mide la deformación elástica de recuperación, que se produce a medida que se retira la rueda del detector, cuando el vehículo se mueve a baja velocidad. El dispositivo móvil se encuentra conectado a un soporte fijo mediante el eje de un apoyo articulado.

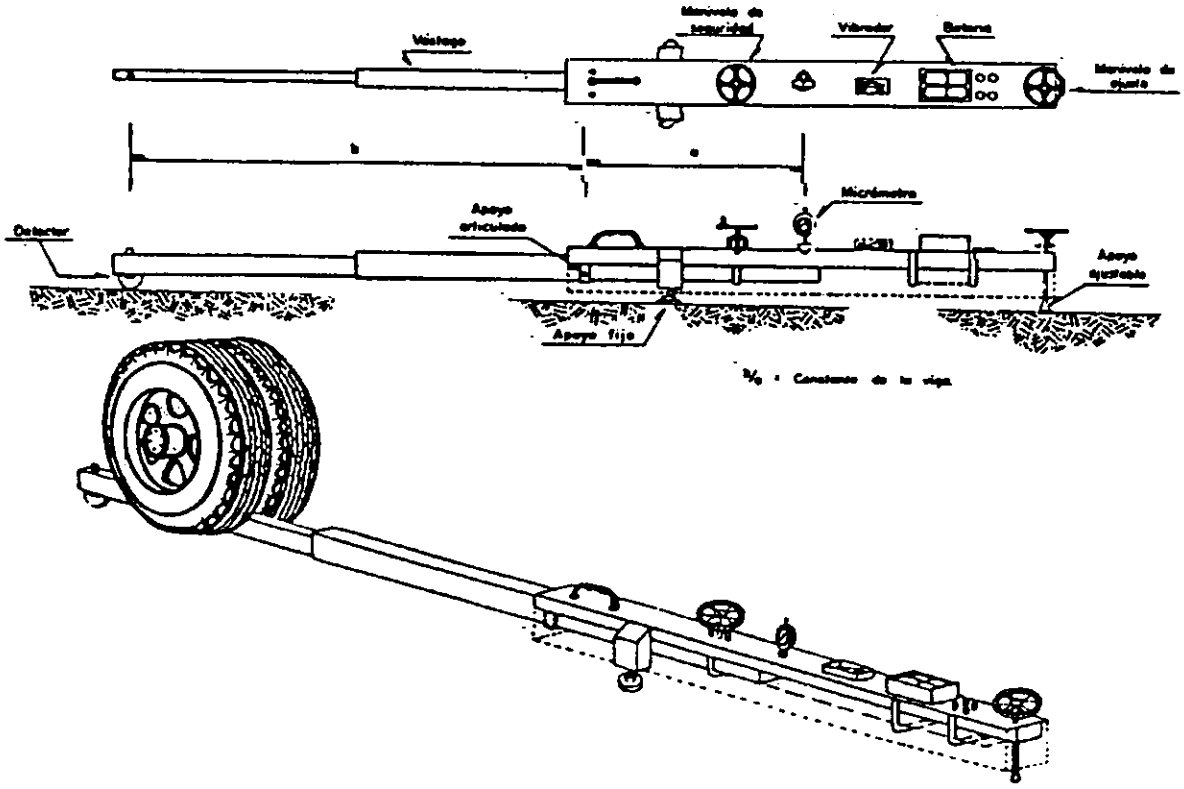

Figura 2.2 Viga Benkelman

El soporte fijo, descansa sobre la superficie del pavimento en tres apoyos, que determinan un plano de referencia y que deben estar fuera de la influencia de la cubeta deformada; uno de estos apoyos es ajustable, para absorber las irregularidades superficiales presentes en el pavimento.

Para la operación de la viga Benkelman, se seleccionan puntos de medición sobre la superficie del pavimento, ya sea en forma aleatoria o más comúnmente, a intervalos regulares a largo de los carriles de circulación de los vehículos, con el propósito de contar con un número suficiente de lecturas, desde el punto de vista estadístico.

Otro dispositivo es la viga Benkelman automática, que opera con el mismo principio que la anterior y creada para incrementar la velocidad en las medidas de deflexión. Las vigas son montadas en un vehículos de carga. Las vigas son posicionadas y se registra la máxima deflexión automáticamente desde un punto de prueba a otro punto de prueba, mientras el conductor maneja el camión a lo largo del pavimento.

El deflectógrafo de La Croix, fabricado en Europa, es una viga de deflexión automatizada comercialmente disponible y que ha sido ampliamente usada en toda Europa, pero no en el continente Americano. El vehículo se mueve a una velocidad constante de 3 km por hora durante la prueba. La unidad produce una gráfica de las deflexiones verticales y los datos son registrados en una cinta magnética para análisis de computadora.

Indices de capacidad estructural.

No existe una aproximación unificada para el establecimiento de un índice de capacidad estructural. Básicamente, el ingeniero en pavimentos tiene dos preocupaciones con respecto a la capacidad estructural:

1. ¿Cual es la carga máxima que un pavimento puede soportar sin causar un deterioro excesivo inmediato?
2. ¿Cuantas repeticiones de carga por eje puede soportar el pavimento?

La primera preocupación es aplicable para pavimentos en aeropuertos donde la máxima capacidad del pavimento debe ser conocida para poder definir la clase de aeronave que puede utilizar la instalación.

El desarrollo de un índice de capacidad estructural para el caso de cargas repetidas es complejo debido a la necesidad de predecir el tránsito futuro en la estructura del

pavimento, especialmente con respecto a la distribución del peso que está en función del tipo de tren de aterrizaje.

En lo referente a los dispositivos de impacto, estos emplean una masa que se deja caer en un plato amortiguador. Estos dispositivos son conocidos como Falling Weight Deflectometers (FWD). Se aplican diversos niveles de fuerza pico variando la magnitud de la masa que cae y la altura de caída. Las deflexiones verticales pico producidas son registradas por el FWD en el centro del plato y a diversas distancias del plato. En algunas opiniones el impacto de la fuerza transitiva creada por el FWD en el pavimento se aproxima más al efecto creado por una rueda cargada en movimiento, que los que producen los dispositivos vibratorios. Desarrollados en Europa, estos dispositivos se han vuelto populares en los Estados Unidos y Canadá, debido en gran parte a su adopción a mediados de los ochenta por el estudio de comportamiento de pavimentos a largo plazo en el programa estratégico de investigación de carreteras (figura 2.3)

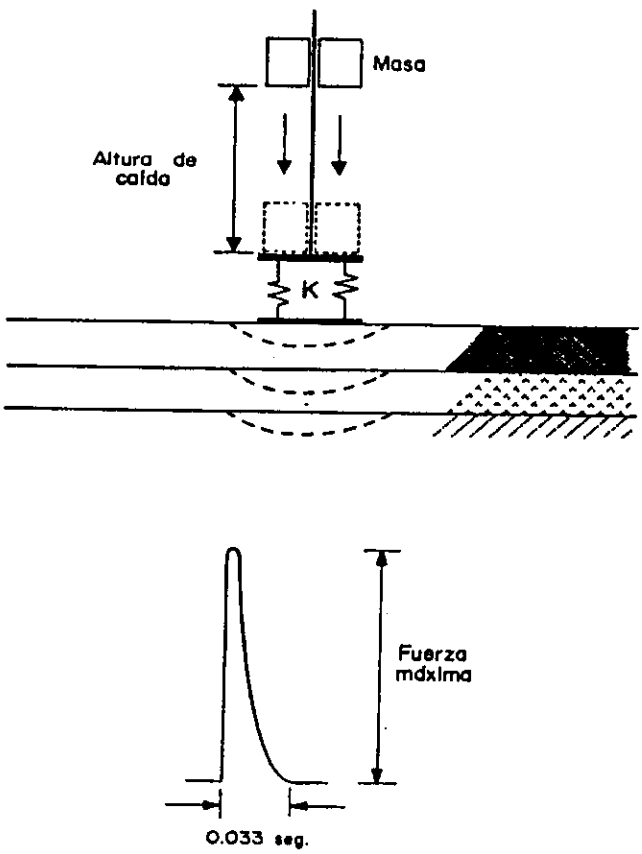

Figura 2.3 Principio básico de un Falling Weight Deflectometer

El Dynatest FWD es un dispositivo que utiliza geófonos para registrar las deflexiones pico. La secuencia operativa es completamente automática. Fuerzas pulsantes entre 1500 a 27000 lb son producidas con el modelo 800 FWD

d) Inventario de deterioros. Manejar inventario de fallas y deterioros en los tramos evaluados.

Los encargados de la red aeroportuaria de la nación tendrán que conducir inspecciones periódicas del deterioro de la superficie de los pavimentos. Estas inspecciones consisten en medir y evaluar varios tipos de agrietamiento, desprendimientos, desintegración, deformación y otros. Estas inspecciones son dirigidas en gran parte hacia la evaluación de las medidas de mantenimiento necesarias, para prevenir deterioros futuros o acciones de rehabilitación necesarias para el mejoramiento del pavimento.

Las inspecciones de deterioro deben detallarse en forma razonable. Estas deben identificar el tipo de deterioro, su severidad y extensión, y en algunos casos también su localización.

Existe cierto grado de similitud entre los diferentes métodos para efectuar este inventario con respecto a los componentes o factores que se registran usualmente. Estos incluyen frecuentemente los siguientes clases generales de factores:

Defectos de superficie.

Deformaciónes permanentes o distorsiónes.

Agrietamientos.

Reparaciones.

Como hemos mencionado anteriormente un inventario de deterioros debe cuantificar el tipo, severidad, y extensión de cada uno de los tipos de deterioro comúnmente encontrados en la superficie del pavimento. Hay que mencionar que los procedimientos de inspección complejos son muy caros y proporcionan información excesiva, por lo que las inspecciones hay que realizarlas en la forma más simple posible.

Una vez que se han determinado los tipos de deterioro, deben definirse cuidadosamente, respaldados con fotografias. La mayoría de las inspecciones del deterioro de los pavimentos se realizan por observación directa por parte de personal familiarizado en el campo de los pavimentos. Procedimientos y equipo automático que puedan suplir las

observaciones humanas están siendo desarrollados, pero sistemas completos automáticos faltan por ser desarrollados.

Las inspecciones del deterioro de los pavimentos deben ser realizadas caminando a lo largo de la sección del pavimento, o desde un vehículo en movimiento a baja velocidad. Las inspecciones del pavimento que se realizan caminando proveen de los datos más precisos sobre la condición del mismo y son generalmente usados para la evaluación de pavimentos en aeropuertos.

Los deterioros frecuentes son clasificados como aquellos generados tanto por tránsito, medio ambiente, o por combinación de éstos. Esto último ayuda en el diagnóstico de sus causas y en la selección de los tratamientos para la reparación de los deterioros.

Las tablas 2.1 y 2.2 proveen ejemplos de definiciones de los tipos de deterioros para pavimentos rígidos y flexibles. En general el nombre de los deterioros se refieren a su apariencia física, por lo que la información de esas tablas es descriptiva.

Tabla 2.1 Deterioro en pavimentos asfálticos

Tipo de deterioro	Descripción
Grietas de cocodrilo	Grietas reticulares o poliédricas interconectadas causadas por falla de fatiga debido a la repetición de cargas
Grietas en bloque	Grietas reticulares o poliédricas interconectadas causadas por contracción del asfalto y el ciclo de temperatura diaria. El tamaño de los bloques varía desde 1x1 hasta 10x10 pies. Generalmente ocurre sobre una extensa área de la superficie del pavimento.
Distorsiones	Corrugaciones, protuberancias y hundimientos. Desplazamientos abruptos arriba o abajo de la superficie del pavimento. Las distorsiones son evaludadas en relación a la calidad del manejo del vehículo. Las roderas o canalizaciones son evidencia de una falla estructural en progreso.
Agrietamiento longitudinal y transversal	Grietas que están paralelas o transversales al centro de la linea del pavimento. Las grietas longitudinales son generalmente relacionadas a defectos de construcción (juntas) o un suelo de cimentación expansivo, y las grietas transversales son relacionadas a las variaciones de temperatura y al endurecimiento del asfalto.
Bacheado	Reparación del pavimento con nuevo material.
Surcos	Depresión en el perfil transversal de la superficie del pavimento.

(Referencia 1)

Tabla 2.2 Deterioros en pavimentos de concreto

Tipo de deterioro	Descripción
Alabeo	Expansión de la losa con insuficiente ancho de la junta, causando movimientos hacia arriba del pavimento en la junta. Esto es estimado en relación a el efecto en la calidad del manejo del vehículo.
Ruptura en juntas	Las grietas intersectan las juntas a una distancia menor o igual a un medio de la longitud de la losa en ambos lados. Las grietas se extienden verticalmente a través de la profundidad de la losa.
Durabilidad o Agrietamiento en D	Causado por la expansión en el deshielo de grandes agregados resultando en una ruptura del concreto.
Agrietamiento lineal	Las grietas dividiendo la losa en dos o más piezas. Causado por fricción, tránsito y ciclos de humedecimiento y secado del terreno de cimentación.
Agregado pulido	Causado por el tránsito. El agregado en la superficie se vuelve suave al toque. La medida del coeficiente de fricción es bajo.
Bombeo	Expulsión de material desde el terreno de cimentación hacia la losa a través de las juntas o grietas. Causado por deflexiones de la losa por el paso de cargas de tránsito.

(Referencia 1)

Las inspecciones visuales de deterioro de superficies tienen varias desventajas incluyendo el peligro de estar en la pista o calle de rodaje, inadecuado tamaño de las muestras y el alto costo del personal realizando la inspección a velocidad lenta. Estos factores han impulsado el desarrollo de técnicas automatizadas para evaluar el deterioro de los pavimentos. Equipos disponibles varían desde computadoras laptop/notebook (formas automatizadas de recolección de datos) hasta video y fotografías de la superficie del pavimento. Sin embargo, todos los métodos de trabajo a la fecha aun requieren cierto grado de intervención humana en el proceso de identificación y cuantificación de los tipos de deterioro. No obstante, se continua con investigación y desarrollo de equipo para remplazar la observación humana.

Los dispositivos basados en videofilmación capturan imágenes continuas de la superficie del pavimento que pueden ser evaluadas en gabinete. Esto proveé un registro permanente de la condición de la superficie.

Es importante mencionar que el deterioro en pavimentos es ampliamente utilizado como la única medida de calidad de los pavimentos en aeropuertos. Factores que contribuyen a el uso de deterioros, en preferencia a la rugosidad para la evaluación de pavimentos en aeropuertos incluyen:

1. Superficie de área limitada permitiendo la captura de datos de deterioros más detallados y por lo tanto se logra una mejor habilidad para estimar la calidad del pavimento.
2. El escaso desarrollo de un concepto de serviciabilidad, comparable al que se tiene en carreteras.
3. La imposibilidad de una aeronave para alterar su velocidad y dirección, particularmente en las pistas.
4. El daño potencial que existiría cuando la rueda de una aeronave golpeara un deterioro severo.
5. El daño potencial que existiría si piezas sueltas de pavimento son succionadas dentro del motor de una aeronave.

Estos factores no significan que la rugosidad deje de tener importancia en los aeropuertos. De hecho, pavimentos con un alto grado de rugosidad pueden contribuir a la fatiga de los componentes estructurales en una aeronave.

Para la determinación del nivel de deterioro de una sección de pavimento, se viene utilizando en México el Indice de la Condición del Pavimento y cuyas siglas son ICP.

El ICP es un indicador numérico que califica la condición de la superficie del pavimento. Este indicador proporciona una medida de la condición presente del pavimento basado en el deterioro observado en la superficie de la estructura que asimismo indica la integridad estructural y la condición operacional en superficie. Es importante mencionar que el ICP no puede medir la capacidad estructural ni proporcionar medidas directas de rugosidad o de resistencia al deslizamiento. Sin embargo proveé una base objetiva para la determinación de las necesidades de reparación y conservación. El indicador ICP proporciona una retroalimentación en lo referente al desempeño del pavimento para

validación o mejoramiento en el diseño de la estructura y en los procedimientos de mantenimiento. El ICP de un pavimento dado es determinado llevando a cabo los siguientes pasos:

1. La sección del pavimento es primeramente divida en unidades muestra. Una unidad muestra para pavimentos de concreto consta de aproximadamente de 20 losas; una unidad muestra para cemento asfáltico es una área de aproximadamente de 465 m2.
2. Las unidades muestra son inspeccionadas y los tipos de deterioro y sus niveles de severidad y densidad son registradas.
3. Para cada tipo, densidad y nivel de severidad de la distorsión dentro de una unidad muestra, un valor de deducción es determinado a partir de una curva apropiada. La abcisa de la gráfica es la densidad o extensión del deterioro. Cada gráfica contiene tres curvas correspondientes a la severidad del deterioro. La ordenada de la gráfica es el valor deducido.

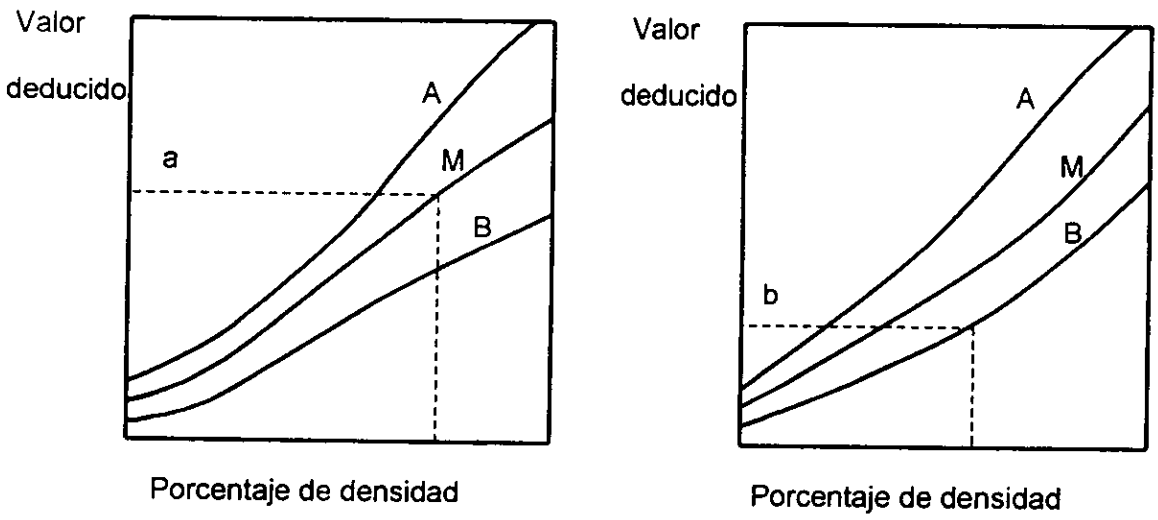

Figura 2.4 Valores de deducción

4. El valor total de deducción (VTD) es determinado adicionando todos los valores deducidos para cada condición de deterioro, observada por cada unidad muestra inspeccionada. VTD = a + b

5. Un valor de deducción corregido es determinado a partir de la gráfica apropiada. Dicho valor está basado en el valor total deducido y en el número de condiciones de deterioro, que tienen valores de deducción individuales mayores de cinco puntos.

6. El PCI de cada unidad muestra inspeccionada es calculada de la siguiente forma:

   ICP = 100 – CDV

7. El ICP de toda la sección es calculado promediando los ICP de todas las unidades muestra inspeccionadas.

8. La condición de la sección del pavimento se obtiene utilizando la siguiente figura, la cual presenta descripciones verbales de la condición del pavimento, como función del valor del ICP. Esta figura asocia un estado cualitativo del deterioro del pavimento para diferentes rangos de ICP.

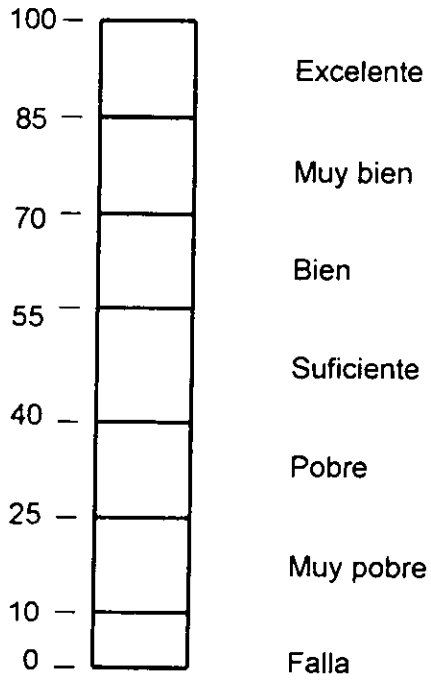

Figura 2.5 Indice de condición del pavimento

Hay que tomar en cuenta que la curvas de valor de deducción son desarrolladas para un conjunto específico de definiciones para tipos de deterioro y niveles de severidad. Si el organismo o agencia elige el modificar estas definiciones, especialmente con respecto al nivel de severidad, entonces las curvas de valor de deducción deben ser cuidadosamente examinadas y modificadas.

Las funciónes del índice de ICP son las siguientes:

a) Un índice de la condición presente en términos tanto de integridad estructural y condiciones operacionales.

b) Una base racional y objetiva para la determinación de las necesidades de conservación y rehabilitación.

c) Un sistema de alerta para una identificación temprana de los requerimientos de reparación importantes.

El ICP está basado en tres características de deterioro: tipo de deterioro, severidad y cantidad.

Los ingenieros reconocen la importancia de los datos de deterioro de pavimentos como un parámetro importante para cuantificar la calidad de la superficie del pavimento. Este parámetro es importante tanto a nivel de elementos de operación terrestre como a nivel de proyecto en la administración de pavimentos, aunque el nivel de detalle requerido para cada aplicación es muy diferente. En ambos casos, la información del deterioro del pavimento es útil en la selección apropiada de los tratamientos.

A nivel de elementos de operación terrestre, el principal problema es el de determinar que clase de tratamiento es requerido, como por ejemplo, la conservación rutinaria. A este nivel, el índice de deterioro puede ser determinado a partir de la realización de un muestreo limitado de cada sección del pavimento.

A nivel de proyecto se requiere una estimación de la extensión específica y de los métodos de reparación de pavimentos, tal como el de reparar una cierta área de agrietamiento. Esto requiere de un nivel más grande de detalle en la inspección de los deterioros.

e) Historial de reparaciones. Servir de archivo a los registros de labores de conservación menores y mayores.

Este subsistema constituye el archivo histórico de las acciones de conservación, menores y mayores, practicadas en cada segmento para un periodo menor o igual a tres años. Su propósito es documentar e informar acerca de las fechas de ejecución y el tipo de trabajos efectuados. Relaciona las deflexiones características críticas con las fechas más recientes de intervención.

Este subsistema deberá registrar la fecha en que se hicieron tanto los mantenimientos mayores como menores.

Dentro del mantenimiento menor se encuentra la aplicación de riegos, el desazolve de drenaje y el bacheo. Dentro del mantenimiento mayor está el tendido de sobrecarpetas de renivelación o rehabilitaciones.

f) Caracteristicas geotécnicas. Analizar las características geotécnicas de las estructuras del pavimento y de su entorno geográfico.

Entre la información que debe manejar este subsistema, destacan los datos relativos a la temperaturas máxima, media y mínima promedio anual, la precipitación promedio anual, la topografia predominante y el tipo de drenaje registrado en la zona. En relación al tipo de suelo sobresalen el valor relativo de soporte y la presencia de características que lo hagan problemático. En cuanto a la estructura del pavimento, se deben registrar los espesores de cada capa, sus materiales componentes e indicar si alguna de éstas fue estabilizada, en cuyo caso se precisa el tipo de material.

Para evaluar estas características se hace necesario efectuar calas fuera de los acotamientos.

g) Evaluación de seguridad en pavimentos. La evaluación de pavimentos para seguridad usualmente considera solamente lo resbaladizo de éstos en terminos de resistencia al deslizamiento que es llamada fricción superficial. Existen varios componentes de la evaluación de seguridad de los pavimentos que incluyen:

1. Resistencia al deslizamiento.

2. Baches y roderas (relacionados con la acumulación de agua y con los peligros del acuaplaneo o acumulación de hielo).
3. Reflexión de la luz en la superficie del pavimento.
4. Señalamiento horizontal y vertical.
5. Presencia de escombros u objetos extraños (especialmente relacionados con los pavimentos para aeropuertos).

Hay que mencionar sin embargo que el pavimento resbaladizo es por mucho el factor más común e importante que interviene en una situación de riesgo.

El fenómeno del deslizamiento involucra una interrelación muy compleja entre los factores de pavimento, contaminación de la superficie del pavimento por aceite y agua y hule adherido, parámetros del vehiculo (principalmente llantas) y factores de operación del vehículo. No obstante, debido a la importancia de la resistencia al deslizamiento en la seguridad del tránsito, la investigación ha sido exitosa en desarrollar y comprender el fenómeno y en desarrollar técnicas para medir procedimientos de evaluación.

El coeficiente de fricción Mu en física es calculado dividiendo la resistencia de fricción al movimiento en el plano de la interfase, F, entre la carga perpendicular actuante perpendicular a la interfase, L.

La evaluación de la fricción en pavimentos de aeropuertos es frecuentemente llevada a cabo con un dispositivo, tal como el llamado Mu meter, que mide la fuerza requerida para sostener una rueda en un ángulo fijo en la dirección de viaje.

Los accidentes de patinaje o resbalamiento no solamente ocurren por deslizamiento directo hacia adelante (como en una parada de emergencia) donde todas las ruedas están frenadas, sino también cuando una rueda o un juego de éstas es bloqueada o está por deslizarse fuera de las curvas. La mayoría de estos accidentes ocurren bajo condiciones de humedad o de hielo. Por lo tanto, las medidas de la resistencia al deslizamiento son conducidas generalmente en pavimentos mojados.

Todas las medidas de resistencia al deslizamiento están basadas empíricamente. Los resultados producidos por varios dispositivos y métodos de prueba son significativos solamente cuando son evaluados en relación a una base empírica de evidencia desarrollada a través del tiempo usando métodos de prueba estándar. Por lo tanto, es importante seguir los métodos estándar para la calibración y uso del dispositivo.

Existen varios dispositivos donde las ruedas están orientadas en cierto ángulo en dirección de la trayectoria. La fuerza que tiende a abrir las ruedas es medida así como también el factor de fricción.

Una simple versión del dispositivo mencionado es el Mu meter, actualmente usado para la evaluación de pistas. Fué originalmente desarrollado y probado en Gran Bretaña y usa dos ruedas, abiertas en un ángulo de 7.5 grados, que proveen el balanceo. El Mu meter mide la fuerza requerida para mantener el ángulo mencionado cuando las ruedas están en movimiento.

Con la introducción de aviones de tipo turbojet, el desempeño del frenado en las superficies de pavimento se volvió más crítica. Bajo ciertas condiciones, se puede presentar una pérdida de fricción, lo que provoca un mal desempeño en el frenado y una posible pérdida en el control del avión. Debido a lo anterior, se están realizando una serie de programas de investigación por parte de organismos de los Estados Unidos como la Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio, la Administración Federal de Aviación, la Fuerza Aérea y gobiernos de varios países.

Se está desarrollando un sistema que permita localizar y reparar áreas donde la fricción se haya deteriorado y provocado la acumulación de hule por desgaste excesivo de las llantas, al impactarse sobre el pavimento, representando un peligro para el frenado de los aviones.

La evaluación de la resistencia al deslizamiento, especialmente para el propósito de la valoración de necesidades futuras de rehabilitación, debe considerar cambios en el tiempo, en el tránsito, y en el clima.

Estas consideraciones de cambio en tiempo, tránsito y clima en la resistencia al deslizamiento requieren de mediciones periódicas. Varios cambios en la naturaleza de la superficie de los pavimentos deben ser reconocidas como posibles factores que contribuyen a dichos cambios en la resistencia al deslizamiento incluyendo:

1. Porosidad
2. Desgaste
3. Pulido de los agregados de superficie
4. Roderas (debido a la compactación, distorsiones laterales o desgaste)
5. Contaminación (Caucho, aceite, agua, etc.)

En un periodo corto, los cambios en la resistencia al deslizamiento pueden ocurrir rápidamente, usualmente debido a la lluvia. En largos periodos de tiempo, como lo pueden ser varios años o la pasada de millones de vehículos, muchos pavimentos muestran un continuo decremento de la resistencia al deslizamiento.

Las predicciones de los cambios en la resistencia al deslizamiento pueden ser realizadas en dos diferentes formas:

1. Extrapolación de un conjunto de datos existentes hacia el futuro, conseguidos a lo largo de un periodo de tiempo.
2. Conducir experimentos de laboratorio ya sea en el estado de diseño inicial o antes de las medidas de diseño de rehabilitación (características de pulido de los agregados, textura, forma, tamaño, pruebas de laboratorio en mezclas simuladas, etc.). Esta aproximación esencialmente proveé solamente un enlace de tipo cualitativo para estimar la resistencia al deslizamiento actual.

La distinción entre deterioro, rugosidad, capacidad estructural y fricción superficial del pavimento es particularmente importante. Deterioro se refiere al deterioro físico de la superficie del pavimento y es generalmente, pero no necesariamente, visible. Rugosidad es derivada de el perfil longitudinal de la superficie de pavimento y afecta al confort o calidad. Bajo la premisa de que los pavimentos son construidos para los usuarios y la rugosidad define por lo tanto la serviciabilidad de la respuesta funcional de el pavimento.

La capacidad estructural es la habilidad del pavimento para soportar cargas sin resultar en un excesivo deterioro. La seguridad de la superficie del pavimento está principalmente relacionada a la fricción superficial o resistencia al deslizamiento del pavimento, pero puede ser también afectado por severos baches.

Estas medidas o caracterizaciones junto con los costos de operación y conservación pueden ser vistos como representación de resultados del pavimento, esto es, son las variables que pueden ser medidas para determinar si el pavimento o no está comportándose satisfactoriamente. Estas salidas o resultados pueden ser originalmente predichas en el estado de diseño y luego evaluado periódicamente mientras que el pavimento está en servicio. La vida de servicio del pavimento se alcanzará cuando cualquiera de las medidas mencionadas alcance un mínimo (o un máximo, dependiendo de la medida) de nivel aceptable. En ese punto, si los fondos suficientes están disponibles, la rehabilitación sería llevada a cabo y un ciclo nuevo de servicio empezaría.

Para finalizar el capítulo de evaluación técnica, a continuación se presenta una representación esquemática de los principales tipos de comportamiento del pavimento a través del tiempo. Algunos de éstos tipos de comportamiento pueden ser predecidos en la etapa de diseño y después serían medidos como parte de la evaluación técnica, cuando el pavimento se encuentre en servicio.

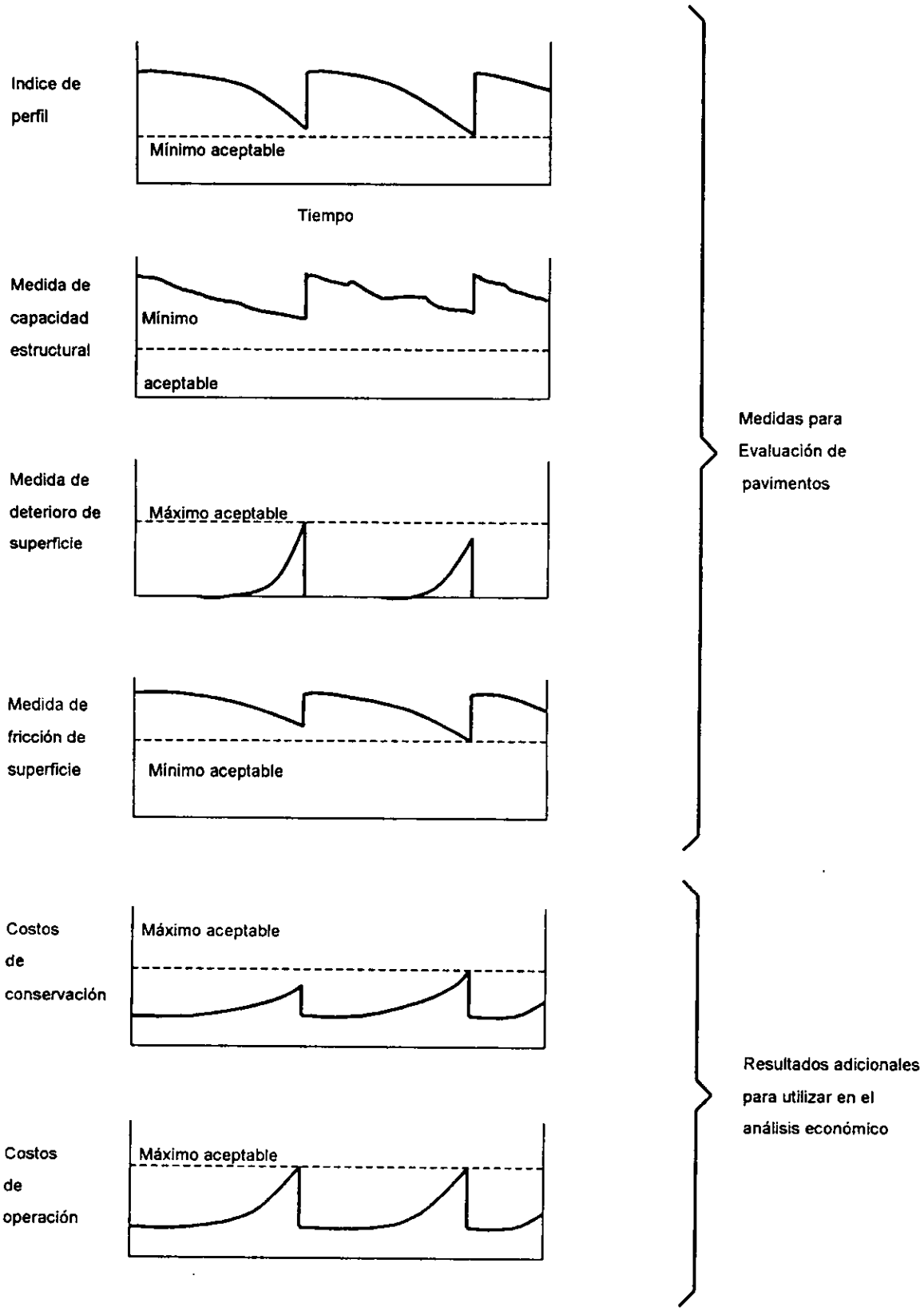

Figura 2.6 Principales tipos de resultados de la evaluación.

En la figura anterior, la gráfica del deterioro de superficie ha alcanzado el límite de aceptabilidad antes que cualquiera de las otras gráficas. En este punto, se puede observar que en el final del primer periodo de vida de servicio del pavimento, alguna medida de conservación ha tenido lugar, como se muestra por la discontinuidad vertical. También se muestra que la medida de conservación afecta a las otras gráficas, tal como un incremento en la capacidad estructural, un mejoramiento en el nivel de servicio, un mejoramiento en la fricción superficial, costos de conservación menores y menores costos de operación.

La vida de servicio de la medida de rehabilitación realizada llega a su fin cuando el índice de servicio alcance el valor mínimo aceptable. En este punto, se ha aplicado otra medida de rehabilitación y otra vez las otras gráficas se han visto afectadas. Por lo tanto, la figura anterior demuestra que cualquiera de las gráficas de comportamiento del pavimento puede alcanzar el límite de aceptabilidad una o varias veces durante la vida útil o periodo de análisis del mismo.

2.3 Administración de la base de datos

Hay que mencionar que, con la introducción de un sistema de administración de pavimentos, puede haber cierto rechazo por parte de los ingenieros experimentados para utilizar dicho sistema, debido a que tal vez ellos no quieran que una computadora les diga lo que tienen que hacer. Sin embargo, hay que mencionar que la computadora es una herramienta muy valiosa para el almacenamiento, análisis y proceso de datos. El valor de esta herramienta no puede pasarse por alto, especialmente cuando las computadoras están a la par con modernos programas de software que alivian el tedio y sufrimiento asociado con el uso de computadoras de hace apenas algunos años. Un sistema computarizado de base de datos tiene varias ventajas sobre registros guardados en papel, que incluyen:

1. Los datos son almacenados en espacios compactos.
2. El almacenamiento y la recuperación de los datos es mucho más rápido que un método manual, permitiendo que los datos puedan ser actualizados en forma regular y además se facilita el uso de la información.
3. Existe un control centralizado de la información.

El control centralizado de la base de datos tiene varias ventajas para la agencia u organismo que lo va a utilizar. Sin embargo, las ventajas de la centralización solamente pueden ser logradas si el sistema está apropiadamente diseñado y mantenido. Las ventajas de un sistema centralizado son las siguientes:

1. Se disminuye la redundancia, teniendo cada pieza de dato almacenado solamente en un lugar. Esto evita también inconsistencias cuando se quieran actualizar los archivos de datos.

2. Se pueden compartir los datos para varias aplicaciones. Frecuentemente, los datos necesitados por la administración de pavimentos son capturados por diferentes divisiones dentro del organismo o agencia. Teniendo una base de datos centralizada se asegura que todas las divisiones o departamentos tendrán acceso a la información que se requiere.

3. Se pueden aplicar restricciones de seguridad para el control del flujo de información y para la actualización de la misma.

4. Se puede mantener la integridad de los datos por el control de la actualización de la base de datos.

5. Se pueden balancear requerimientos conflictivos para optimizar la base de datos para un organismo o agencia que para usos individuales. Esto es particularmente importante para compartir los datos entre los diferentes departamentos o divisiones.

Una de las consideraciones más importantes en el desarrollo de una base de datos es la identificación espacial y temporal de los datos. La identificación espacial requiere poder relacionar físicamente los datos del lugar en el pavimento. La referencia espacial se lleva a cabo a través del proceso de definición de sección.

La identificación temporal define cuando los datos fueron capturados y colocados en la base de datos. Este punto frecuentemente no se toma en cuenta, ya que el ingeniero de proyecto asumirá que los datos son los más recientes y simplemente trabajará con éstos. La necesidad de poner la fecha de captura de los datos es particularmente crucial en grandes organizaciones, donde diferentes divisiones en la agencia aeroportuaria tendrán responsabilidades para diferentes elementos en la base de datos.

Debe existir un gran acopio de información sobre la planeación y el proyecto de pistas, calles de rodaje y plataformas. La información que debe figurar tiene por objeto informar

al planeador de aeropuertos sobre aspectos relacionados con los criterios dimensionales, resistencia del pavimento, longitud de la pista y capacidad del aeropuerto.

La base de datos deberá incluir todos los aspectos relacionados con los pavimentos, para poder realizar pronósticos, actividades de conservación y rehabilitación y análisis de presupuesto. Estos datos deben contemplar inventario de las características del pavimento, propiedades del material, condiciones medidas (deterioro, rugosidad, etc.), tránsito (volúmenes, composición), historial de construcción, políticas de conservación, etc.

En contraste con una red de carreteras, los pavimentos para aeropuertos consisten de relativamente pocas secciones pero generalmente con información más completa y extensiva.

Cualquier dato debe ser capturado y procesado sistemáticamente. Las formas de captura de los datos deben ser diseñadas adecuadamente para poder ser comprendidas, para facilitar su uso y para un registro preciso. Si el ensamblado de los datos está siendo realizado en la oficina, las formas deben estar en la pantalla de una computadora y así el capturista puede dar entrada a la información directamente en la computadora. Si los datos son capturados fuera de la oficina, deben diseñarse formatos en papel de tal forma que permiten una entrada directa a la computadora. Las computadoras laptop o notebook que pueden ser llevadas a los estudios de campo también resultan ser una alternativa viable para la captura de datos, eliminando así la necesidad de transcribir los datos en la oficina. No hay que olvidar que el inventario de datos es la base para el sistema de administración de pavimentos.

El trazado geográfico del pavimento de un aeropuerto es relativamente estable. Las secciones de pavimento son raramente adicionadas o removidas del inventario.

La estructura total de la base de datos de la administración de pavimentos y toda la captura de los datos subsecuentes y análisis son afectadas por la definición de secciones del pavimento.

2.4 Estructura de la base de datos

La base de datos es la clave de toda la información de pavimentos para los aeropuertos. El diseño total de la estructura de la base de datos se debe fundamentar en las características particulares de los elementos de operación terrestre de pavimentos de aeropuertos y datos relacionados con estas estructuras. Primeramente, y en contraste con la red de carreteras, los pavimentos para aeropuertos consisten de relativamente pocas secciones pero generalmente con más completa y extensiva información. Segundo, los datos de los pavimentos deben ser fuertemente jerárquicos; en el nivel más alto estará la información de la totalidad del aeropuerto (políticas de conservación, costos unitarios de construcción, etc.), con niveles sucesivos de datos más específicos asociados con observaciones individuales (por ejemplo, medidas de campo de una prueba de evaluación no destructiva). Tercero, el trazado geográfico del pavimento de un aeropuerto es relativamente estable. Las secciones de pavimento son raramente añadidas o removidas del inventario. Por último, se debe mantener información histórica para la mayoría de los datos (por ejemplo, actividad en la construcción, inspecciones visuales con nuevos datos que estén siendo adicionados en vez de reemplazar los datos anteriores.

Dadas estas características, se propone que la base de datos del sistema de administración de pavimentos para aeropuertos sea organizada en una estructura jerárquica, como se ilustra en la figura 2.6 de la siguiente página:

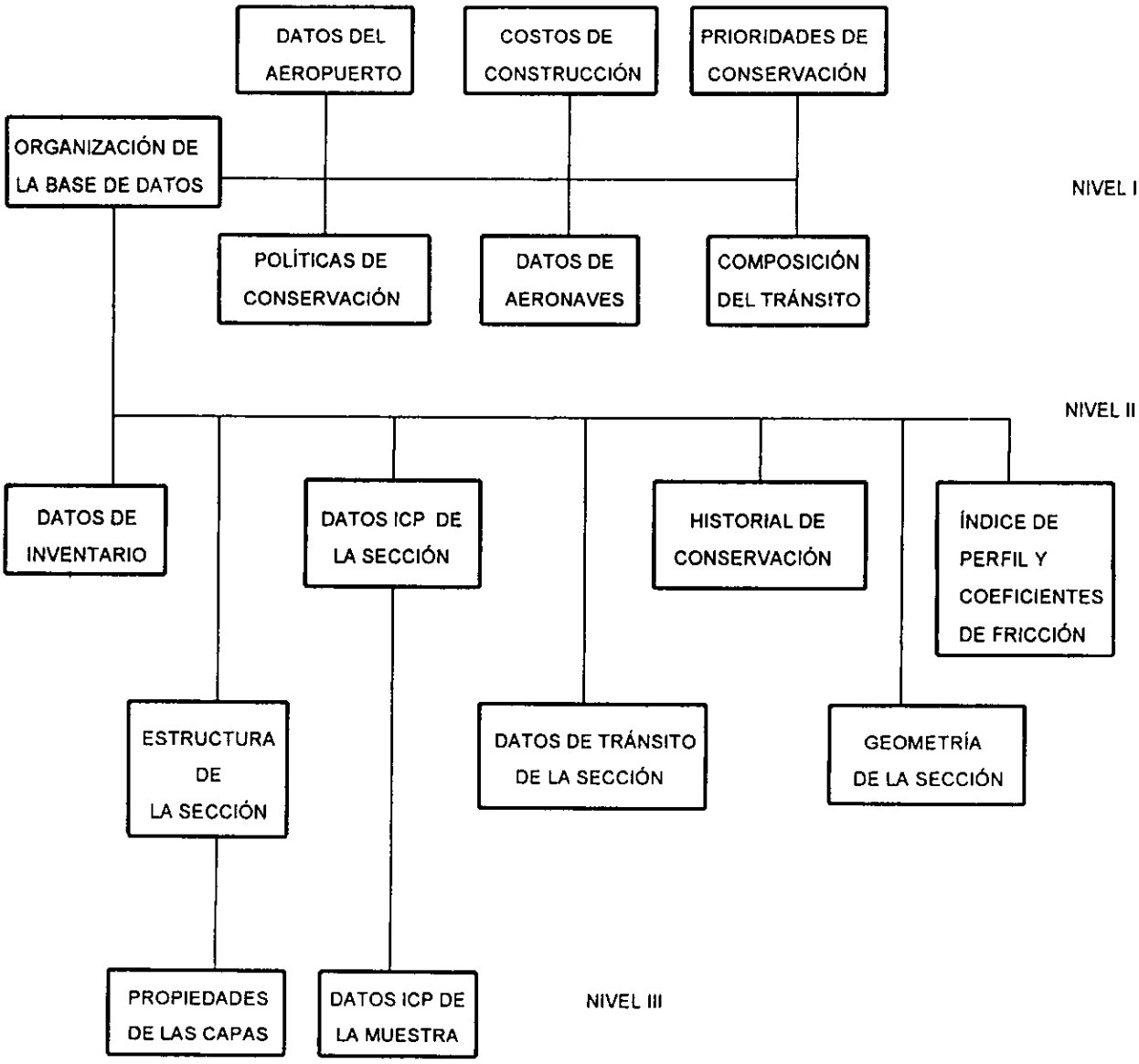

Figura 2.6 Estructura de la base de datos

El nivel uno debe contener toda la información común de todas las secciones de pavimento en el aeropuerto. Este nivel incluye:

1. Los datos del aeropuerto que a su vez incluye los siguientes puntos: políticas para la selección de las actividades de conservación basadas en la importancia del pavimento, en el índice de condición del pavimento (ICP) y vida remanente del mismo.
2. Costos unitarios de construcción para actividades de conservación.
3. Pesos de tren de aterrizaje y sus configuraciones que incluyan diferentes tipos de aeronaves.
4. Composición de la flota de aeronaves.
5. Factores de prioridad de proyectos basados en el rango del pavimento, ICP y vida remanente.

La organización de la base de datos debe proporcionar información para los niveles que se encuentran más abajo en la estructura jerárquica. Específicamente, debe contener puntos guía para los datos del nivel dos para cada sección individual.

El nivel dos en la base de datos contiene todos los datos correspondientes a una sección de pavimento individual. Por definición, todos los datos del nivel dos están explícitamente enlazados a una entidad geográfica específica. Este nivel debe incluir datos de inventario general por cada sección, espesores de capas y tipos de materiales, datos ICP y coeficientes de fricción de la sección, incluyendo un resúmen de deterioros individuales que se encuentren en las muestras inspeccionadas, número de arribos y salidas de las aeronaves, un historial de todas las actividades de conservación llevadas a cabo por contrato, coordenadas x-y que definen la geometría de la sección, y datos de la rugosidad en la superficie de las pistas, calles de rodaje y plataformas.

En muchos casos, los datos de sección de pavimento en el nivel dos deben estar organizados como listas de enlace para permitir los cambios en la estructura del pavimento, condiciones, tránsito, y otros factores a través del tiempo. La sección estructural y las subsecciones ICP de la base de datos también deben contener guías para datos de soporte en el nivel tres.

El nivel tres, es el nivel más bajo en la jerarquía de la base de datos, contiene información de soporte para datos de sección del pavimento en el nivel dos. El nivel tres, debe comprender las propiedades de ingeniería de detalle (módulo, valores VRS, calidad real, variabilidad, etc.) por cada capa en la estructura del pavimento.

Se puede incluir un nivel cuatro en la estructura de la base de datos que comprenderían datos para información en el nivel tres. Un ejemplo de esto sería los datos de prueba de los estudios de evaluación no destructivos de pavimentos; estos datos serían utilizados para estimar las propiedades de las capas de la sección de pavimento en el nivel tres. Los datos del nivel cuatro estarían típicamente georeferenciados a ubicaciones particulares dentro de la sección de pavimento.

La estructura y el contenido de la base de datos debe existir tanto en una forma permanente como también uno o más copias temporales que son tanto versiones exactas o modificadas de la base de datos permanentes. Se pueden crear bases de datos múltiples para los pavimentos de un aeropuerto, permitiendo al usuario conducir numerosos escenarios supuestos de análisis, sin el riesgo de dañar la base de datos maestra.

El acceso, la administración y el análisis de datos voluminosos que están asociados con los pavimentos para aeropuertos son puntos críticos que restringen la efectividad de la administración de estas estructuras. Mucha de la información requerida casi siempre es capturada por el equipo de ingenieros especializados en pavimentos, sin embargo ésta información existe en una gran variedad de formatos como por ejemplo, planos, tablas, mapas, textos y experiencia personal. El equipo técnico del sistema de administración de pavimentos debe organizar estos datos en formas apropiadas para su análisis, alimentar los diversos conjuntos de datos existentes en los modelos de pronóstico y finalmente formatear los resultados para su interpretación por parte de grupos diversos involucrados en el proceso de toma de decisiones. Las restricciones en tiempo y recursos inevitablemente limitarán la calidad de los análisis y las decisiones que se tomen.

Es importante considerar el comportamiento funcional y el estructural de un pavimento. El comportamiento funcional está relacionado en que tan bien el pavimento sirve al usuario (por ejemplo, la aeronave y sus ocupantes). Si el pavimento se vuelve muy rugoso, será dificil el poder operar la aeronave.

Es necesario medir tanto el comportamiento funcional y capacidad estructural en una forma sistemática y continua.

Se deben tener técnicas disponibles para medir el perfil longitudinal y relacionar este con las aceleraciones verticales en las aeronaves cuando estas utilizan las pistas. La resistencia al deslizamiento puede ser también medida físicamente y el acuaplaneo puede ser evaluado a partir de la inspección visual. Cuando un pavimento se vuelve excesivamente rugoso, su resistencia al deslizamiento disminuye y el potencial para el acuaplaneo se incrementa, por lo que cierta forma de conservación debe ser realizada.

La información almacenada en la base de datos del sistema de administración de pavimentos debe incluir no solamente el valor de los datos sino también la fecha de las últimas modificaciones, la fuente de los datos (estudios de campo y experiencia) e información de soporte (un contrato particular o un reporte de investigación de campo).

Una bitácora completa debe ser llevada a cabo para todos los cambios que se efectuen a la base de datos. Esta bitácora resume lo que fué cambiado, por quien fué cambiado y cuando fué cambiado. La bitácora también es útil cuando se audite la base de datos y también para mantener la integridad de la misma.

Por otro lado, la captura de los datos históricos para cualquier red de pavimentos es siempre una tarea muy difícil y desgastante. No obstante de que pueden existir datos disponibles sobre el espesor de las distintas capas que componen a un pavimento, obtenidos a partir de los registros de construcción, los datos sobre las propiedades que se utilizaron en el diseño (módulo VRS) sobre las capas y la subrasante son en muchas ocasiones escasos. En muchos casos, solamente pueden ser capturadas estimaciones muy generales y simples de las propiedades requeridas, siendo más tarde que las mismas puedan ser confirmadas o modificadas a través de pruebas no destructivas.

2.5 Sistemas de Información Geográfica en el SAP

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una metodologia que involucra un sistema de administración de datos computarizados diseñado para capturar, almacenar, analizar y desplegar datos referenciados espacialmente.

Los sistemas de información geográfica permiten la visualización gráfica de los datos para la comprensión, análisis, y presentación de resultados para sistemas complejos de pavimentos de aeropuertos. La integración múltiple de las bases de datos en múltiples plataformas es una función necesaria que puede ser realizada por un sistema de información geográfica. Por definición, el SIG tiene la habilidad de integrar bases de datos, desplegar información gráficamente y realizar análisis espaciales.

Una de las funciones importantes que el SIG puede ejecutar es el de por ejemplo, proporcionar un desplegado gráfico de los niveles de ICP del pavimento. Se pueden realizar análisis espaciales para determinar si las áreas de ciertos deterioros prevalecen más en partes de pavimento antiguas, áreas de tránsito pesado o en áreas de drenaje muy pobre. Por lo tanto, la vida o el comportamiento del pavimento involucra el estudio de múltiples variables y lo que es más importante, la interacción de dichas variables.

Los beneficios generales de un sistema de información geográfica para aplicaciones a una base de datos relacionada con el transporte pueden ser agrupadas en tres categorías diferentes:

a) Integración de datos

Muchos elementos almacenados en una base de datos de transporte están sujetos a un lugar geográfico en particular. Traspasando todos los datos a un sistema de referencia geográfica en común (ejemplo, latitud y longitud) permitirá la combinación de bases de datos distintas (por ejemplo, inventario de aeropuertos, accidentes de tráfico y población). Un conjunto poderoso de análisis de datos puede ser aplicado de manera más fácil a estas bases de datos combinadas que en forma individual.

b) Acceso y depliegue de datos

En muchas aplicaciones, es mucho más sencillo el seleccionar datos de una infraestructura de transporte (por ejemplo, una sección de pavimento) señalando (con un ratón de computadora) un punto específico en un desplegado geográfico de una red de transporte que el buscar el dato que interesa en una base de datos común y corriente en

base a un identificador clave de la infraestructura. La visualización de los resultados por desplegados geográficos codificados a color de la red de pavimentos permite mejores interpretaciones y síntesis que lo que es posible de los reportes basados en textos y en base de datos normales.

c) Análisis de datos

Un sistema de información geográfica completo ofrece un conjunto de herramientas para el análisis espacial de la información almacenada en una base de datos. Una lista parcial de dichas herramientas incluye las siguientes:

- Areas, longitudes y cálculos de volúmenes.
- Coordinación de mapas.
- Análisis en tres dimensiones (si los datos de elevación se encuentran incluidos en la base de datos).
- Análisis de red (Rutas vehiculares, análisis de tiempo y distancia, determinación del trayecto más corto, etc.)

Sin embargo, poca atención se ha prestado a las aplicaciones del sistema de información geográfica para la administración de pavimentos en aeropuertos. La administración de pavimentos para carreteras y aeropuertos comparten muchas características: ambos tratan con una red espacial de secciones de pavimentos que poseen muchos atributos de geometría (longitud, ancho y forma); estructura (espesores de capas, resistencia); condición (deterioro, rugosidad y fricción); tránsito (volúmen, composición); e historial (construcción y conservación). Los análisis de ingeniería en pavimentos son apenas diferentes para los dos tipos de pavimentos debido a las características de tráfico diferentes, requerimientos de comportamiento y estándares de diseño.

La diferencia más significativa entre las redes de pavimentos de carreteras y aeropuertos para aplicaciones del sistema de información geográfica es el de la naturaleza de estos mismos elementos. Los elementos de operación terrestre de los aeropuertos contienen mucho menos secciones de pavimento que lo que tienen las carreteras. Sin embargo, los datos de atributos asociados con los pavimentos de aeropuertos tiende a ser más completa y menos diversa en términos de contenido y formato, que aquellos datos que existen para carreteras.

La administración de pavimentos para aeropuertos no requiere de muchos de los análisis espaciales que se encuentran en un sistema de información geográfica, como lo puede ser los cálculos de las pendientes. Las características más relevantes del citado sistema para la administración de pavimentos son aquellas que tratan con el acceso de datos y su interpretación. El despliegue geográfico interactivo del SIG es una interfase efectiva para la selección del conjunto de secciones de pavimentos, para el requerimiento y análisis de datos.

El despliegue de las condiciones existentes del pavimento y de las predicciones de su comportamiento como mapas codificados a color, son de gran ayuda para la interpretación y síntesis de los datos que se encuentran distribuidos en lugar y tiempo. Esto es una herramienta importante no solamente para el equipo de ingeniería responsable de la conservación de los pavimentos, sino también para el personal administrativo responsable de aplicar las diversas políticas y prioridades, así como también para el desarrollo de un presupuesto que contemple varios años.

La administración de pavimentos en aeropuertos es una aplicación relativamente bien definida comparada con la administración de pavimentos para carreteras. Los datos de pavimentos de alta calidad en la mayoría de los aeropuertos permite análisis comparativos de ingeniería sofisticados y predicciones en el comportamiento de los pavimentos. Aunque muchas de las características del SIG no son requeridas en la administración de pavimentos para aeropuertos, las capacidades de despliegue de información son ayudas muy valiosas en el proceso de toma de decisiones.

La administración de pavimentos ha sido integrada exitosamente en varias organizaciones carreteras estatales de los Estados Unidos. Las necesidades de los aeropuertos para la administración de los pavimentos incluye los siguientes puntos:

1. La necesidad de visualizar la condición del pavimento.
2. La necesidad de determinar cual es el cambio relativo en la condición del sistema del pavimento y de los segmentos individuales de dicho sistema en relación con el tiempo, tránsito, variables ambientales y presupuesto de conservación.
3. La necesidad de analizar el sistema para el costo efectivo de las estrategias de conservación y la priorización de recursos.
4. La necesidad de pronosticar la expectativa de vida del pavimento relativo a todas las variables incluyendo el tiempo, tránsito, prácticas de conservación, deterioros

actuales, capacidad estructural y características operacionales relacionadas con el índice de perfil y la resistencia al deslizamiento.

5. La necesidad de mantener un sistema de referencia común para la localización de las secciones de pavimentos.
6. La necesidad de integrar correctamente grandes volúmenes de datos con detalles suficientes para realizar decisiones de ingeniería sobre conservación y acciones correctivas apropiadas.

Como se describió anteriormente, la administración de pavimentos para aeropuertos no requiere de todas las funciones que se pueden encontrar en el SIG. Las caracteristicas del SIG de mayor uso en la administración de pavimentos para aeropuertos son aquellas que tratan principalmente con la selección de las secciones de pavimentos por localización geográfica y el desplegado geográfico del contenido de la base de datos, así como el análisis y pronóstico de resultados. Estas operaciones requieren datos de mapas detallados para las secciones de pavimento.

Los datos de mapa pueden ser elaborados realizando digitalización manual de todos los elementos del aeropuerto. La digitalización debe ser realizada después de que todos los elementos del pavimento hayan sido delineados en secciones homogéneas para propósitos de administración de pavimentos. De esta forma, estos datos pueden ser referidos directamente a secciones individuales en la base de datos.

Todos los datos en el sistema pueden ser desplegados para una sola sección, para un grupo de secciones, o para todas las secciones de todos los elementos del pavimento. Para grupos más complicados, las secciones pueden ser seleccionadas gráficamente, escogiendo secciones individuales de un plano o mapa de la totalidad de los elementos del pavimento.

Entre las alternativas tecnológicas que hoy existen para la adquisición de información geográfica en formato digital, se encuentran entre las más comunes, la digitalización manual, el "barrido" (scanner) de materiales gráficos, el procesamiento de imágenes de satélite y recientemente la captura directa por medio del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, de acuerdo con sus siglas en inglés).

CAPÍTULO 3

PLANEACIÓN

3. Planeación

Hay que recordar que el propósito de un aeropuerto es el de operar aeronaves, pasajeros, carga y vehículos de transporte terrestre de una manera eficiente y segura. Para planear las facilidades acordes con las necesidades futuras, es esencial el predecir el nivel y la distribución de la demanda en los varios componentes del sistema del aeropuerto. Sin un conocimiento confiable de la naturaleza y variación esperada en la demanda de una determinado componente, es imposible evaluar los requerimientos físicos y operacionales de un elemento determinado del aeropuerto.

En los años ochenta, el aumento en más de un 50% de los pasajeros aéreos, así como el de un 35% de las salidas de aeronaves, han ocasionado congestión en los aeropuertos. La planeación de los elementos de operación terrestre de un aeropuertos exige una evaluación de las tendencias futuras de los movimientos de aeronaves. Esta actividad tiene cada vez mayor importancia debido a la preocupación respecto a la congestión de los aeropuertos en determinadas regiones. Los movimientos de aeronaves han aumentado con gran rapidez durante la mayor parte del decenio anterior, intensificando la presión sobre las instalaciones aeroportuarias.

Un continuo proceso de planeación es necesario para responder a las necesidades del transporte aéreo en un ambiente de cambio. Cambios en la demanda de aviación, políticas, nueva tecnología, restricciones financieras y otros factores pueden alterar la necesidad y el tiempo para el mejoramiento de las instalaciones. Los datos recolectados deben actualizarse continuamente, en relación a las necesidades del aeropuerto.

La planeación es un aspecto importante en la administración de pavimentos aeroportuarios, tanto planeación a corto plazo o programación de actividades y planeación estratégica a largo plazo. Para planear, se requiere hacer predicciones y establecer los objetivos correspondientes. Un elemento importante en el proceso de planeación es la conservación del pavimento y la rehabilitación de la red existente aeroportuaria para su operación en el futuro. Estas actividades frecuentemente cuentan como un 20-30% del total gastado para una agencia aeroportuaria en nuestro país.

3.1 Demanda

En nuestro caso, es necesario conocer de antemano la composición en el tipo de aeronaves que harán uso de un aeropuerto para identificar el avión crítico que determina

los elementos geométricos y diseño estructural de los pavimentos. La masa de la aeronave es importante para determinar el espesor de las pistas, calles de rodaje y pavimentos de las plataformas. La envergadura y la longitud del fuselaje ejercen influencia sobre las dimensiones de las plataformas de estacionamiento que, a su vez, afectan la configuración de los edificios para pasajeros. El tamaño determina también la anchura de las pistas y de las calles de rodaje, así como las distancias entre ellas y sus ampliaciones en las intersecciones de todos los elementos de operación terrestre.

Un planeador deberá estar al tanto de cambios esperados en la composición de la flota de aeronaves que afectarán las operaciones del aeropuerto. A largo plazo, se espera un incremento en el uso de aviones de turbina de cabina ancha en rutas en las que se tiene una alta frecuencia de viajes. Sin embargo el problema para todos los tamaños de aeropuerto es el incremento en la envergadura de una aeronave nueva que tenga una mayor capacidad de asientos. Como se ha mencionado anteriormente, esto repercute en la geometría de la zona aeronáutica y en un mayor peso de la aeronave, con lo que se hará necesario realizar un incremento en la capacidad estructural del pavimento.

Los pronósticos sobre las actividades futuras deberían poner de relieve las variaciones en el ritmo de los movimientos de aeronaves, la modalidad del tránsito, el tipo de aeronaves y otros factores que incidan en la disposición y dimensiones de los sistemas de pistas, calles de rodaje y plataformas. Es decir se deberá tomar en cuenta la futura evolución en materia de aeronaves. Las especificaciones actuales de algunos aeropuertos están destinadas a satisfacer las exigencias de aeronaves cuyo tamaño no sobrepase el del Boeing 747. Por lo anterior, es conveniente conocer cuales pueden ser las tendencias de los proyectos de las aeronaves futuras.

Actualmente las fuerzas de la competencia están alentando a realizar fusiones y alianzas entre líneas aéreas, las cuales podrían reducir o invertir eventualmente las presiones para aumentar la frecuencia de los vuelos a expensas del tamaños de las aeronaves. El aumento de la congestión en los aeropuertos y el espacio aéreo en el próximo decenio favorece la utilización de aeronaves de mayor envergadura. Aún más, las nuevas aeronaves de alta tecnología que se están ya introduciendo en las flotas incluyen el B-777, el A-330 y el A-340, que tienen mayores dimensiones que las aeronaves de los años ochenta. Por estas razones, se supone que el tamaño medio mundial de las aeronaves comenzará a aumentar nuevamente y podría alcanzar a casi 200 asientos hacia el año 2005, en comparación con 184 asientos que hubo en el año de 1995.

La introducción de aeronaves de cabina ancha incrementó grandemente el peso de las mismas durante los años setentas. El Boeing 747-F es la aeronave civil mas pesada actualmente con un peso aproximado de 353,000 kg. Sin embargo, la Boeing está en el proceso de desarrollo del modelo B-747-400 que se estima podría pesar 447,700 kg.

Por lo tanto, y sobre todo para el diseño de pavimentos, es importante conocer cuales son las perspectivas futuras de las empresas de aviación en cuanto a la composición de su flota aérea y al tamaño de la misma.

Durante los años setentas el tránsito de aeronaves se incrementó de manera importante con los aviones jumbo que llegaron a representar un gran porcentaje de la composición del tránsito. Cuando los aviones se volvieron más grandes, se volvieron más pesados y los pavimentos no duraron por mucho tiempo. Cuando los aeropuertos llegaron a estar más congestionados, la necesidad de "hacerlo bien la primera vez" con respecto a la construcción y conservación de los pavimentos se volvió crítica. Al mismo tiempo, el poder de compra de los fondos para construcción y conservación disminuyeron debido a una alta tasa de inflación en la industria de la construcción. Adicionalmente, los ingenieros experimentados empezaron a retirarse, sin mucha oportunidad de transmitir el conocimiento que adquirieron a través de los años en los mejores métodos en conservar a los pavimentos en buenas condiciones. Todas estas presiones fueron indicadores de que se requería un mejor sistema de administración de pavimentos.

Lo anterior es para poder estimar cuales son los cambios que se esperan tener en las condiciones de carga. Hay que mencionar que una presión significativa siempre existirá por parte de aerolineas que utilicen determinado tipo aeronaves que tengan la capacidad de transportar cargas de pago muy grandes, ya que con esto se tendrán menores costos de operación y por lo tanto mayores ganancias.

En la determinación de las necesidades del aeropuerto y en especial la de los pavimentos, es necesario pronosticar los distintos tipos de categorias de aeronaves que estarán destinados a utilizar dicha infraestructura. La administración del aeropuerto debe estar pendiente de los avances tecnológicos en el diseño de aviones para así poder contar con una adecuada zona aeronaútica.

Una de las tareas más importantes es el que se puedan llevar estadísticas del número de operaciones de los aeropuertos que estén a cargo de un grupo operador. Esto es con el fin de determinar la tasa media anual de crecimiento histórica del tránsito aéreo y poder

aplicar dicha tasa en la fórmula de proyección del crecimiento del número de operaciones, la cual es utilizada en el diseño de pavimentos y que corresponde al módulo de proyecto.

Aeropuertos y Servicios Auxiliares tiene conformado un sistema estadístico por grupo de aeropuertos o unidades de negocio. Por cada una de estas unidades, se tiene los registros anuales del número de operaciones a partir del año de 1992 hasta 1997. Muchos aeropuertos presentan tasas medias de crecimiento anual positivas, pero algunos presentan tasas medias de crecimiento anual negativas, debido principalmente a la crisis económica que se presentó a finales del año de 1994. En este caso, conviene tomar una tasa de crecimiento de 1.5% porque siempre se considera que un aeropuerto está en crecimiento y porque se esta del lado de la seguridad cuando estos datos se pasen a la etapa de proyecto. Tenemos el ejemplo de la unidad de negocio A.I.C.M. (Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México), que su tasa media anual de crecimiento en el periodo 92-97 fué de –1.99. Sin embargo sabemos que este aeropuerto por su importancia económica en el país, seguirá creciendo, por lo que se considera la tasa de crecimiento positiva del 1.5%

3.2 Oferta de infraestructura

Debido a las grandes extensiones de terreno que requieren y a su relación con los grandes espacios aéreos necesarios para las operaciones de las aeronaves, las pistas y calles de rodaje con ellas relacionadas, son el punto de partida para considerar el trazado del aeropuerto. Sin embargo, tienen que proyectarse en relación con los otros elementos principales de operación, tales como las zonas de pasajeros y carga, incluyendo plataformas y edificios, estacionamiento de vehículos, accesos por tierra y servicios de tránsito aéreo con objeto de mantener todas las partes del sistema equilibradas. Este es un proceso que requiere continuas revisiones y ajustes, a fin de obtener una configuración de aeropuerto que ofrezca la máxima eficiencia general. Dado que las pistas y calles de rodaje son los elementos menos flexibles de un aeropuerto, son las que han de considerarse en primer lugar.

Los operadores de los grupos de aeropuertos deben tomar en cuenta algunos criterios para determinar la necesidad de pistas, calles de rodaje y plataformas adicionales para aumentar la capacidad de las zonas aeronáuticas de los aeropuertos.

En el caso de las pistas, se puede proyectar y construir otra pista cuando se prevé que la demanda alcanzará la capacidad de la pista existente.

Asimismo, la adición de calles de rodaje a una configuración de pista o pistas aumenta la eficacia operacional del aeropuerto.

Para reducir al minimo los costos actuales de construcción, deberá preverse el suficiente sistema de calles de rodaje, con la complejidad mínima necesaria, para atender las necesidades a corto plazo en cuanto a la capacidad de las pistas. Efectuando una cuidadosa planeación, pueden ir agregándose progresivamente al sistema, componentes suplementarios de calles de rodaje para mantenerse al unísono con el crecimiento del tránsito del aeropuerto.

Una instalación aeroportuaria mínima debe tener áreas de media vuelta a ambos extremos de la pista y una calle de rodaje corta que lleve a la plataforma. Sin embargo se deberá tomar en cuenta si el operador del aeropuerto tiene proyectado la construcción de una calle de rodaje paralela. Si el costo de construcción de una calle de rodaje paralela no excede del costo de las áreas de media vuelta en más de un tercio, construir la calle de rodaje es preferible. Una calle de rodaje paralela parcial puede proporcionar una eficacia satisfactoria y dar seguridad a las operaciones aeronáuticas.

En lo referente a las plataformas de los aeropuertos, el número y dimensiones de los puestos de estacionamiento de aeronaves deberá ajustarse al número y tamaño de los tipos de aeronaves que se espera que utilicen la plataforma.

Los operadores de los aeropuertos tienen que considerar la ampliación de las plataformas para satisfacer las necesidades futuras. Para evitar las excesivas restricciones ante el posible crecimiento de una determinada zona de plataforma, esta deberá proyectarse en etapas modulares, de modo que las etapas sucesivas sean adiciones integrales a la plataforma existente, realizadas con la mínima interrupción de las actividades que se estén llevando a cabo.

En este aspecto, los sistemas de administración de pavimentos deberán poder ser actualizados cuando se construyan nuevas pistas, calles de rodaje y plataformas o bien cuando se amplien las mismas. Por lo tanto, será necesario que la base de datos que el sistema esté utilizando se le pueda agregar información de las nuevas secciones de pavimento, para que posteriormente puedan estar sujetas a los análisis necesarios. Para esto, es necesario conocer el plan maestro del aeropuerto, que es el plano que regulará

su crecimiento. El plan maestro debe fijar el lugar para cada elemento. Por ejemplo, en el debe preverse el espacio suficiente para dar cabida al número de pistas requerido al presente, o bien adicionales futuras y tomar en cuenta además las prolongaciones que puedan necesitar por el advenimiento de nuevos aviones.

En lo referente a la ampliación de la capacidad en aeropuertos, ésta tiende a efectuarse en etapas largas, costosas y a menudo irregulares. Tambien ocurre que en los proyectos importantes de renovación o ampliación, los periodos de preparación suelen ser muy largos.

Un factor importante que incide en la financiación de la infraestructura de aeropuertos es la forma en que ha de ampliarse la capacidad. La ampliación de la capacidad de los aeropuertos se hace adoptando medidas costosas y de gran magnitud. Es más, las inversiones en cuestión son esencialmente irreversibles y tardan relativamente mucho tiempo en completarse. Esas inversiones, que ordinariamente están destinadas a crear la capacidad necesaria para un tiempo prolongado, generalmente no logran el punto de equilibrio hasta varios años después de que el volumen de tránsito aéreo y de utilización haya llegado a los niveles necesarios.

Es necesario insistir en el hecho de que los estudios de calendarios de inversiones descansan sobre las previsiones del tránsito aéreo y que esas previsiones siguen constituyendo para los aeropuertos una tarea difícil.

En respuesta a la necesidad creciente para la ampliación y conservación de los pavimentos, así como también para los recursos cada vez más limitados, las autoridades aeroportuarias deberán realizar una busqueda más formal de administración para poder optimizar la utilización de sus recursos limitados.

Un Sistema de Administración de Pavimentos puede ser una herramienta poderosa para la administración de los pavimentos; sin embargo, para lograr su potencial completo, el sistema debe estar adaptado a las necesidades especificas de la agencia u organismo aeroportuario.

Hay que mencionar que así como los sistemas de administración de pavimentos para carreteras deben afrontar diferentes requerimientos para diferentes agencias y organizaciones, así también los sistemas de administración de pavimentos para aeropuertos deberán ser estructurados de manera diferente, para afrontar los requerimientos de las organizaciones de aviación, grandes aeropuertos comerciales y

aeropuertos pequeños. Adicionalmente, las condiciones y restricciones bajo los cuales los datos de inventario son capturados y analizados son únicos para cada aeropuerto, y varían significativamente dependiendo del tipo de los mismos.

De esta forma, hace falta establecer que de aeropuerto a aeropuerto, las necesidades varían con frecuencia, de manera significativa y, consecuentemente cualquier puesta en práctica de un sistema de administración de pavimentos deberá ser el adecuado para afrontar las necesidades específicas de una autoridad aeroportuaria determinada. En el caso de la red aeroportuaria de México, ésta consiste en 58 aeropuertos los cuales estaban agrupados de acuerdo a la clasificación usada por ASA, la cual es la siguiente:

Tabla 3.1

Aeropuertos Metropolitanos	Aeropuertos Turísticos	Aeropuertos Regionales	Aeropuertos Fronterizos
Guadalajara	Acapulco	Aguascalientes	Ciudad Juárez
México	B. de Huatulco	Campeche	Chetumal
Monterrey	Cancún	Ciudad del Carmen	Matamoros
Toluca	Cozumel	Ciudad Obregón	Mexicali
	Guaymas	Chihuahua	Nuevo Laredo
	La Paz	Ciudad Victoria	Nogales
	Loreto	Colima	Reynosa
	Manzanillo	Culiacán	Tapachula
	Mazatlán	Durango	Tijuana
	Mérida	Hermosillo	
	Puerto Escondido	Guanajuato	
	Puerto Vallarta	Los Mochis	
	S.J. del Cabo	Minatitlán	
	Veracrúz	Morelia	
	Zihuatanejo	Oaxaca	
		Poza Rica	
		Puebla	
		Querétaro	
		San Luis Potosí	
		Tampico	
		Tamuín	
		Tehuacán	
		Tepic	
		Tlaxcala	
		Torreón	
		Tuxtla Gutiérrez	
		Uruapan	
		Villahermosa	
		Zacatecas	
		Cuernavaca	

De estos aeropuertos, algunos son económicamente atractivos para la iniciativa privada, pero existen otros, que siendo parte importante de la red aeroportuaria nacional, no son rentables.

De entre los aeropuertos que presentan ganancias, destacan los metropolitanos (75% de ellos tuvo ganancias) y los turísticos (66%). Entre los que presentan pérdidas sobresalen los fronterizos (66% de ellos tuvo pérdidas) y los aeropuertos regionales son los más equilibrados, ya que el 53% de ellos tiene ganancias.

Cabe resaltar que cada aeropuerto forma parte de un sistema global de transporte en el que además de cumplir con sus propios objetivos, debe cumplir con los objetivos de todo el sistema. Esto significa que aún cuando un aeropuerto no tenga un alto nivel de rentabilidad económica o de tránsito aéreo, su importancia como elemento de enlace (ya sea entre aeropuertos o con comunidades alejadas) o como punto de abastecimiento, justifica su existencia, este es el caso de algunos de los aeropuertos anteriormente clasificados como regionales.

Lo anterior es una de las razones por las que nuestro país la privatización de los aeropuertos se esta llevando a cabo por bloques y no de forma individual a excepción del aeropuerto de la Ciudad de México, ya que al haber aeropuertos económicamente atractivos a la iniciativa privada, existen otros que aunque no son suficientemente atractivos para la misma, son necesarios para la red aeroportuaria nacional.

De los aeropuertos mencionados anteriormente, 35 estarán conformados en diferentes grupos o unidades de negocio los cuales son: Centro-Norte, Pacífico, Sureste y el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). El resto de los 23 aeropuertos se mantendrán bajo la administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) y que, aún atendiendo bajos movimientos con respecto a los del resto sistema, tienen importancia en la red aeroportuaria como enlaces para propiciar el desarrollo regional. Es previsible que algunos de estos aeropuertos evolucionarán conforme al crecimiento de su movimiento, como el de Tolúca, por la carga, o el de Puerto Escondido, por el turismo; otros se mantendrán con bajos niveles de movimiento. A este grupo se le denomina como ASA Corporativo.

Tabla 3.2

CENTRO NORTE	PACIFICO	SURESTE	ASA CORPORATIVO	A.I.C.M.
Acapulco	Aguascalientes	Cancún	Cd. Obregón	México
Ciudad Juárez	Bajío	Cozumel	Cd. Del Carmen	
Culiacán	Guadalajara	Bahias de Huatulco	Colima	
Chihuahua	Hermosillo	Mérida	Campeche	
Durango	La Paz	Minatitlán	Chetumal	
Monterrey	Los Mochis	Oaxaca	Cuernavaca	
Mazatlán	Morelia	Tapachula	Cd. Victoria	
Reynosa	Mexicali	Veracrúz	Guaymas	
San Luis Potosi	Puerto Vallarta	Villahermosa	Loreto	
Tampico	San José del Cabo		Matamoros	
Torreón	Tijuana		Nuevo Laredo	
Zacatecas	Manzanillo		Nogales	
Zihuatanejo			Poza Rica	
			Puebla	
			Puerto Escondido	
			Querétaro	
			Tehuacán	
			Tuxtla Gutiérrez	
			Toluca	
			Tamuin	
			Tepic	
			Tlaxcala	
			Uruapan	

Como resultado de esta apertura a la inversión en el sistema aeroportuario, se puede prever que, en principio, el 60% de los aeropuertos administrados por ASA están quedando bajo el nuevo esquema de participación de la inversión privada.

De esta forma, el sistema de administración de pavimentos deberá adecuarse a las necesidades y presupuesto de los futuros concesionarios que vayan a operar los diferentes grupos de aeropuertos. Cada uno de estos grupos está formado por aeropuertos que presentan gran variedad de condiciones entre sí. Por ejemplo, en el grupo sureste, a largo plazo, la terminal de Mérida requiere la ampliación de una de las pistas y la prolongación del rodaje paralelo con el fin de aumentar la capacidad de la zona aeronáutica. En cambio, el aeropuerto de Cancún requiere a largo plazo la construcción de una segunda pista y una calle de rodaje paralela para la nueva pista. Esto es debido al gran crecimiento de las operaciones que ha tenido este aeropuerto en los últimos años.

En la planeación se debe tomar en cuenta que los aspectos de la captura de datos de cualquier sistema de administración de pavimentos debe concordar con las necesidades y los estados financieros de la agencia interesada. Los operadores deben evaluar sus necesidades cuando determinen no solamente el tipo de condición de dato a capturar, sino que tan frecuente deben ser capturados. Para muchos aeropuertos, una reinspección de un ciclo de cada tres años puede ser la más adecuada. Sin embargo, en aeropuertos comerciales de gran ocupación, se recomienda realizar ciclos de inspección más frecuentes.

A nivel de elementos de operación terrestre, el sistema de administración de pavimentos proporciona información pertinente para el desarrollo de un gran programa de nueva construcción, conservación o rehabilitación que optimizará el uso de los recursos disponibles. Considerando las necesidades de un grupo de aeropuertos como un todo, un sistema de administración de pavimentos puede proporcionar una comparación de los beneficios y costos para diversos programas alternativos, haciendo posible el escoger aquel que prometa los beneficios necesarios sobre un periodo de análisis seleccionado.

Para poder percibir los beneficios del proyecto es necesario hacer los correspondientes análisis de costos. Evidentemente, los costos más importantes están relacionados con el tramo del pavimento que se mejora, tal como los costos de construcción, de conservación y las reposiciones futuras necesarias. En lo referente a los beneficios, estos se pueden resumir básicamente en ahorro en costos de operación de las aeronaves y ahorro en tiempo de las personas y de la carga.

Comparando los beneficios y los costos asociados de diversos actividades alternativas, una estrategia óptima es identificada como aquella que proporciona beneficios deseados o niveles de servicio a un costo total mínimo sobre un periodo de análisis.

Tanto a niveles de elementos de operación terrestre como de proyecto, una comparación beneficio-costo puede ser usada para cada estrategia considerada, proporcionando evidencia para respaldar el valor de las actividades propuestas.

Una vez que la agencia identifica las secciones de pavimento que necesitan de acciones de conservación o rehabilitación y determina los fondos necesarios para mantener a los pavimentos en la condición deseada, la agencia debe priorizarlas y asignar los fondos monetarios correspondientes. En muchos casos, la cantidad de fondos disponibles es menor que la que necesita para completar todas las reparaciones identificadas. Aún cuando existan suficientes fondos, generalmente deben ser distribuidos a través de varios años para igualar la cantidad de trabajo con el personal disponible. El objetivo de priorizar es obtener la mejor condición posible en los pavimentos, dados los fondos a gastar.

No hay que olvidar que el objetivo de las agencias es proporcionar el máximo beneficio, utilizando al máximo los fondos disponibles. Sin embargo, en aeropuertos operados por el gobierno, el presupuesto es generalmente asignado por funcionarios que han sido elegidos, y quienes se someterán a reelección en el corto plazo o que pueden ser sustituidos en cualquier momento. Estos funcionarios frecuentemente están más interesados en financiar soluciones a corto plazo, de un costo inicial menor, que soluciones a largo plazo y con costo inicial mayor, a pesar que se les muestre que las soluciones a largo plazo son más eficientes económicamente.

La integridad de los pavimentos se puede mostrar proyectando la condición promedio de los pavimentos de los elementos de operación terrestre a lo largo de algún periodo de análisis razonable, en función de los niveles de financiamiento y las varias estrategias de financiamiento. Sin embargo, muchas de las personas que asignan los presupuestos, frecuentemente no comprenden el significado de los cambios de la condición; generalmente ellos piensan en términos financieros. Muchas veces es mejor describir la calidad del servicio actual que se está proporcionando y discutir como el nivel de financiamiento aumentará o disminuirá esa condición. También es importante discutir la vida útil de las estructuras existententes y los cambios de la vida útil en función de las diferentes estrategias de financiamiento.

Para determinar los niveles de financiamiento es necesario realizar antes una descripción o representación de las necesidades a los organismos operadores de los aeropuertos. Para propósitos de revisión detallados, las necesidades deben ser tabuladas y para

propósitos más generales se deben describir las necesidades en forma gráfica. En el primer caso, el listado de las necesidades sería sección por sección para cada año en el periodo de programa. La representación gráfica de las necesidades conviene que sea realizada por medio de un histograma.

AÑO DE LAS NECESIDADES	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
LONGITUD (M)	500	270	250	190	180	320	170	200	190	130	400

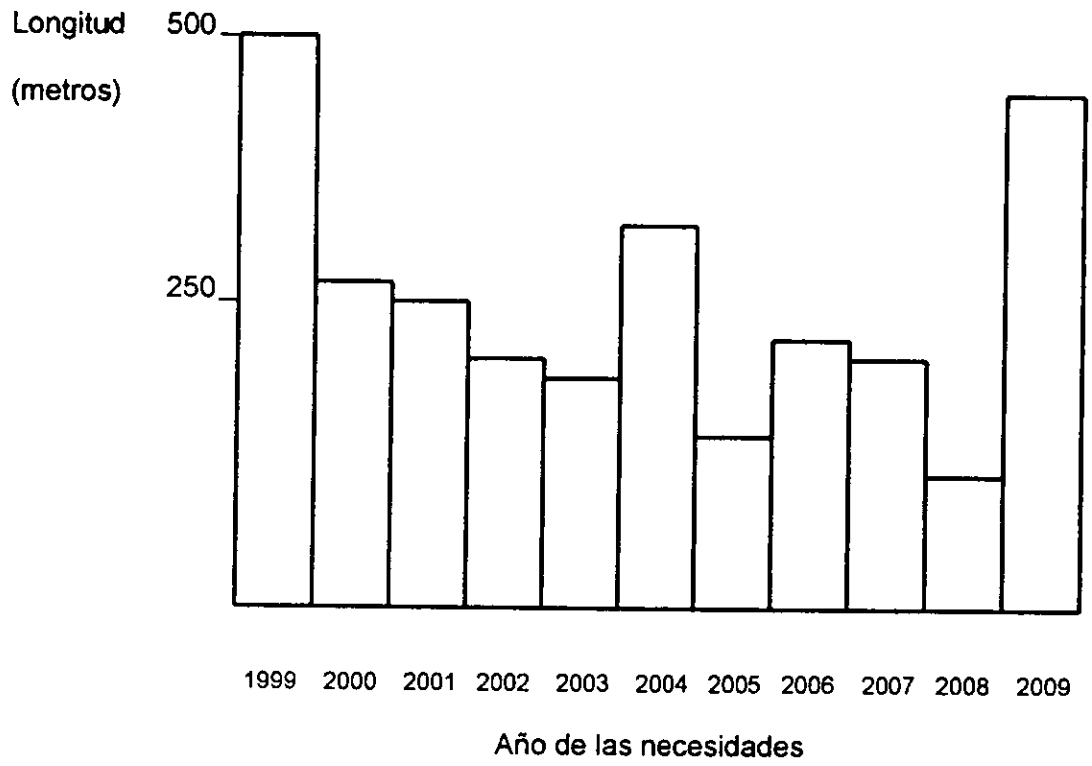

Figura 3.1 Ejemplo resúmen de una distribución de necesidades

CAPÍTULO 4

PROYECTO

4. Proyecto

4.1 Niveles del SAP

La administración de pavimentos para aeropuertos generalmente se debe desarrollar a dos niveles; a nivel de elementos de operación terrestre y el nivel de proyecto. Las diferencias entre estos dos niveles se extienden más allá del nivel en el cual se toman las decisiones e incluyen diferencias en la cantidad y el tipo de datos que se requieren. La captura de datos es costosa y a menudo no se sabe con exactitud que tipo ni que cantidad de ellos serán requeridos, hasta que parte de los datos hayan sido recolectados.

A nivel de operación terrestre, normalmente se captura una cantidad mínima de datos. Esto permite que el sistema de administración de pavimentos sea puesto en práctica con un monto de inversión inicial bajo en la recopilación de los datos. Sin embargo, los datos recopilados a nivel de elementos de operación terrestre no son los más adecuados para tomar la mayoría de las decisiones a nivel de proyecto. Se deben capturar más datos de las secciones de pavimento individuales, identificadas como candidatas prioritarias para conservación por el análisis a nivel de elementos de operación. La necesidad de minimizar los costos de la captura de datos es una razón para separar los elementos de gestión de pavimentos a nivel de operación terrestre y a nivel de proyecto.

El propósito del proceso de gestión a nivel de operación terrestre normalmente se relaciona con el proceso presupuestario para identificar las necesidades de trabajo de conservación de pavimentos, y la selección de secciones a reparar o conservar. Los resultados principales de los análisis a este nivel incluyen las necesidades de conservación, las necesidades de financiamiento, un listado de las secciones o tramos candidatos que necesitan reparación y un pronóstico de las condiciones futuras de los elementos para varias opciones de financiamiento.

El nivel de evaluación del pavimento requerido para realizar este tipo de administración involucra inspecciones visuales representativas de porciones de cada sección de pavimento y extrapolar los deterioros sobre toda la sección. Debido a que se puede anticipar una consistencia en la construcción, estructura y tránsito de la sección, este nivel de inspección debe representar satisfactoriamente la condición total de la misma.

Una vez que una sección ha sido identificada como candidata para reparación, es luego evaluada a nivel de proyecto. Este nivel de análisis requiere un índice de muestreo de

inspección más alto. Pruebas adicionales, como las no destructivas, son frecuentemente utilizadas durante el análisis a nivel de proyecto para proporcionar un conocimiento adicional sobre la condición del pavimento.

En la siguiente figura se enlistan las principales actividades que ocurren en cada nivel.

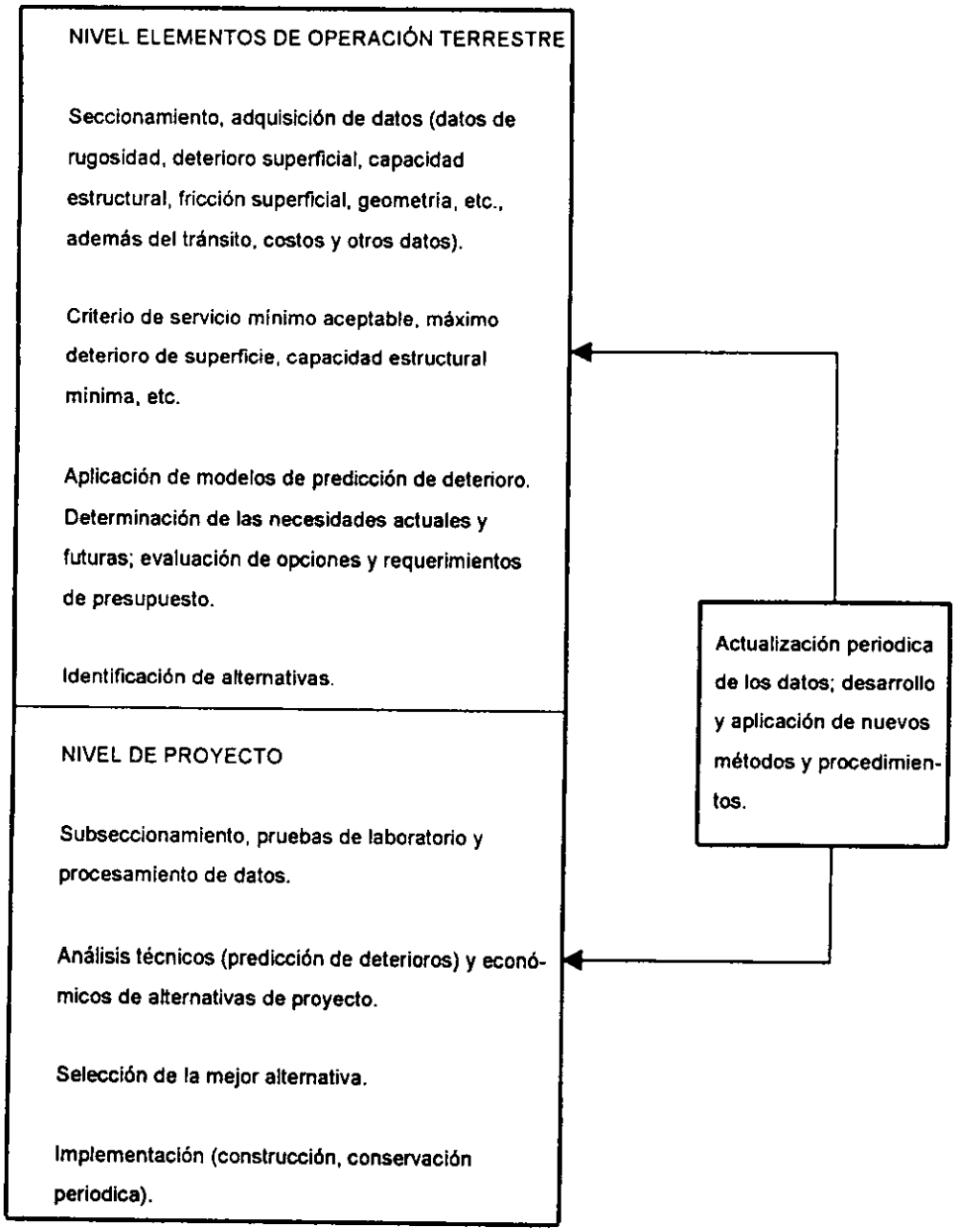

Figura 4.1 Niveles del SAP

La mayoría del personal de ingeniería tienen más experiencia en las actividades a nivel de proyecto que en una gestión a nivel de operación terrestre. Los elementos de administración a nivel de operación terrestre deben de identificar proyectos candidatos para los trabajos programados de conservación. Después, los funcionarios desarrollarían una lista final que entonces se sometería a un análisis a nivel de proyecto.

La gestión de pavimentos a nivel de proyecto generalmente considera diseños de pavimentos nuevos, así como trabajos programados de conservación que requieren algún nivel de diseño. El propósito de la gestión a nivel de proyecto es determinar la alternativa de diseño o tratamiento económicamente más eficiente, para una sección de pavimento que ha sido seleccionada para ser mejorada.

La información que se requiere a nivel de proyecto es el peso de la carga, factores ambientales, características de los materiales, propiedades de la subrasante y los costos. Los resultados del análisis realizado a este nivel nos dan un conjunto de estrategias de diseño que minimizan los costos de construcción, conservación y operación de los aviones mientras que al mismo tiempo se satisfacen restricciones físicas y administrativas, como los espesores máximos o mínimos y la disponibilidad de fondos.

A nivel de proyecto, la captura y procesamiento de los datos se realiza con mucho mayor detalle, acorde con el tamaño y tipo de proyecto, para que puedan proceder el análisis de proyecto y consecuentemente su implementación. Los datos y las actividades que están contemplados son las siguientes:

1. Identificación de subsecciones homogéneas dentro del proyecto o de la longitud de la sección.
2. Mediciones de campo para la estimación de:
   a) Geometría (anchura, espesor de las capas, etc.)
   b) Volúmenes de tránsito y cargas por eje equivalentes.
   c) Capacidad estructural suficiente, rugosidad, deterioro superficial, fricción superficial, etc.
3. Mediciones de laboratorio para determinar las propiedades de los materiales.
4. Estimaciones de costos unitarios de materiales, construcción, etc.
5. Identificación de criterios para establecer la máxima rugosidad, deterioro superficial máximo, etc.

6. Captura de datos climáticos.
7. Captura de datos disponibles relacionados con la construcción y conservación.

El análisis de proyecto incluye las siguientes actividades:

1. Espesor de las capas que componen a un pavimento y selección de los materiales que las componen.
2. Selección de la vida útil del pavimento, tasa de actualización, etc., para los análisis técnicos y económicos.
3. Análisis técnico de las diferentes alternativas en términos de predicción de deterioros y comportamiento.

Por otro lado, la mayoría de los pavimentos están hechos con capas de materiales y eventualmente todas las cargas son transmitidas al suelo o terreno natural. Los materiales más fuertes están generalmente ubicados cerca de la superficie para poder resistir las cargas de tránsito, en forma estática o dinámica. Cada capa sucesiva distribuye la carga sobre un área más grande. Las capas más fuertes proporcionan una distribución mayor, lo cual hace que las cargas sean distribuidas sobre un área más grande que la que se tendría con el mismo espesor de un material más débil.

Muchos de los pavimentos actuales nunca fueron diseñados. Muchos de ellos fueron construidos utilizando espesores uniformes que fueron seleccionados con base en la experiencia. Algunas agencias tienen catálogos con dos o tres tipos de diseño, a partir de la cual se selecciona la composición del pavimento y el espesor de la capas. Evidentemente éstos métodos no consideran todos los factores principales que afectan el comportamiento del pavimento y por lo general, ocasionan la utilización ineficiente de los fondos destinados a construcción y conservación de pavimentos. Cuando el ingeniero encargado del diseño deja de laborar en una agencia, la experiencia adquirida en el diseño de pavimentos se pierde. El aumento en los límites de carga en las pistas, calles de rodaje y plataformas, la frecuencia de las cargas, la presión y el tipo de las llantas tienen un efecto combinado que ocasionan circunstancias que los ingenieros experimentados nunca habían tratado anteriormente. Un procedimiento racional de diseño obliga al proyectista a considerar cada uno de los factores físicos que afectan el

comportamiento. Al igual que la construcción inicial de un pavimento, los trabajos de rehabilitación y reconstrucción son costosas. Se necesita un análisis del pavimento existente para determinar las causas del deterioro y poder seleccionar el tratamiento económicamente más eficiente, corrigiendo de esta forma el problema que creó la necesidad de reparación.

4.2 Diseño de pavimentos

Para el sistema de administración de pavimentos a nivel de proyecto, en lo referente al diseño estructural de pavimentos, se considera conveniente utilizar el método de la Federal Aviation Administration (FAA), ya que es relativamente sencillo de aplicar y ha sido el que más se ha utilizado en nuestro país. Por lo que se considera necesario tocar algunos aspectos de este método en el presente capítulo.

Características del tránsito

Para el cálculo de los pronósticos de las operaciones anuales que realizarán cada uno de los tipos de aeronaves, se necesita disponer del número de despegues, durante el año inicial de operación de cada tipo de aeronave (OAI). Estos datos pueden ser obtenidos del módulo de planeación. También se necesita obtener la tasa de crecimiento para poder calcular las operaciones anuales mencionadas. La tasa de crecimiento se puede inferir de los datos estadísticos, expresado como porcentaje del incremento anual y la vida útil considerada de la estructura del pavimento, que generalmente se toma de 20 años en aeropuertos.

La fórmula para el cálculo de las operaciones anuales por tipo de aeronave es la siguiente:

$$P/Y = (OAI\ (1 + r)20 - 1) / (20\ r)$$

Donde,

P/Y = Operaciones anuales promedio, durante la vida útil fijada en 20 años

OAI = Operaciones durante el primer año.

r = Tasa de crecimiento

Después, hay que considerar el máximo peso de despegue de cada aeronave y 95% de este peso es asignado al tren de aterrizaje principal. El avión de diseño es luego determinado como la aeronave que requiere el espesor más grande de pavimento. Sin embargo, no necesariamente es la aeronave más pesada la que operará en el aeropuerto, ya que los aviones tendrán diferentes configuraciones de tren de aterrizaje. Por lo tanto, es necesario homogeneizar los efectos de las cargas como si se tratara de un mismo tipo de arreglo de ruedas, utilizando factores de conversión empíricos.

Una vez que se han agrupado las aeronaves en la misma configuración de tren de aterrizaje del avión de diseño, la conversión a salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño debería determinarse según la fórmula siguiente:

$$\text{Log } R1 = \text{Log } R2 \, (W2 / W1)^{1/2}$$

Donde,

R1 = Salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño.

R2 = Salidas anuales de la aeronave considerada, convertidas al tren de aterrizaje de la aeronave de diseño.

W1 = Carga sobre la rueda de la aeronave de diseño.

W2 = Carga sobre la rueda de la aeronave considerada.

Diseño de espesores de pavimentos

En lo referente ya a nivel de proyecto, las variables importantes en el diseño de pavimentos asfálticos de un aeropuerto son las siguientes:

- Las características del tránsito aéreo. En este caso se puede aplicar el procedimiento de las salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño.
- Las propiedades de resistencia y defomabilidad de la subrasante caracterizadas por el VRS de diseño.
- Los requerimientos mínimos de calidad de las capas que componen al pavimento.
- Los espesores mínimos de las capas del pavimento.

El Valor Relativo de Soporte de un suelo, mejor conocido por sus siglas VRS, se determina mediante el ensaye de penetración de un pistón cilíndrico a una velocidad determinada. El ensaye correlaciona las cargas aplicadas al pistón con las penetraciones medidas con un extensómetro. El registro de las cargas se efectúa para incrementos constantes de penetración, a cada 2.5 mm.

Como ya se ha mencionado, en México se utiliza frecuentemente el método de diseño de la FAA, el cual está basado en correlaciones empíricas. En este existen diferentes gráficas en las que se relacionan el VRS del terreno de cimentación y/o de la capa subrasante con el peso bruto de la aeronave de diseño y el número de pasadas o salidas anuales de la misma aeronave.

De la aplicación de dichas curvas se infiere el espesor total del pavimento, expresado como una sección homogénea de grava (grava equivalente), considerando una vida útil del aeropuerto de 20 años.

El diseño de espesores de pavimentos de concreto está regido por las siguientes variables significativas:

a) Las particularidades del tránsito aéreo. Esto es, el tipo, peso y el número de pasadas o salidas anualesde la aeronave de diseño.

b) Las propiedades mecánicas del concreto empleado en las losas del pavimento, caracterizadas por su módulo de elasticidad, la relación de Poisson y su módulo de resistencia a la flexión.

c) Las propiedades de resistencia y de deformabilidad combinadas de las capas de subrasante y subbase, definidas por su módulo de reacción vertical (k).

El ensayo con placa de carga mide la capacidad de resistencia de la subrasante del pavimento. El resultado de este ensayo se expresa como un valor k con las unidades de presión sobre la longitud. El valor k puede considerarse como la presión requerida para producir una deformación unitaria de una placa de carga en la subrasante del pavimento.

Como en el caso de los pavimentos asfálticos, la FAA ha elaborado gráficas para el diseño de espesores de losas de concreto, teniendo como datos el módulo de resistencia a la tensión por flexión, el módulo de reacción vertical, el peso bruto de la aeronave y las

salidas anuales estimadas en la vida útil. Después, de la gráfica se define el espesor de diseño del pavimento.

Un completo sistema de administración de pavimentos debe seguirse desde diseño de nuevos pavimentos o rehabilitación a las fases de la puesta en práctica de la conservación y construcción, además de la retroalimentación de los datos. La transición del diseño a la construcción es uno de los más importantes y difíciles procesos organizacionales del sistema de administración de pavimentos.

Asimismo, los diseñadores deben estar al tanto de los procedimientos utilizados para la evaluación de los pavimentos, ya que esta retroalimentación de la información es necesaria para definir los programas de inversión y de diseño. Asimismo, los diseñadores deben estar concientes del comportamiento del pavimento a lo largo del periodo de diseño y no solamente en el inicio del mismo. Con esto, los ingenieros de proyecto pueden utilizar la información que arroje la evaluación para que puedan actualizar sus predicciones de diseño.

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN

5. Construcción

En esta parte del trabajo, se quiere identificar y describir brevemente, aquellos aspectos de la construcción que contribuyan a la operación y éxito de un sistema de administración de pavimentos. La construcción exitosa será aquella que cumpla con los objetivos determinados en la planeación y diseño.

5.1 Información

Una particular atención debe ser puesta en la información de la construcción. Esto suministra datos clave a las áreas de planeación, diseño y conservación. En el área de planeación, la información es utilizada para actualizar estimaciones, reprogramación de proyectos, actualización de periodos de construcción y demás. En el área de diseño, la información de construcción puede ser utilizada para actualizar y mejorar modelos de diseño y también para mejorar la exactitud de la evaluación económica de proyectos individuales. El área de conservación puede beneficiarse de la información de construcción en los materiales utilizados y problemas especiales encontrados.

La fase de planeación suministra el tipo de información "que, cuando y donde" a la construcción y otras fases. El área de planeación suministrará información para la programación de personal y recursos, así como también suministrará restricciones de tiempo que se tengan.

La construcción retroalimenta a la planeación de diferentes formas. Por ejemplo, comparaciones de los costos finales de construcción y cantidades de materiales con las estimaciones de programación originales pueden ayudar en la actualización de la programación futura. El monitoreo de la construcción en progreso puede señalar la necesidad de realizar ajustes en el programa. El dinero no siempre está disponible para cubrir los sobrecostos y el conocimiento puede hacer posible la reprogramación sin penalizar otros contratos.

Los planes y especificaciones del diseño proveen datos directos para la construcción. Esta es la más obvia y directa interacción entre las dos fases. En adición a los documentos de contrato y detalles de construcción, la interacción propia en las fases tempranas del diseño puede asistir a la construcción en la parte de ingeniería de campo, estableciendo métodos preliminares para la localización de materiales, así como también establecer técnicas de control de calidad y de cantidad.

La retroalimentación de la construcción a el diseño es igualmente vital. Un diseño económico no es efectivo si se presentan problemas en la construcción que son difíciles de manejar. Por ejemplo, un material puede aparentar ser económico basado en datos anteriores, pero un trabajo particular o localidad puede resultar que el abastecimiento sea escaso y de mayor costo de lo esperado.

Por otra parte, nuevas técnicas de construcción pueden conducir a cambios en el diseño. Este tipo de retroalimentación desde el área de la construcción puede llevar a que varios organismos encargados de la operación de los aeropuertos cambien sus especificaciones. Un sistema de administración de pavimentos puede ayudar a que las ideas nuevas no sean descartadas debido a metodos anticuados.

En su más amplio sentido, la evaluación de los pavimentos suministra datos que son útiles a la fase de construcción. Monitoreos periodicos y evaluaciones de los pavimentos de los aeropuertos pueden mostrar que ciertos métodos de construcción y tecnología, aunque aceptables bajo especificaciones existentes, conducen a una falla prematura o a un rápido deterioro. Como ejemplo, la graduación de agregados es controlada antes de la compactación. Pruebas subsecuentes en evaluaciones posteriores pueden mostrar que la construcción en proceso ha degradado el material excesivamente, lo que puede conducir a una debilidad estructural o a problemas de drenaje. Un buen sistema de retroalimentación de datos puede asistir en la solución de muchos problemas potenciales de construcción.

Los datos de la construcción a la evaluación son directos e importantes. Los registros de construcción suministran la evaluación inicial del pavimento. Más aún, si los datos de construcción están registrados en forma correcta, formarán el respaldo de las evaluaciones futuras porque los datos estarán más completos y detallados que los que se puedan obtener de nueva cuenta. Adicionalmente, estos registros pueden ser utilizados para ayudar en la selección de la localización inicial de las secciones de pavimentos a ser monitoreadas periodicamente. Esto es importante, ya que el monitoreo es un proceso importante en la toma de muestras.

Durante el monitoreo periodico, se deben revisar los problemas observados en el pavimento en forma directa contra los registros de construcción existentes.

La última fase considerada en lo relativo a la construcción es la conservación. Las consideraciones cuidadosas en la conservación pueden mostrar algunos patrones que son retroalimentados al área de construcción y mostrar de esta forma algunas debilidades

en las especificaciones, métodos constructivos y métodos de control de calidad.En lo relativo a los flujos de información de la construcción a la conservación, técnicas efectivas de construcción son dependientes de los materiales actuales y de los métodos de construcción usados.

Los costos más importantes en la construcción y conservación de los pavimentos corresponde a los materiales, roca, grava, arena y otros suelos. Pueden localizarse depósitos de materiales apropiados cerca del lugar de su utilización, abatiendo los costos de transportación, que suelen ser de los que más afectan los totales.

Desafortunadamente, la información sobre las disponibilidades de los materiales en cada zona cruzada por una vía terrestre se pierda una vez realizada una obra, de manera que los ingenieros que hayan de construir otra vuelvan a enfrentarse al problema original de buscar materiales apropiados donde otros ya los habían encontrado.

Por lo anterior, es realmente importante centralizar de alguna forma toda la información que día a día va surgiendo sobre materiales utilizables, localización, volúmenes aprovechables, utilización, tratamientos, etc. Una vez realizada esta tarea, todas las empresas constructoras del país podrán obtener considerables ahorros en la búsqueda de materiales y a la vez, disponer para una utilización determinada, de toda la experiencia de quienes antes hayan usado el mismo banco, para los mismos o similares fines.

Antes de conducir el trabajo de campo, el equipo de proyecto debe revisar los registros existentes para determinar la estructura y edad del pavimento. Estos registros incluyen: registros de construcción, de conservación y planes de trazado del aeropuerto. Los funcionarios del aeropuerto deben ser contactados para obtener información si los registros se encuentran incompletos o no disponibles. La información recolectada es de gran utilidad para dividir el pavimento de los aeropuertos en secciones distintas y para poder identificar las tendencias del comportamiento del pavimento, en las que los requerimientos de rehabilitación y conservación pueden ser aplicados.

5.2 Control en la construcción

El control de la construcción es una parte vital de la administración de la construcción y del sistema de administración de pavimentos como un todo. El control puede ser considerado en muchas formas y desde diversos puntos de vista. El control administrativo de un trabajo o de un sitio de construcción es uno de tales aspectos. Control físico de los

bancos de materiales es otro de los importantes aspectos que deben ser considerados. El término control de la construcción como es usualmente aplicado, identifica el proceso de control o el de aseguramiento de la calidad de la construcción del pavimento.

La calidad de la construcción puede ser controlada de muchas formas, las cuales incluyen planes y especificaciones y ciertas técnicas de medidas para el aseguramiento de que el pavimento es construido de acuerdo con el diseño, que ha sido previamente seleccionado y descrito en los planes y especificaciones. Sin embargo, existe con frecuencia alguna pérdida de información entre el diseño del pavimento y los planes y especificaciones que lo describen.

El control de calidad es el aspecto más importante del sistema de administración de pavimentos. El control de calidad es requerido para asegurar que el pavimento terminado cumpla con los estándares mínimos necesarios consistentes con el servicio deseado para la vida planeada de la instalación. Esto es obtenido por medio de revisiones, a través de pruebas, la calidad de los materiales y las varias fases del trabajo o construcción.

Básicamente, el control de calidad es un concepto donde una condición observada es asumida que define una realidad. Una prueba es realizada; si los resultados especificado iguala o excede el valor especificado, estos pasan. Si el resultado se encuentran por debajo de los valores especificados, este simplemente no pasa. Poco es tomado en cuenta al hecho de que cada prueba representa solamente una pequeña muestra de el material que está siendo inspeccionado.

El mecanismo para todos los controles de calidad es el de probar cada uno de los factores que está siendo controlado. El tipo de pruebas que debe ser utilizado para cada especificación y especialmente, su número o frecuencia es objeto de mucha controversia.

El número de pruebas para determinado volúmen de trabajo es un índice básico que debe ser ajustado utilizando principios de estadística. Primero, el tiempo o lugar para realizar la prueba debe ser al azar. Después, el número de pruebas puede ser incrementado o disminuido dependiendo de la variación de los primeros resultados obtenidos. Si la desviación es muy alta, la frecuencia de las pruebas debe ser incrementada. Si la desviación es relativamente pequeña, la frecuencia debe ser reducida. Cada organización establece su fórmula de frecuencia para pruebas de acuerdo con el grado de control que se decide, si es necesario a partir de la experiencia, calidad de resultados, etc.

Para poder establecer un programa de control de calidad razonable, la empresa operadora de un aeropuerto deberá emplear los siguientes pasos básicos:

1. Determinación de los métodos de prueba y las frecuencias de prueba.
2. Adquisición de información de datos de prueba. La información debe ser organizada de tal forma que los análisis estadísticos (desviación estándar, coeficiente de variación, etc.) puedan ser realizados.

5.3 Documentación de los datos de construcción

La función de la construcción no finaliza con la entrega de la instalación física actual sino que debe documentar las propiedades de construcción o las condiciones del pavimento. Esto representa información importante para la administración de pavimentos, y debe ser adquirida y procesada en una manera que sea fácilmente entendible y utilizable.

Una considerable cantidad de datos puede ser generada cuando se este llevando a cabo el proyecto de construcción del pavimento. Los registros de estos datos tienen las siguientes funciones básicas:

1. Proporcionamiento de evidencia documentada que el proyecto fue construido de acuerdo con las especificaciones del contrato.
2. Suministro de una base de datos para evaluar la adecuación de la efectividad de los métodos de control de calidad y los efectos de las prácticas constructivas en el comportamiento del pavimento.
3. Suministro de datos para otras fases de la administración de pavimentos.

Las principales clases funcionales de los datos de proyecto de construcción, que deben ser incluidos aparecen en la figura 5.1.

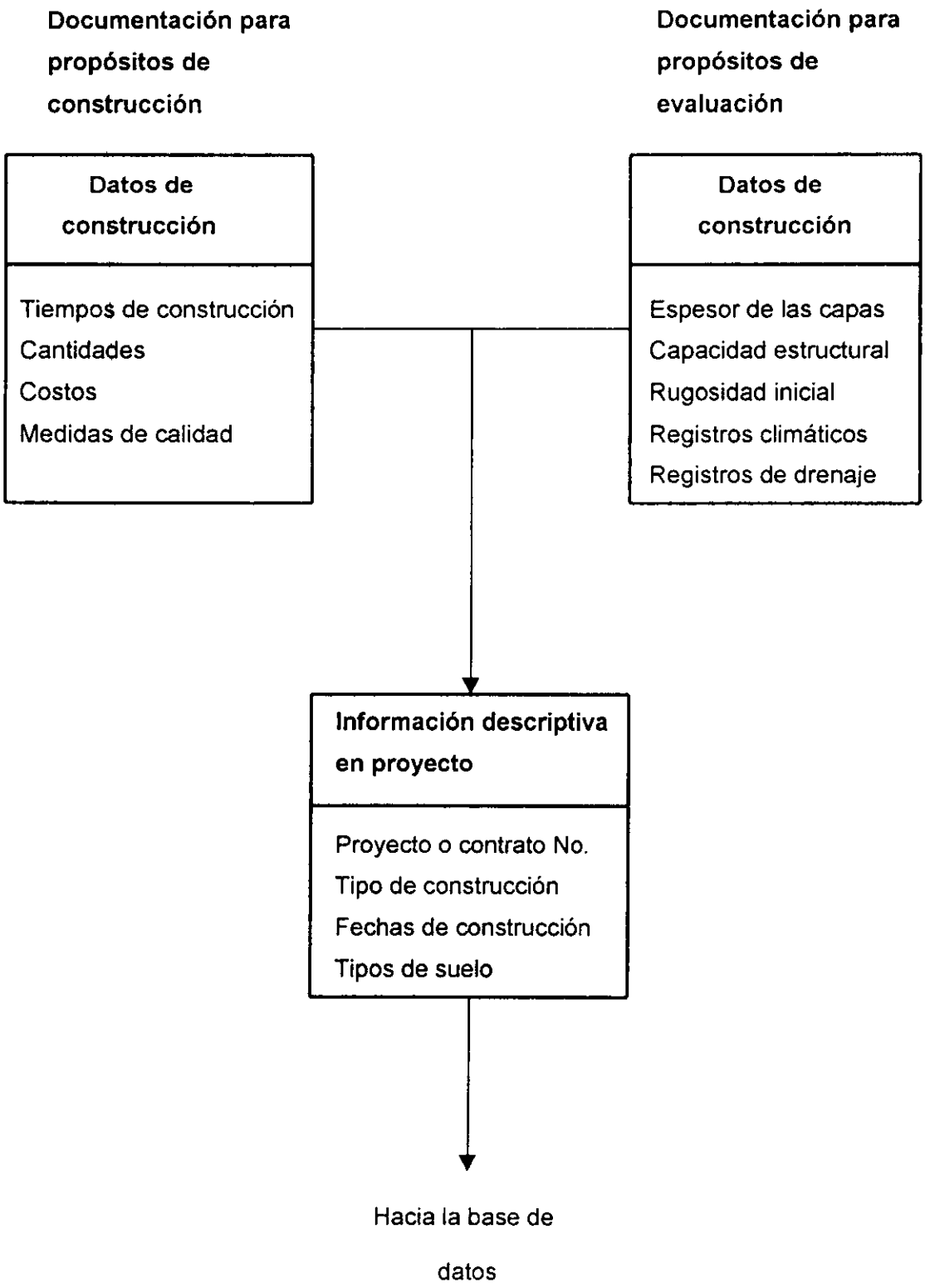

Figura 5.1 Clases funcionales de los datos de construcción

Algunos tipos importantes de información de construcción puede ser clasificada como sigue:

1. Tipo y espesor de la estructura del pavimento actualmente construida y sobre que longitudes.
2. Utilización de cantidades de materiales actuales, sus propiedades y las variaciones en propiedades.
3. Costos actuales.
4. Fechas de construcción actuales o tiempos.
5. Registros de clima, lluvia, problemas de drenaje y tránsito durante construcción.
6. Capacidad estructural inicial.
7. Indice de perfil inicial del pavimento.

Los últimos dos tipos de información pueden ser manejados como una parte de la función de evaluación del pavimento. No obstante, estos representan importantes piezas de la información de construcción y no deben ser abandonadas.

Cuando el nivel de datos a ser capturados ha sido establecido, la información debe ser codificada y organizada para usarse en un sistema de procesamiento computarizado. Los métodos de código adoptados deben ser consistentes con aquellos empleados en otras fases del sistema de administración de pavimentos.

CAPÍTULO 6

CONSERVACIÓN

6. Conservación

La definición de conservación varía entre distintas agencia u organismos. En un sentido físico, la conservación consiste en un conjunto de actividades con el propósito de disminuir la evolución de los deterioros de una estructura, o bien también pueden ser actividades correctivas dirigidas hacia el mantenimiento de la estructura en estado de serviciabilidad.

Los trabajos de conservación incluyen las actividades de conservación rutinaria, conservación programada y rehabilitación.

La conservación rutinaria incluye todas aquellas actividades de mantenimiento preventivo. La conservación programada son las actividades de mantenimiento correctivo.

En un sentido administrativo, la conservación puede ser separada de la rehabilitación por identificación presupuestaria y por ser realizada en secciones discontinuas de no más de varios cientos de metros de longitud.

En los trabajos de reestructuración se tiene que realizar una construcción total de una nueva estructura de pavimento. Es decir, ya no se puede contar con la estructura actual de un pavimento por ser totalmente inservible.

6.1 Políticas de conservación

Las políticas para la conservación de los pavimentos varían ampliamente, de organización a organización, de lugar a lugar, y de tiempo en tiempo. Varios factores usualmente gobiernan estas políticas:

1. Fondos disponibles
2. Precedentes históricos
3. Consideraciones políticas.

Uno o todos los puntos anteriores pueden estar involucrados con una política de conservación particular.

Actualmente en los aeropuertos de nuestro país, las políticas de seguridad usualmente dictan que los fondos disponibles deben ser aplicados para cubrir las más extremas necesidades. Después, lo que queda del presupuesto es inadecuado para servir a las demás áreas. Es decir, no se cumple con la conservación rutinaria que requieren las

pistas, calles de rodaje y plataformas. Como resultado de una falta de conservación constante, el pavimento se deteriora de manera muy rápida; además, otra cantidad del limitado presupuesto es requerido para trabajos que necesitan grandes remedios y por lo tanto continua el decremento en el ciclo de deterioro.

En tiempos de dificultades financieras, la conservación es frecuentemente uno de los primeros programas en ser sacrificados para resolver las necesidades inmediatas del presupuesto.

Hay que señalar que el concepto de la administración de pavimentos está relacionado a los costos y a la economía. En el proceso de administración de pavimentos, los costos que deben ser considerados incluyen no solamente el costo inicial, sino también los costos de mantenimiento rutinario y costos de operación.

Los costos de operación están relacionados principalmente a un pavimento que se encuentre en malas condiciones y que presenta una rugosidad o daños excesivos. También están relacionados los costos de demora que las aeronaves sufren en relación con el tiempo requerido para la conservación y rehabilitación de los pavimentos de las pistas, calles de rodaje y plataformas. Considerando estos costos, junto con los costos iniciales de construcción y el valor del dinero a través del tiempo, se hace posible el evaluar los costos verdaderos de las estrategias de conservación de pavimentos, y seleccionar aquellas que sean las óptimas.

Por otro lado, la información es una parte vital en cualquier sistema de administración de pavimentos. Invariablemente es de gran utilidad en la conservación de los mismos. La disponibilidad de la información de la base de datos del pavimento es importante para el área de mantenimiento por las siguientes razones:

1. Suministra al ingeniero con elementos básicos importantes para la correcta planeación y programación de los gastos de conservación.
2. Permite la evaluación de la validación de los modelos de conservación existentes.

Cuando un sistema de administración está funcionando en forma efectiva y han sido almacenados los registros apropiados, los análisis de los datos pueden señalar diseños inadecuados, estimaciones del tránsito inexactos, evaluaciones de materiales también inexactos, problemas de construcción, etc.

6.2 Actividades de conservación

Las actividades de conservación continuamente están cambiando cuando nuevas tecnologías se vuelven disponibles, cuando es comprobada la experiencia de otras agencias y el comportamiento a largo plazo es evaluado.

A continuación se proporciona una lista de las opciones usuales de conservación que se utilizan actualmente en aeropuertos.

1. *Conservación rutinaria.*

   Limpieza de la superficie de rodamiento.

   Relleno aislado de grietas en carpetas asfálticas.

   Bacheo superficial aislado.

   Bacheo profundo aislado.

   Eliminación de caucho en la superficie de rodamiento.

2. *Conservación programada.*

   Renivelación menor.

   Mortero asfáltico

   Ranurado y fresado de la superficie de rodamiento

   Reposición de losas de concreto hidráulico.

   Reparación de grietas longitudinales.

3. *Rehabilitación.*

   Renivelación mayor en carpetas asfálticas

   Construcción de sobrecarpetas o carpetas asfálticas.

   Construcción de sobrecarpetas o carpetas de concreto hidraúlico.

   Reciclado de carpetas asfálticas.

   Reciclado en frío del pavimento existente para producir subbases o bases.

Corte y sustitución del pavimento existente

Demolición y reposición de losas de concreto

Es importante que todas las estrategias disponibles de conservación estén claramente identificadas por el organismo aeroportuario y que exista un procedimiento para decidir que estrategias existentes son factibles para ciertas situaciones dadas. De esta forma, el proceso de programación prioritario puede ser llevado a cabo eficientemente.

La selección de una estrategia de conservación para una estructura de pavimento determinada, es una decisión importante que requiere muchos años de experiencia en el área del mantenimiento. En muchos casos, un grupo experimentado de ingenieros estarán de acuerdo en recomendar una estrategia determinada en lo referente a la conservación. En otros muchos casos existirán desacuerdos y solamente a través de la evaluación de la condición del pavimento y de un análisis económico, es como se hará la selección de la estrategia correcta de conservación.

6.3 Selección del periodo de programa

El periodo de programa para la conservación no es necesariamente el mismo que el periodo de vida útil del pavimento. De hecho, generalmente es mucho menor, siendo generalmente de tres a ocho años.

Los siguientes periodos de programa de rehabilitación pueden ser considerados razonables y han sido encontrados como aceptables en la práctica:

1. Cinco años para porciones de pavimentos de aeropuertos donde existen incertidumbres considerables para los fondos futuros.
2. Diez años para otras situaciones de los elementos de operación terrestre, particularmente cuando se desea una evaluación a largo plazo de las implicaciones estratégicas de niveles grandes o pequeños de fondos.

Una consideración práctica para pavimentos de aeropuertos es el de desarrollar un programa de 5 a 10 años, pero considerando las incertidumbres de los años futuros, es conveniente fijar los primeros 2 o 3 años del programa para llevar actualizaciones anuales. De esta forma se tiene cierta flexibilidad para algunos proyectos que necesitan ser adelantados a partir del primer o segundo año si los precios de licitación se

encuentran por abajo de los estimados. Alternativamente, precios de licitación más elevados de los esperados pueden causar que algunos proyectos programados para el primer año sean diferidos para el segundo año.

6.4 Utilización de la información por otras áreas del SAP

Cuando un sistema de administración de pavimentos funciona adecuadamente, y los registros apropiados han sido almacenados en forma adecuada, un análisis de los datos puede señalar diseños inadecuados, estimaciones de tránsito áereo inexactos, una detección de deficiencias en los materiales constitutivos, problemas de construcción, etc. A continuación se muestra en la figura 6.1 un resúmen de como la información de conservación puede ser utilizada por otras actividades de la administración de pavimentos.

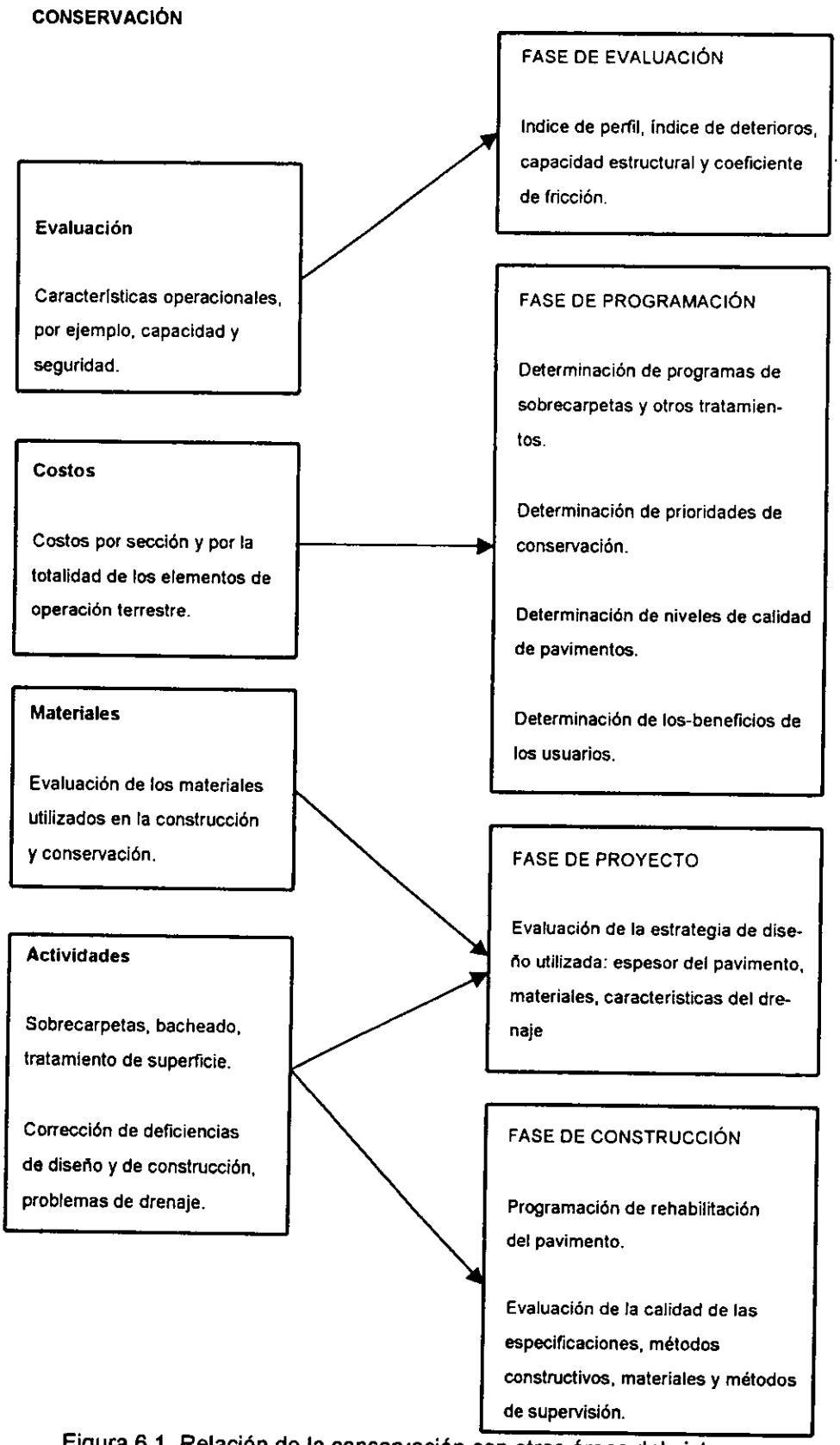

Figura 6.1 Relación de la conservación con otras áreas del sistema

6.5 Predicción del comportamiento de los pavimentos

El rendimiento de un pavimento es la facilidad que tiene dicha estructura en cumplir su propósito a lo largo del tiempo. Un método de predicción es una descripción matemática de los valores esperados que el pavimento tendrá durante un periodo de análisis especifico. Los modelos de predicción proveen de parámetros a la optimización de la administración de pavimentos, para que los mismos sirvan de base para la selección de los programas futuros de conservación.

Se puede utilizar una técnica de modelado en la que involucra la organización de la red de pavimentos en "familias" de pavimentos que se desempeñan en una forma similar. Por ejemplo, los pavimentos asfálticos que nunca han recibido una sobrecarpeta y son sujetas a tránsito pesado, pueden ser agrupadas en una familia.

Los requerimientos básicos para cualquier modelo de predicción son los siguientes:

1. Una base de datos adecuada.
2. La inclusión de todas las variables significativas que afecten el deterioro.
3. Selección cuidadosa de la forma funcional del modelo, para que pueda representar la situación real física del pavimento.
4. Criterio para evaluar la precisión del modelo.

El modelo de predicción más utilizado en la actualidad es el siguiente:

Curvas de comportamiento: Una curva de comportamiento define las variaciones de los atributos del pavimento a través del tiempo. Estas curvas normalmente calculan el índice de perfil esperado en relación con la edad del pavimento. Las curvas de comportamiento normalmente calculan la serviciabilidad en relación con la edad del pavimento. Asimismo, otros atributos pueden ser utilizados para establecer nuevas relaciones, los cuales son capacidad estructural, resistencia al deslizamiento y medidas de deterioro.

Para poder estimar los años de las necesidades de conservación y rehabilitación en las secciones para los pavimentos en los aeropuertos, es necesario predecir el coeficiente de cambio de las medidas establecidas. También es deseable el predecir el coeficiente de cambio de algunos de los componentes de una medida, tal como la componente del agrietamiento del deterioro de superficie, para poder calcular los requerimientos de conservación.

Las opciones consideradas por una empresa operadora de aeropuertos para la conservación, tanto correctivas como preventivas, usualmente representan una práctica en común. Sin embargo, estas casi siempre cambian cuando aparecen nuevas tecnologías, se revisa la experiencia de otras agencias o empresas y/o se evalúa el comportamiento a largo plazo. En una situación real dada, el conjunto de opciones factibles de conservación puede resultar más pequeño que el conjunto total disponible debido a los costos, a las restricciones físicas y las condiciones existentes del pavimento.

El tiempo de conservación puede ser un factor importante en el comportamiento del pavimento. Las curvas típicas del deterioro de pavimentos consisten generalmente de dos fases. Durante la primera fase, un 40% de deterioro en la condición del pavimento gradualmente ocurre en un 75% de la vida de esta estructura. Cuando la segunda fase empieza, la condición del pavimento decrece en un 40% en solamente 12% de la vida del pavimento. En este punto, los costos de conservación son de 4 a 5 veces más altos que los costos de conservación final de la primera fase. Si las reparaciones en el pavimento se llevan a cabo mientras el pavimento todavía se encuentra en la primera fase, en lugar de esperar hasta que la curva decline a una condición más pobre, los costos pueden ser reducidos en una forma muy importante.

Un método para desacelerar el deterioro de la condición del pavimento es el de efectuar técnicas de conservación preventivas. Con esto se buscaría prolongar el periodo de vida útil del pavimento.

Es importante determinar el tiempo óptimo para la aplicación de los tratamientos de conservación. Normalmente, el tiempo óptimo de reparación es el punto en el que un índice gradual de deterioro empieza a incrementarse a una tasa mucho más rápida. Es crítico el identificar este punto en el tiempo para evitar costos mayores de conservación y rehabilitación causados por un exceso de deterioro.

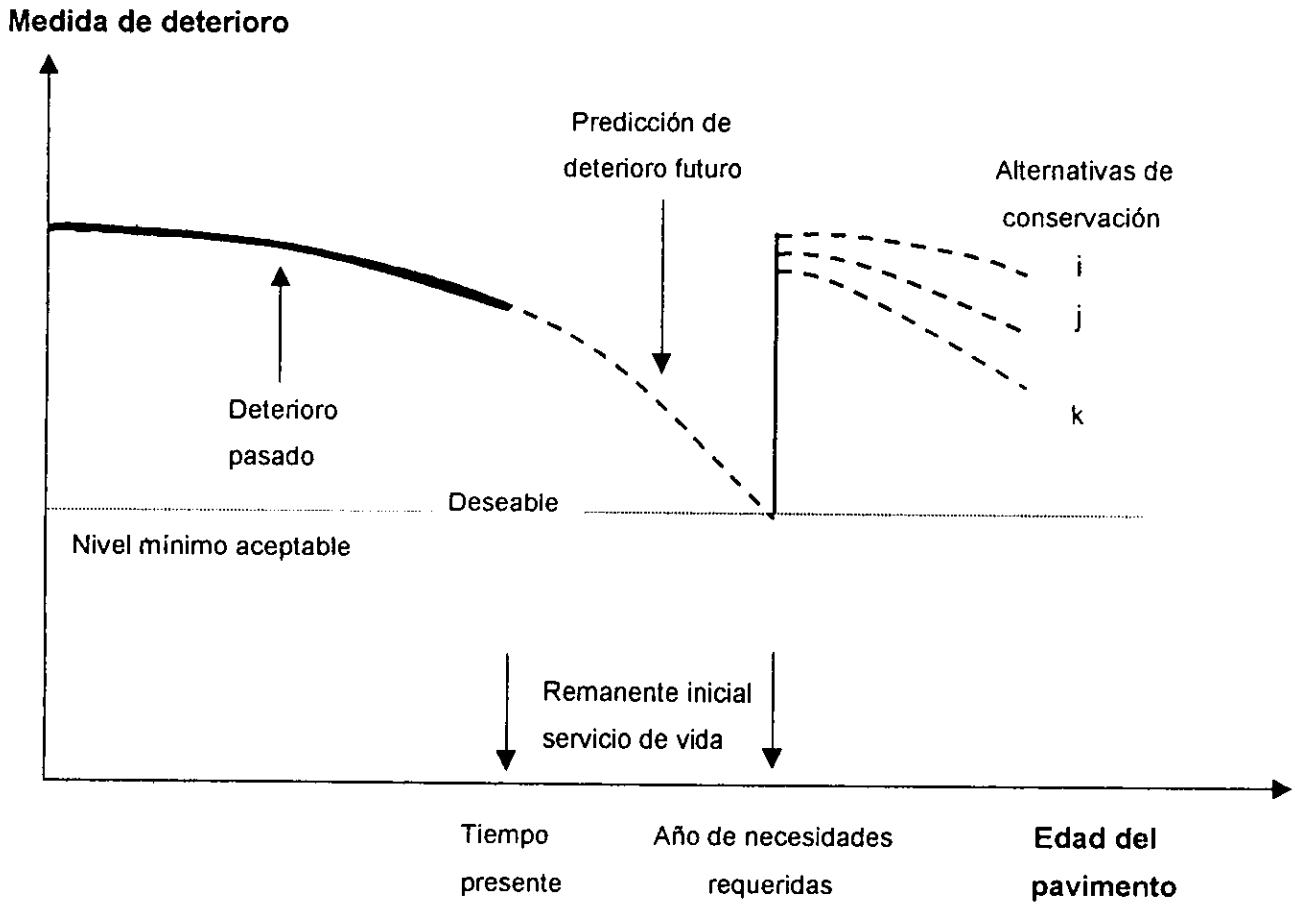

Figura 6.2 Año de necesidades requeridas

La figura anterior ilustra esquemáticamente la predicción de deterioro sería aplicada para una sección de pavimento existente, para estimar la tasa de deterioro futura y las necesidades requeridas para un determinado año. Asimismo, ilustra la aplicación del modelo de deterioro a las alternativas de rehabilitación aplicadas en las necesidades del año.

El año en que una sección de pavimento se deteriore al nivel mínimo aceptable será el año en que se tenga que tomar alguna acción para su rehabilitación, si los fondos suficientes están disponibles. Sin embargo, bajo condiciones de recursos limitados, el año en que se tengan que tomar las acciones tendrá que ser diferido, particularmente si otras secciones de los elementos tienen mayor prioridad. Alternativamente, si la rehabilitación puede ejecutarse en el año en cuestión, sería lo más deseable para determinadas secciones como aquellas que soportan un gran peso por parte de las aeronaves, donde se pueden tener beneficios económicos significativos.

Existen límites prácticos y económicos en los años en que se tengan que tomar las acciones. Por ejemplo, en la continuación con el avance de las acciones se alcanzaría un punto donde el nivel de deterioro podría justificar, solamente una conservación rutinaria. Por otro lado, diferir el año de realización de las acciones mucho mas allá de las necesidades requeridas, tendrá como consecuencia un incremento en la extensión y severidad de las áreas por tratar y un costoso mantenimiento correctivo, así como el de restringir las alternativas factibles de rehabilitación para la construcción de capas superiores.

El establecimiento de las necesidades de un año determinado para una sección y otras posibles acciones, no indican por si mismas que alternativas de rehabilitación deben ser consideradas y cual es preferible o la más efectiva en cuanto costo.

Es posible seleccionar buenas alternativas, basadas en la experiencia más cierto tipo de juicio, para las necesidades de las secciones sin realizar cálculos comparativos. Esto puede ser de hecho muy satisfactorio para pequeños elementos de pavimentos donde la familiaridad y la experiencia del ingeniero local es muy amplia. Sin embargo, en lo que concierne a elementos más grandes, el número extensivo de posibles combinaciones de secciones contra años de acción y contra alternativas de rehabilitación factibles, hacen casi imposible seleccionar el mejor conjunto de combinaciones para cualquier año dado, basado solamente en el juicio.

Si el nivel de deterioro del nivel de una sección está cerca del nivel mínimo aceptable, entonces podría estimarse la aplicación del modelo de deterioro aún con un gran margen de error.

Consecuentemente, las predicciones de deterioro deben ser periodicamente actualizadas, y el periodo sobre el cual las necesidades son estimadas deben ser restringidas a un grado razonable de confiabilidad, al menos con los modelos comúnmente disponibles.

Para estimar las necesidades de los años para las secciones de los pavimentos, es necesario predecir la tasa de cambio de aquellas medidas para cualquier criterio que se haya establecido. Asimismo, es necesario el predecir la tasa de cambio de alguno de los componentes de una medida, tal como la componente del agrietamiento del deterioro de superficie, para estimar los requerimientos de conservación del pavimento. Hay que señalar que las predicciones de deterioro deben ser periodicamente actualizadas y el tiempo sobre el cual los años de las necesidades de conservación y rehabilitación son estimados, deben ser restringidos a un grado razonable de confianza (por ejemplo, 10 años y ciertamente no mayor de 20 años). Más aun, los modelos de predicción deben ser consistentes en relación con los altos errores asociados con otras variables, como lo puede ser el transito aéreo.

Una vez que se ha aceptado un método para la predicción del comportamiento de los pavimentos, el siguiente paso sería el definir el tipo de rehabilitación que se le dará a la estructura. Para esto es necesario definir primeramente una tabla de las rehabilitaciones factibles de llevar a cabo. El sistema de administración de pavimentos debe permitir al usuario el poder definir los tratamientos de conservación factibles. El usuario establece el nivel de la condición en el cual cada tratamiento es considerado como posible para realizar. A continuación se presenta una tabla en la cual se establece los tipos de tratamientos de rehabilitación a ser realizados en los pavimentos de aeropuertos, según el Departamento de Transporte del estado de Virginia en los Estados Unidos.

Tabla 6.1 Tipos de tratamiento de conservación

Tratamiento	ICP	Tipo de superficie	Uso del pavimento
Sellado de grietas	75 - 90	CA, ACA, ACP	Toda la aviación general
Sellado de grietas	75 - 90	CA, ACA, ACP	Plataformas
Sobrecarpeta de CA y sello de capa	40 - 75	Todas	Plataformas
Sobrecarpeta de CA	40 - 80	Todas	Pistas/calles de rodaje
Ranurado de sobrecarpeta y capa de sello	40 - 75	CA, ACA, ACP	Plataformas
Ranurado y sobrecarpeta	40 - 80	CA, ACA, ACP	Pistas/calles de rodaje
Reconstrucción total de CA y capa de sello	0 - 60	Todas	Plataformas
Reconstrucción total de CA	0 - 60	Todas	Pistas/calles de rodaje
Reconstrucción total de CCP	0 - 60	Todas	Todas
Reconstrucción parcial de CA y sello de capa	0 - 40	Todas	Plataformas
Reconstrucción parcial de CA	0 - 40	Todas	Pistas/calles de rodaje

Donde,

ICP = Indice de condición del pavimento

CA = Concreto asfáltico

CCP = Concreto de cemento portland

ACA = Sobrecarpeta de asfalto en CA

ACP = Sobrecarpeta de asfalto en CCP

Un sistema de administración de pavimentos deberá poder seleccionar un solo método de rehabilitación de una lista de alternativas para la reparación de una sección dada. En este caso se puede utilizar un análisis beneficio-costo para poder categorizar los tratamientos.

CAPÍTULO 7

MÓDULO ECONÓMICO

7. Módulo económico

En la parte económica se tiene por objetivo la selección y evaluación de alternativas de conservación y la formulación de programas de conservación que consideren la eficiencia económica en relación con la eficacia técnica.

Por lo tanto, se necesita calcular los costos de operación de las aeronaves en el aeropuerto, y realizar la evaluación de las alternativas de conservación desde el punto de vista económico, identificar aquellas que en conjunto y bajo restricciones presupuestarias, proporcionen el mayor beneficio económico.

En esta parte ya no se trata de establecer el estado físico de los elementos de operación mediante la calificación de pequeños tramos (segmentos), en donde la determinación de una unidad territorial mínima es fundamental, sino de calcular los costos y ahorros que distintas opciones de atención ofrecen para secciones de los elementos aeroportuarios con características técnicas similares.

En la parte de costos de operación, en donde el objetivo es calcular los costos actuales de operación de los aviones y su evolución durante un periodo de 20 años en ausencia de labores de conservación, se requiere de dos grupos de datos, uno indicativo de las características de la pista y calles de rodaje, y otro basado en la descripción de los aviones, en el cual se deben incluir los costos unitarios de los lubricantes, combustibles y el salario de la tripulación.

En la evaluación económica se tiene como propósito comparar diferentes opciones de conservación de un proyecto, desde las perspectivas del costo de ejecución, los beneficios económicos (ahorros en costos de operación de las aeronaves) y la vida útil de cada una de las opciones, para un periodo de análisis que puede ir de uno a veinte años.

Se necesita determinar en primera instancia el periodo de análisis y la tasa de actualización y posteriormente establecer las opciones de cada proyecto en base al periodo de diseño, las acciones de conservación propuestas para cada caso, los costos de ejecución por año y los índices de servicio esperados, producto de la conservación.

En lo referente a la asignación presupuestal, su misión es la de seleccionar dentro del grupo de proyectos las alternativas (una cada proyecto) que satisfacen las restricciones presupuestales existentes y en conjunto generen el mayor ahorro, optimizando el uso de los recursos disponibles.

Tabla 7.1 Etapas del módulo económico

MÓDULO ECONÓMICO	
SUBSISTEMA	OBJETIVO
COSTO DE OPERACIÓN	Calcular los costos actuales de operación de las aeronaves y su evolución anual en un periodo de 20 años
EVALUACIÓN ECONÓMICA	Proponer distintas opciones de conservación para cada proyecto y compararlas en términos de su costo de ejecución, beneficios económicos y vida útil, para un periodo de análisis determinado
ASIGNACIÓN PRESUPUESTAL	Seleccionar para un conjunto de proyectos, las alternativas que se ciñan a las restricciones presupuestales y que generen el mayor ahorro.

Los principales costos iniciales que un organismo operador de aeropuertos debe considerar en la evaluación económica de los pavimentos son las siguientes:

1. Costos del organismo operador.
   a. Costos de capital inicial de la construcción.
   b. Costos de capital futuro de la construcción o de la rehabilitación (sobrecarpetas, reconstrucción, etc.)
   c. Costos de conservación.
   d. Valor de rescate al final del periodo de diseño.
   e. Ingeniería y administración.
   f. Costos de las inversiones.
2. Costos de los usuarios.
   a. Operación de la aeronave.
   b. Incomodidad.
   c. Costos extras de operación de aeronaves durante la conservación del pavimento.
3. Costos de los no usuarios.
   a. Contaminación del aire.
   b. Contaminación del ruido.
   c. Molestias en las áreas adyacentes.

Los beneficios en pavimentos pueden obtenerse principalmente de reducciones directas en los costos de transporte del usuario (en este caso, reducción de costos de operación de los aviones).

Los beneficios se pueden resumir básicamente en:

- Ahorro en costos de operación en las aeronaves: Consumo de combustible, lubricantes, neumáticos, repuestos, mano de obra y frenos.
- Ahorro de tiempo de las personas y de la carga.

- Disminución del número de accidentes, pérdidas de vidas humanas, daños materiales a los aviones y a la infraestructura física.

Para poder calcular los beneficios del pavimento, es necesario definir aquellas características del pavimento que afectarán los costos de los usuarios en la operación de las aeronaves, accidentes e incomodidades. Esto podría incluir el nivel de servicio (índice de perfil) y resistencia al deslizamiento (coeficiente de fricción).

7.1 Costos de operación de las aeronaves en aeropuertos

Las decisiones para el mejoramiento de los pavimentos en la práctica son realizadas bajo consideraciones de índole estructural, de servicio, de deterioros, seguridad y de costos de conservación. Sin embargo, los costos de operación excesivos debido a las características de la superficie de los pavimentos pueden ser en algunas situaciones, un criterio válido para el mejoramiento de la estructura. De hecho, esto puede formar la base para la determinación de las necesidades prioritarias de mejoramiento para los pavimentos.

Como ya se ha dicho anteriormente, en México no se ha realizado todavía un estudio sobre los costos de operación de los aviones que operen en un aeropuerto. Por lo tanto, para poder realizar la evaluación económica de un sistema de administración de pavimentos, es necesario saber primero cuales son los costos de operación de los diferentes tipos de aeronaves.

Debido a los muy diversos tipos de aeronaves que operan en los aeropuertos de México, es conveniente que para la realización de estos estudios, se consideren los tipos de aeronaves comerciales más frecuentes que se vienen utilizando actualmente. Esto es con el fin de simplicar el cálculo de los costos de operación a utilizarse en la evaluación económica.

Las aeronaves comerciales, por su peso, podemos dividirlas de la siguiente forma:

Grupo 1: Aviones pequeños de dos motores de 25,000 kg o menos.

Grupo 2: Aeronaves medianas de mas de 25,000 kg hasta 150,000 kg.

Grupo 3: Aeronaves grandes de más de 150,000 kg.

Para cada una de estas clasificaciones, será conveniente elegir una aeronave prototipo, que puede ser la más frecuentemente utilizada en los aeropuertos de México.

De acuerdo con estadísticas publicadas por Aeropuertos y Servicios Auxiliares, los aviones que actualmente vienen operando en forma más frecuente en la red aeroportuaria nacional son los siguientes:

Boeing 747

Boeing 727-200

Boeing 767

Boeing 757

Boeing 737-200

Airbus 320

McDonell Douglas 80

DC-10

Fokker 27

Lear Jet 35

Dentro del grupo 1 pueden figurar el Lear 35 y el Fokker 27. De estos dos, el F-27 es conveniente que sea utilizado como avión prototipo para el cálculo de los costos de operación, ya que dentro de este grupo, es el más utilizado en los aeropuertos de México.

Dentro del grupo 2 pueden incluirse el B 727-200, el B 737-200 y el B 757. Dentro de este grupo, el Boeing 727-200 es el que todavía tiene un gran uso por parte de varias lineas aéreas nacionales. Por lo anterior, este tipo de avión es el representativo de dicho grupo para el cálculo de los costos de operación.

Dentro del grupo 3 pueden incluirse el B 767, el B 747 y el DC-10. Este último es el que más opera en los aeropuertos de la red, por lo que debe ser seleccionado como prototipo para el cálculo de los costos de operación para este grupo.

Para el cálculo de los costos de operación de cada uno de estos aviones prototipo será necesario averiguar los datos de las características del aeropuerto y las características de las aeronaves.

Dentro de las características del aeropuerto se encuentran el índice de perfil, la altitud en que se encuentra el aeropuerto, la longitud de las aeropistas, las facilidades con que cuenta la aeropista en lo que se refiere a calles de rodaje paralelas, el bajo nivel de servicio en las mismas y el tiempo en que se toman las actividades de conservación y rehabilitación en las áreas de operación terrestre. Los estados de superficie de rodamiento o índice de perfil pueden estar representados por el índice de servicio o el índice internacional de rugosidad (IIR). Este último constituye una medida de la rugosidad, entendida como las deformaciones verticales medidas en sentido longitudinal, de la superficie de una pista con respecto a la superficie plana de referencia, mismas que afectan la dinámica del vehículo. Hay que recordar que la rugosidad es por tanto, una característica del perfil longitudinal de la superficie recorrida y el índice internacional de rugosidad puede definirse como la suma de las irregularidades verticales (en valor absoluto) a lo largo de la zona de rodadura de un tramo homogéneo de pavimento, entre la longitud del mismo, su unidad de medida es m/km.

Un pavimento de aeropuerto puede tener ICP aceptable y una gran capacidad para soportar cargas muy elevadas, pero puede presentar un índice de perfil considerable. Como ya se mencionó al principio de este trabajo, la distorsión longitudinal de las pistas y calles de rodaje ocasionan que el avión experimente aceleraciones verticales cuando el mismo se encuentra en movimiento sobre el pavimento. Estas vibraciones pueden ocasionar un mayor desgaste en los amortiguadores de la misma y un mayor desgaste de las llantas de los trenes de aterrizaje. La rugosidad en las pistas es un aspecto aún problemático, ya que se ocasionan daños en los instrumentos y al equipo electrónico de la aeronave. Estos daños pueden ser otro factor para poder calcular los costos de operación que las líneas aéreas tienen en sus aviones. El desgaste que se tenga en llantas así como el mantenimiento que se da a las aeronaves son componentes sensibles al nivel de rugosidad que se tiene en las pistas y calles de rodaje. En este caso, debido a la rugosidad que se tiene en estas facilidades, el hule de las llantas se desprende y se corre el riesgo de que los motores de la aeronave succione los pedazos de caucho, dañando seriamente a estos motores.

Por lo anterior, los costos de operación varían significativamente con el nivel de servicio de la superficie del pavimento, y deben no solamente ser evaluados, sino también ser utilizados en el análisis económico de las diferentes estrategias.

En aeropuertos, por los general es difícil tener escalas recomendables del índice internacional de rugosidad por arriba de 3 m/km.

En el sistema de administración de pavimentos, se deberá realizar un conjunto de gráficas que tratan del defecto del deterioro de los pavimentos en los costos de operación de las aeronaves que mayoritariamente, representen el tránsito que se tiene en los aeropuertos nacionales. Se tienen que calcular los costos de operación para rugosidades de hasta 3m/km. Los resultados pueden graficarse incluyendo en el eje horizontal superior la equivalencia de rugosidad en términos del Indice Internacional de Rugosidad.

Para poder calcular de manera satisfactoria los costos de operación en función del deterioro de los pavimentos, se necesitan desarrollar estudios propios de campo y conocer cada vez más sobre las formas de utilización de los aviones de las aerolineas.

Por otro lado, la longitud de pista también afecta a los costos de operación de una aeronave. Mientras menos longitud tenga una pista utilizada para el aterrizaje de las aeronaves, se tendrá mayor desgaste en los frenos y en las llantas al momento de tratar de disminuir la velocidad del avión. Esto constituye un elemento importante para determinar si se requiere ampliar la longitud de la pista. Si se aprueba la decisión de incrementar la longitud de la pista, se tendrá que adicionar a la base de datos del SAP nueva información sobre las nuevas secciones a construir.

También sería conveniente involucrar el aspecto de una falta de capacidad en los aeropuertos, en lo referente a la zona aeronáutica. Cuando la demanda alcanza la capacidad, se producen congestiones y retrasos, provocando que se incrementen los costos de operación. Por ejemplo, cuando el sistema de las pistas se encuentra saturado por los constantes despegues y aterrizajes de las diversas aeronaves, los otros aviones que están formados en las calles de rodaje y que esperan turno para despegar, están gastando y desperdiciando combustible, que finalmente representa un costo de operación extra. Lo mismo sucede cuando las aeronaves se encuentran sobrevolando el aeropuerto, esperando autorización de la torre de control para que los aviones puedan aterrizar. En este caso, es obvio que los aviones que se encuentran sobrevolando el aeropuerto están gastando combustible, lo que también representa un costo de operación extra y que es superior al costo de cuando los aviones están esperando en tierra. El costo de los

combustibles representa actualmente un porcentaje significativo del costo directo en la operación de las aeronaves.

Solamente para darnos una idea sobre lo anterior, dentro del grupo tres, que son los aviones de largo alcance, cuando los mismos están parados esperando a que les den pista, se gastan aproximadamente 2,000 litros de combustible por hora. Esto representa el 3% del gasto total de combustible que los aviones realizan en un trayecto desde que sale de la plataforma del aeropuerto de origen hasta que llega a la plataforma del aeropuerto destino. Asimismo, cuando están en la fase de aproximación y aterrizaje, este tipo de aviones consumen aproximadamente 9,500 litros de combustible por hora. Esto representa aproximadamente el 15% del gasto total de combustible de un trayecto.

Podemos darnos cuenta que cuando en una pista la demanda ha rebasado a la capacidad, el gasto de combustible será más alto cuando los aviones se encuentran en el aire esperando que se les de autorización para aterrizar.

El congestionamiento en los sistemas de pistas y calles de rodaje también ocurre cuando se están efectuando trabajos de conservación y rehabilitación en uno de estos sistemas. Cuanto más importante sea el tipo de conservación a realizar, mayor será el tiempo en que el aeropuerto se encuentre operando en niveles de servicio menores a los esperados. Actualmente son varios aeropuertos que dejan que la condición del pavimento disminuya en forma importante, ocasionando que después se tengan que hacer trabajos de conservación y rehabilitación importantes, ocasionando que se tenga que cerrar una de las pistas o calles de rodaje, mermando de esta forma el nivel de servicio. En este caso, los costos de demora de las aeronaves estarán en función del volúmen de tránsito, el tiempo en que dure la conservación y rehabilitación y la hora del día en que estos trabajos se estén realizando.

Conforme a el plan maestro del aeropuerto, es posible que se requiera aumentar la capacidad de los sistemas de pistas y calles de rodaje. Esto último puede llevarse a cabo con la construcción de nuevas pistas y con la adición de nuevas calles de rodaje. La construcción de estas estructuras se justificaría cuando los costos de operación y de demora de las aeronaves sean iguales o se pronostique que alcancen en un corto plazo los costos de construcción de la futura infraestructura a realizar.

La altitud del aeropuerto es una característica importante, ya que a mayor altura sobre el nivel del mar, la presión barométrica y la densidad del aire disminuyen. La consecuencia de estos factores en el rendimiento de las aeronaves se traduce en una disminución de la

fuerza de sustentación, correspondiente a una determinada velocidad y en la reducción de potencia en los motores. El resultado de la combinación de estas reducciones es que se necesita más tiempo para alcanzar la velocidad de avance necesaria para generar la sustentación requerida, con lo que la longitud de pista necesaria para el despegue de una aeronave aumenta progresivamente a medida que se eleva la altitud del aeropuerto. Esto ocasiona que los aviones tengan un mayor gasto de combustible tanto en el despegue como en el aterrizaje. Asimismo, los gastos de construcción, conservación y rehabilitación de una pista aumentan.

Dentro de las características de la aeronave se encuentran las características de los neumáticos las cuales deben incluir el número de llantas por pierna, el volúmen de hule utilizable por cada llanta, costo de renovación nueva por llanta, el máximo número de renovaciones y el costo por llanta nueva. Asimismo, debe ser tomado en cuenta el mantenimiento que se le da a las aeronaves así como también los gastos de lubricantes y combustibles.

Para cada grupo de aeronaves, se debe investigar cuales son los costos unitarios de los siguientes factores:

- Costo del combustible en pesos por litro.
- Costo de los lubricantes en pesos por litro.
- Costo de renovación en pesos por llanta.
- Costo por llanta nueva en pesos por llanta.
- Tiempo de la tripulación en pesos por hora.
- Mano de obra de mantenimiento en pesos por hora.

Gran parte parte de los costos de operación de las aeronaves pueden ser obtenidos a través de los datos de mantenimiento de una aerolinea en particular. Sin embargo, se tiene el problema de que una aeronave de una aerolinea cualquiera, en un día puede operar en varios aeropuertos, por lo que investigar cuales son los desgastes que sufre una determinada aeronave que correspondan a un aeropuerto determinado, resulta algo difícil de saber de manera directa.

Una forma de resolver lo anterior es consultar las estadísticas del número de veces que la aeronave prototipo ha estado operando en el aeropuerto en cuestión durante un año. Después, se puede calcular el porcentaje del número de veces que la aeronave ha estado operando en el aeropuerto con respecto al total de sus operaciones realizadas en otros aeropuertos. Del costo total de operación anual de la aeronave prototipo, se toma en cuenta el costo correspondiente al porcentaje que la aeronave estuvo operando en el aeropuerto que nos interesa analizar.

Por otro lado, debido a que los costos de mantenimiento a recopilar serán a lo largo de un año, es necesario tomar en cuenta el ciclo vehicular de las aeronaves que pertenezcan a una aerolínea comercial. De esta forma se facilita la investigación y la clasificación de los costos de una aeronave en las diferentes etapas que la misma atraviesa a lo largo de un año.

En cualquier sistema de transporte, existen tres componentes del ciclo vehicular, las cuales son el ciclo operativo, el ciclo de servicio y el ciclo anual. El ciclo operativo principia y finaliza en una base de operaciones, el cual incluye los tiempos correspondientes a las diversas operaciones que ocurren durante la prestación de un servicio. El ciclo de servicio empieza y termina en una base de mantenimiento principal a la que el avión acude con cierta periodicidad para recibir mantenimiento preventivo. En general, cada ciclo de servicio consta de varios ciclos operacionales y puede ser bastante largo. El ciclo anual comprende la trayectoria completa del vehículo durante el año. Incluye el ciclo de servicio, el tiempo consumido para mantenimiento preventivo y el tiempo en que el vehículo está sin usar.

Como se apuntó anteriormente, el ciclo de servicio se desarrolla entre visitas consecutivas a la base de mantenimiento. En general, un vehículo realiza determinado número de ciclos operativos antes de regresar a la base de mantenimiento. Por ejemplo, dentro de este ciclo un Boeing 727 recibe cada 200 horas de vuelo o cada 20 días el servicio que necesita, que por lo general dura una noche. También se puede incluir el servicio que se le da a este tipo de aeronave después de 800 horas de vuelo o después de dos meses y medio.

El ciclo anual contempla, además del tiempo de los ciclos de servicio que se efectúan en un año, el tiempo que se utiliza para las tareas de mantenimiento preventivo de la aeronave. Además, incluye un tiempo durante el cual el vehículo no se utiliza por diversos causas, como puede ser una descompostura y el tiempo de reparación vinculado a ella.

En este ciclo, se puede incluir la examinación detallada de varios tipos de alas y de fuselajes. Asimismo, se toma en cuenta la reparación de miembros estructurales metálicos tales como varillas, largueros y travesaños de las alas y de la cola. También se incluye las reparaciones que se le tiene que hacer al tren de aterrizaje como es la alineación de las ruedas, reparación de las llantas, remplazo de amortiguadores dañados y de cilindros hidráulicos así como la reparación de los montajes de acuerdo con los fabricantes. Dentro de este ciclo se puede incluir el servicio de mantenimiento de cada 11 o 12 meses o cada 3,200 horas de vuelo que se le da a una aeronave Boeing 727-200. Para este tipo de servicio la aeronave requiere permanecer en tierra por lo menos dos semanas.

Otra situación que debe ser considerada en los costos de operación, es cuando los pilotos cobran una prima extra cuando realizan despegues y aterrizajes en pistas donde las condiciones geométricas son difíciles, como lo son los cambios de pendiente. En este caso el costo de operación de la aeronave se incrementa, ya que también se incrementa el costo de los servicios de la tripulación.

En nuestro país, actualmente son los pilotos quienes se quejan ante Aeropuertos y Servicios Auxiliares sobre las condiciones de la superficie del pavimento de un aeropuerto determinado. Sin embargo, con un sistema de administración de pavimentos, esto no sucedería, ya que se tendría monitoreado continuamente su nivel de servicio.

Con la privatización de los aeropuertos en México, las empresas operadoras de los mismos deberán cuidar que sus clientes, en este caso las aerolineas, no tengan costos de operación demasiado altos en sus aeronaves. Esto es importante, ya que los incrementos en los costos de operación de los aviones a su vez serán transferidos a los pasajeros, con el aumento en las tarifas de los boletos.

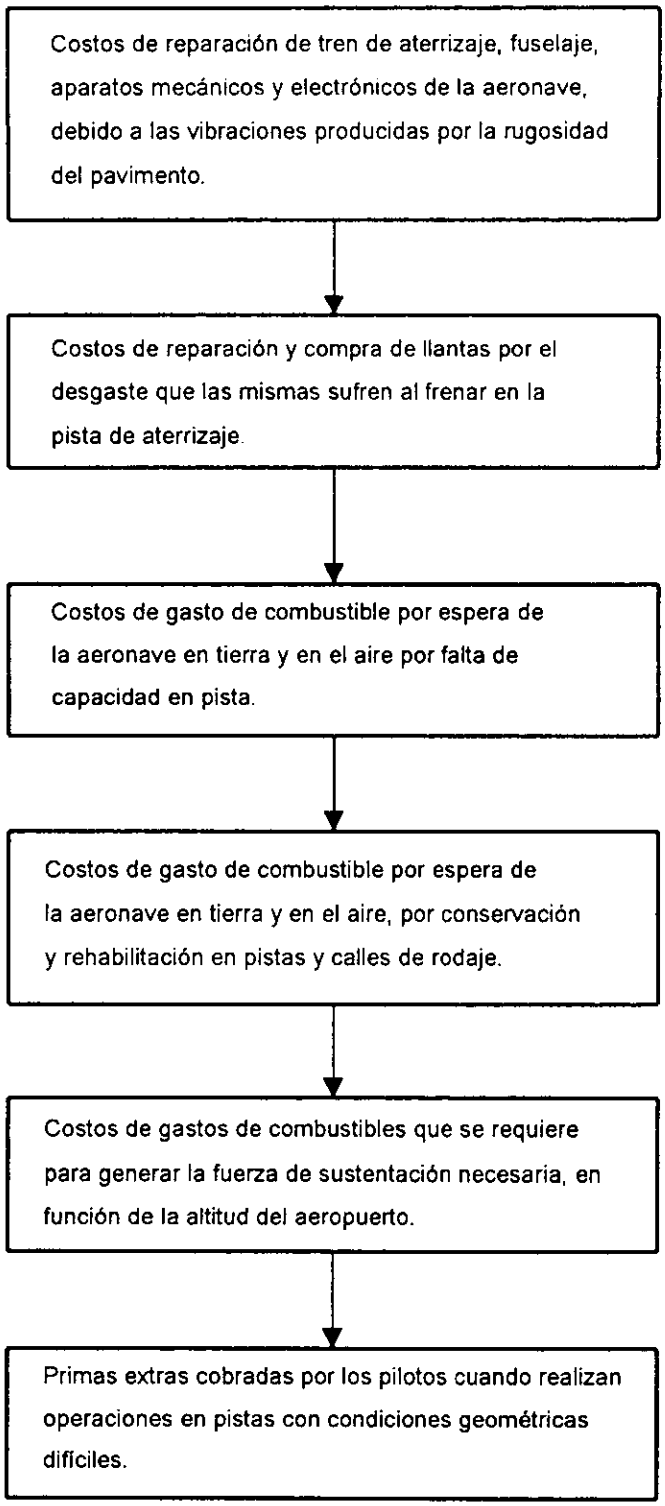

Figura 7.1 Costos de operación de la aeronave en el aeropuerto

7.2 Evaluación económica

Para comprender mejor el módulo de evaluación económica, es necesario establecer como van involucrarse los siguientes aspectos:

Diseño del periodo de análisis

El periodo de análisis para una evaluación económica no se debe extender más allá de los pronósticos realizados. Para el tránsito aéreo, es común utilizar 20 años como límite máximo. Sin embargo, el valor presente de los costos o beneficios en tiempos futuros puede ser insignificante, dependiendo de la tasa de descuento utilizada. Muchos estudios de transporte utilizan un intervalo de entre 20 y 30 años y esto suena muy razonable tratándose de pavimentos.

Tasas de actualización y tasas de interés

Básicamente, una tasa de actualización es utilizada para reducir futuros costos o beneficios esperados a términos presentes. Proporciona las herramientas para comparar opciones en los usos de los fondos, pero ésta no debe ser confundida con la tasa de interés, que está asociada con el préstamo de dinero actual.

Muchos organismos operadores de aeropuertos pueden utilizar una tasa única para todos los análisis. Se debe enfatizar que la tasa de actualización es un factor muy significativo y puede tener una influencia mayor en los resultados de un análisis económico.

Inflación

La pregunta de como tomar en cuenta a la inflación en una evaluación económica es una constante preocupación para muchos ingenieros y administradores. De acuerdo con la referencia 1 citada al final de este trabajo, es conveniente que la inflación no debe ser tomada en cuenta cuando se pronostican precios futuros, costos y beneficios y que se deben utilizar los precios actuales. La inflación es difícil de pronosticar y solamente introduce un factor de incertidumbre en la evaluación. De hecho, si la inflación fuera utilizada en estudios económicos de aeropuertos, se tendría que justificar en el presente mayores inversiones de capital. Asimismo, el propósito de una evaluación económica es el de proporcionar una dirección con una base para toma de decisiones. Incluyendo un

factor para la inflación, no es ninguna garantía que los resultados que se obtengan sean más confiables y conduzcan a una mejor o diferente selección de las diferentes opciones.

Algunos ingenieros argumentan que es necesario incluir la inflación en un análisis económico, ya que piensan que ignorando ésta, se tendría una subestimación de los costos y por lo tanto, los presupuestos resultarían incorrectos. Este argumento indica una mala comprensión del objetivo de un análisis económico, el cual es el de proporcionar a la administración de una herramienta para la selección de una opción específica de un conjunto de opciones. Una vez que la opción es seleccionada, se requiere un análisis separado del presupuesto para determinar las necesidades del flujo de dinero. El análisis del presupuesto generalmente incluye la inflación así como también fuentes actuales de los fondos.

Valor de rescate

El valor de rescate es utilizado por algunas agencias en la evaluación económica. Puede ser significativa en el caso de los pavimentos porque involucra el valor de los materiales reutilizables a el final del periodo de diseño. Con recursos posteriores, dichos materiales pueden volverse muy importantes en el futuro.

El valor de rescate de los materiales depende de varios factores tales como el volúmen y la posición del material, contaminación, durabilidad, etc. El valor de rescate puede ser representado como un porcentaje del costo original.

Hay un número determinado de métodos de análisis económicos para la evaluación de las diferentes opciones de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos. Estas pueden ser clasificadas de la siguiente forma:

1. Método del costo anual.
2. Método del valor presente para:
   a. Costos.
   b. Beneficios.
   c. Beneficios menos costos, usualmente conocido como método del valor presente neto.

3. Método de la tasa interna de retorno.

4. Método de la relación beneficio-costo.

Estos métodos tienen la característica común de poder considerar sucesiones futuras de costos (métodos 1, y 2a), o de costos y beneficios (métodos 2b, 2c y 4), para que así las opciones de inversiones puedan ser comparadas. Las diferencias del dinero a través del tiempo proporcionan los medios para realizar tal comparación.

Por otra parte, cabe hacerse la siguiente pregunta: ¿ Que tan importante es el gasto de capital inicial en comparación con el gasto esperado futuro ? Frecuentemente, intereses públicos y privados se preocupan principalmente por los costos iniciales. Un análisis económico puede indicar, por ejemplo, que en el día de hoy, un pequeño gasto de capital puede resultar en excesivos costos futuros para una opción en particular.

Otro aspecto es el nivel de toma de decisión que se tome (a nivel de elementos de operación terrestre o a nivel de proyecto). Por ejemplo, es posible que una agencia aeroportuaria utilice un método de la tasa interna de retorno para analizar sus inversiones propuestas sobre la red de aeropuertos de un país, mientras que el análisis del valor presente neto es utilizado por el diseñador a nivel de proyecto.

Asimismo, cualquier método que no considere las diferencias en beneficios entre las distintas opciones está básicamente incompleto para ser utilizado por un organismo público o privado.

De los métodos de evaluación económica mencionados, de acuerdo con el banco mundial, los que se utilizan frecuentemente en infraestructura del transporte son el método del valor presente y el de la relación beneficio-costo.

Después de realizar la evaluación económica se tendrá que realizar la asignación presupuestal, que es la de seleccionar de entre el grupo de proyectos las opciones que satisfacen las restricciones presupuestales existentes y en conjunto generan el mayor ahorro, es decir optimizan el uso de los recursos disponibles. Para esto, se necesita saber cuáles son los proyectos y opciones entre las que se llevará a cabo la optimización, a la vez que establecer los datos y restricciones que regirán la labor de asignación, tales como los periodos de tiempo y el monto de recursos disponibles en cada uno de ellos.

Dentro de este módulo, la unidad de trabajo deberá ser el proyecto, que se puede definir como un conjunto de segmentos con características homogéneas de tránsito, estado superficial, geotécnicas y de geometría, que requieren una misma forma de conservación.

Con la información del modulo técnico, se pueden formar los números de proyectos con sus respectivas alternativas de conservación.

Método del costo anual

El método del acosto anual tiene como ventaja su simplicidad y el que puede ser comprendido por parte de funcionarios públicos. Sin embargo, no puede ser utilizado, excepto Intuitivamente, para determinar si un proyecto es o no es económicamente justificable, ya que no incluye los beneficios en la evaluación. Por lo tanto, las comparaciones entre las alternativas deben ser en base a los costos solamente, con el supuesto de que éstos tienen iguales beneficios. Sin embargo, dicho supuesto es cuestionable cuando entre dichas alternativas no se involucra las diferencias en los costos de operación de las aeronaves.

Método del valor presente

Este método consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado.

El método del valor presente puede considerar tanto solamente los costos, los beneficios, o los costos y beneficios en forma conjunta. Esto incluye el descuento de todas las cantidades futuras a el presente, usando una tasa de actualización apropiada. El factor para descontar tanto costos como los beneficios es:

$f_{i,n} = 1/(1 + i)^n$

Donde

$f_{i,n}$ = factor de valor presente para una i y n particular.

i = tasa de actualización.

n = números de años.

El método del valor presente total para costos puede ser expresado en términos de la siguiente ecuación:

$$VPC_{x1,n} = (CCI)_{x1} + \sum_{t=0}^{n} [\, f_{i,t}((CC)_{x1,t} + (CM)_{x1,t} + (CO)_{x1,t}) \,] - (VR)_{x1,n} f_{i,n}$$

Donde:

$VPC_{x1,n}$ = Valor presente total de los costos para la alternativa x_1 para el periodo de análisis de n años.

$(CCI)_{x1}$ = Costos de capital iniciales para la alternativa x_1

$(CC)_{x1,t}$ = Costos de capital de construcción , etc., para la alternativa x_1, en el año t, donde t es menor que n.

$f_{i,t}$ = Factor del valor presente para la tasa de descuento, i, para t años.

= $1 / (1 + i)^t$

$(CM)_{x1,t}$ = Costos de mantenimiento para la alternativa x_1 en el año t.

$(CO)_{x1,t}$ = Costos de operación de la aeronave para la alternativa x_1, en el año t.

$(VR)_{x1,n}$ = Valor de rescate, si existe, para la alternativa x_1, al final del periodo de diseño en n años.

El valor presente de los beneficios de la misma manera como el valor presente de los costos, utilizando la siguiente ecuación:

$$VPB_{x1,n} = \sum_{t=0}^{n} [\, f_{i,t}((BDU)_{x1,t} + (BIU)_{x1,t}) \,]$$

donde,

$f_{i,t}$ = Factor del valor presente para la tasa de descuento, i, para t años.

$VPB_{x1,n}$ = Valor total presente de los beneficios para la alternativa x_1 para un periodo de de análisis de n años.

$(BDU)_{x1,t}$ = Beneficios directos del usuario de la alternativa x_1 en el año t.

$(BIU)_{x1,t}$ = Beneficios indirectos del usuario de la alternativa x_1 en el año t.

En pavimentos, es muy difícil poder cuantificar de manera adecuada los beneficios indirectos del usuario. Por consiguiente, lo más razonable es el de considerar solamente los beneficios directos del usuario durante un tiempo hasta que se perfeccione la técnica para poder medir otros factores.

El método del valor presente es consecuencia de los anteriores métodos, ya que es simplemente la diferencia entre el valor presente de los beneficios y el valor presente de los costos. Es obvio que los beneficios deben exceder los costos si un proyecto debe ser justificado con bases económicas. La ecuación para el valor presente neto es la siguiente:

$$VPN_{x1} = VPB_{x1,n} - VPC_{x1,n}$$

donde VPN_{x1} es el valor presente neto de la alternativa x_1.

Sin embargo, para la alternativa de proyecto de un pavimento, x_1, la ecuación anterior no es en sí aplicable directamente a x_1, sino que es aplicable a la diferencia entre ésta y alguna otra alternativa, como por ejemplo x_0. Considerando solamente los beneficios directos del usuario, estos son calculados como los ahorros del mismo (obtenidos a partir de costos de operación de aeronaves más bajos) de la alternativa x_1 sobre la alternativa x_0.

Por lo tanto, el método del valor presente neto puede ser aplicado a los pavimentos solamente en base a la comparación de proyectos, donde las alternativas de proyectos son mutuamente excluyentes. Cuando se evalúa una alternativa de proyecto, ésta necesita ser comparada no solamente con alguna alternativa base sino también con otros proyectos alternativos. En el caso de los pavimentos, la alternativa base puede ser aquella en la que no se realicen gastos de capital para mejoramiento de la estructura. La forma de la ecuación del método del valor presente neto para pavimentos, puede ser expresado de la siguiente forma:

$$VPN_{x1} = VPC_{x0,n} - VPC_{x1,n}$$

VPN_{x1} = Valor presente de la alternativa x_1

$VPC_{x0,n}$ = Valor presente total de costos, para alternativas x_0 (donde x_0 puede ser la alternativa estándard o base, o cualquier alternativa factible mutuamente excluyente $x_1, x_2, \ldots x_k$) para un periodo de análisis de n años.

$VPC_{x1,n}$ = Valor presente total de costos para la alternativa x_1, para el periodo de análisis de n años.

En proyectos de infraestructura del transporte, los libros que tratan sobre administración de pavimentos tienen preferencia a utilizar este método. La comparación entre las alternativas es realizada en base al menor valor presente total de los costos.

Existe un número de ventajas en el método del valor presente neto que lo hacen probablemente ser el más factible en el campo de los pavimentos para aeropuertos, en comparación con los métodos de costo anual equivalente y el de beneficio-costo. Estas ventajas son las siguientes:

1. Los beneficios y los costos de un proyecto están relacionados y se expresan como un sólo valor.
2. Todos los costos y beneficios monetarios son expresados en términos de valores presentes.
3. El método es simple para calcular.
4. La respuesta es dada como un resultado final (rentabilidad) para el proyecto.

Asimismo, existen diversas desventajas para el método del valor presente neto, incluyendo las siguientes:

1. El método en cuestión no puede ser aplicado a alternativas individuales, donde los beneficios de aquellas alternativas no pueden ser estimadas. En tales casos, cada alternativa debe ser considerada en comparación con las otras alternativas.
2. Los resultados no son fácilmente comprendidos para algunas personas, como lo puede ser la tasa interna de retorno o el costo anual. De hecho, la suma de los costos

en esta forma pueden tender a actuar como un freno hacia la inversión en algunos casos.

Método de la tasa interna de retorno

Este criterio refleja el rendimiento de los fondos invertidos, elemento de juicio necesario cuando la selección de proyectos se hace bajo una restricción en la disponibilidad de financiamiento. La tasa interna de retorno se define como aquella tasa de actualización que hace nulo el valor presente neto del mismo.

La tasa interna de retorno emplea conceptos similares al del Valor Presente Neto, pero evita la selección predeterminada de una tasa de interés mínima aceptable al costo de capital. Así pues, la TIR representa la tasa de crecimiento de una inversión que, al ser obtenida, se compara con la tasa de rendimiento requerida y si la TIR es mayor, el proyecto se acepta, ya que otorga un rendimiento mayor. En el caso contrario, la propuesta se rechaza.

Este método considera tanto los costos como los beneficios y determina la tasa de actualización en la cual los costos y beneficios para un proyecto determinado son iguales.

La tasa interna de retorno puede ser expresada en términos de la tasa en la cual el valor presente de los costos es exactamente igual al valor presente de los beneficios. Con esto, tenemos que:

$$VPC_{x1,n} = VPB_{x1,n}$$

Aplicando este método, primeramente cada alternativa debe ser comparada con la alternativa base para poder establecer la diferencia en los beneficios. Después, utilizando la ecuación anterior, se calcula la tasa interna de retorno para las alternativas $x_1, x_2, \ldots, x_x$. Sin embargo, esto es solo una comparación con la alternativa base. También es necesario calcular la tasa interna de retorno de las comparaciones entre las alternativas $x_1, x_2, \ldots, x_x$. Procediendo en base de que tales comparaciones por par eliminarán todas excepto una de las alternativas, que será aquella que tenga la mayor tasa de retorno.

Método de la relación Beneficio-Costo

El método de la relación beneficio-costo involucra la expresión de la relación del valor presente de los beneficios de una alternativa con el valor presente de los costos. Los beneficios son establecidos comparando alternativas. Utilizando el método del valor presente, el cual es el preferido por la mayoría de los economistas, la relación beneficio-costo puede ser expresada en la siguiente ecuación:

$$RBC_{xj,\,xk,\,n} = (VPB_{xj} - VPB_{xk}) / (VPC_{xj} - VPC_{xk})$$

donde,

$RBC_{xj,\,xk,\,n}$ = Relación beneficio-costo de la alternativa x_j comparada con la alternativa x_k (donde x_j produce los mayores beneficios y representa la inversión más grande), sobre un periodo de análisis de n años.

VPB_{xj}, VPC_{xj} = Valor presente de los beneficios y de los costos respectivamente, para la alternativa x_j.

VPB_{xk}, VPC_{xk} = Valor presente de los beneficios y de los costos respectivamente, para la alternariva x_k.

El cálculo de las relaciones beneficio – costo para un conjunto de alternativas propuestas es primero realizada comparando la alternativa base utilizando la ecuación anterior.

Después, aquellas alternativas que resulten de una relación mayor de 1.0 son comparadas en base a los incrementos que se den. Esto incluye el cálculo de la relación beneficio-costo en los incrementos de los gastos para alternativas de costos más altas. Procediendo en base a las comparaciones realizadas en par, utilizando la ecuación de la relación beneficio-costo, se llegará a la alternativa económicamente más atractiva.

Existen algunas desventajas en el método de la relación beneficio-costo. La principal desventaja es la naturaleza abstracta del resultado de la relación, el cual es difícil de comprender. Otra desventaja es la posible confusión cuando las reducciones en los costos de conservación deben estar en el numerador o denominador de la ecuación, así

como también si las reducciones de costos son considerados beneficios o costos negativos.

Hay que reconocer que los análisis económicos están basados en varios supuestos. La principal incertidumbre que se tiene es la predicción en el comportamiento del pavimento.

7.3 Asignación de presupuesto

Para la asignación de recursos en los trabajos potenciales de conservación y construcción, las metodologías existentes se pueden clasificar en forma muy general de la siguiente forma: Métodos de clasificación de proyectos por orden de importancia y optimización.

Cualquiera que sea el tipo de método de programación prioritaria utilizada, debe ser dirigido para contestar las siguientes preguntas:

1. ¿Que proyectos o secciones deben ser rehabilitadas o conservadas?
2. ¿Como pueden ser estas construidas o conservadas?
3. ¿Cuando deben ser estas construidas o conservadas?

Las prioridades pueden ser determinadas por varios métodos cuyo rango viene desde la clasificación simple y subjetiva hasta las verdaderas optimizaciones. La tabla de la siguiente página resume las varias clases de métodos, así como sus ventajas y desventajas.

Tabla 7.2 Métodos de programación

MÉTODO DE CLASE	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Clasificación simple y subjetiva de proyectos basados en el juicio.	Rápido, simple; sujeto a inconsistencias; tal vez alejado de lo óptimo.
Clasificación basada en parámetros, tales como serviciabilidad, deflexiones, etc.	Simple y fácil de usar; tal vez lejos de lo óptimo.
Clasificación basada en parámetros con análisis económicos.	Razonablemente simple; debe ser lo más cercano al óptimo.
Optimización por modelos de programación matemática.	Menos simple; tal vez cercanos a los efectos óptimos de tiempo no considerados.

En la clasificación de proyectos, todas las secciones del pavimento son clasificadas por tipo de pavimento, volúmen de tránsito y otros factores relacionados. Los recursos para la conservación y construcción son asignados en base al rango o categoría de la sección. Los procedimientos de clasificación generalmente asignan las prioridades más altas a aquellas secciones en las peores condiciones, sin considerar la utilidad de los fondos a gastarse. Estos métodos de asignar un rango de importancia son los menos efectivos, pero también son los más sencillos de aplicar.

El modelo de optimización identifica las estrategias de conservación que maximiza los beneficios totales o minimiza los costos totales de la misma sujeto a restricciones como límites al presupuesto y estándares deseados de comportamiento. Las variables de

decisión del modelo determinan que tratamientos son necesarios a ser aplicados a determinadas secciones del pavimento.

Existe un número de herramientos de optimización que están disponibles para determinar la asignación óptima de los fondos monetarios. Sin embargo, existen muchos factores que han impedido el uso de las diferentes metodologías de optimización en la administración de pavimentos. Muchos de los empleados de las agencias se oponen al uso de éstas, porque las técnicas que se usan son complejas y dan respuestas que ellos no pueden comprender rápidamente.

Los métodos de clasificación o de asignar un rango de importancia a las secciones proporcionan soluciones razonablemente buenas y los métodos de optimización seleccionan los mejores. Los métodos de clasificación que más frecuentemente se utilizan son aquellos que se basan en la condición del pavimento, el costo a través del tiempo y la importancia de la pistas, calles de rodaje y plataformas.

Por otro lado, muchos modelos de optimización consideran condiciones futuras del pavimento y la asignación de recursos sobre un periodo de varios años. Por lo tanto, los modelos de predicción de deterioro de pavimentos proporcionan información necesaria a los modelos de optimización de la administración de pavimentos.

Factores utilizados en la clasificación de proyectos

Existen varios modelos para el desarrollo de índices de prioridad. Usualmente son compuestos de varias medidas de condición de sección de pavimentos. Las que se utilizan son:

Deterioro del pavimento.

Rugosidad del pavimento.

Tránsito aéreo.

Factores económicos.

Resistencia al deslizamiento.

Deficiencias geométricas.

Capacidad estructural.

Edad del pavimento.

De los factores mencionados, los más utilizados son el índice de deterioros, la rugosidad y el tránsito que se va presentando.

Funciones objetivo utilizadas en los modelos de optimización

Cada una de las técnicas de programación matemática tiene función objetiva específica. Cuatro categorías de funciones objetivo son empleadas en los modelos de optimización:

Minimización de costos. Cuando varias estrategias de conservación y rehabilitación están disponibles para cada proyecto en el periodo de análisis, las alternativas que satisfagan las restricciones y generen el costo total más bajo son seleccionadas.

Maximización del área bajo la curva de comportamiento. Cuando una estrategia de conservación y rehabilitación es asignada a una sección de pavimento, una curva de comportamiento para esta sección es predecida. El área de esta curva es una medida de efectividad y la combinación óptima de estrategias serán aquellos que maximicen el incremento combinado en el área bajo todas las curvas de comportamiento, mientras que se satisfacen las restricciones de optimización.

Maximización de la efectividad de conservación. Esta es la habilidad de una estrategia de tratamiento para eliminar un tipo de deterioro particular por el mayor tiempo posible. Por ejemplo, en una sección de pavimento en la cual el agrietamiento es un problema, el tratamiento seleccionado será aquel que elimina las grietas del pavimento por la mayor cantidad de tiempo posible.

Las funciones objetivo mayormente utilizadas en la práctica son la minimización de costos y la maximización del área bajo la curva de comportamiento del pavimento.

Los modelos de programación matemática pueden ser aplicados tanto a uno como a varios años. Las opciones que son seleccionadas deben satisfacer la función objetiva específica (por ejemplo la minimización de costos).

Restricciones utilizadas en los modelos de optimización

Las siguientes restricciones son comunmente utilizadas en los modelos de optimización:

Presupuesto. Es el máximo nivel de fondos disponibles en un año o en varios años. La restricción aseguraría que la solución obtenida no rebasaría el presupuesto disponible.

Requerimiento de condición de pavimento mínima. Esta restricción podría ser tanto como un promedio mínimo del desempeño de los elementos de operación terrestre o como un porcentaje máximo de secciones permitidas por abajo del valor mínimo aceptable.

Recursos. Los recursos para la conservación de pavimentos pueden ser clasificados como materiales, equipo o mano de obra. Similarmente como en la restricción al presupuesto, la restricción en recursos no permite que la solución exceda la cantidad de recursos disponibles.

Otros. Existen otras restricciones tales como el número de dias disponibles para realizar actividades de construcción.

El tipo de restricción más utilizada es la del presupuesto, seguida por la de requerimiento de condición de pavimento mínima.

Los modelos de programación matemática pueden ser aplicados para la asignación de recursos de un solo año o de varios años. Estos no indican las prioridades, sino que alternativas son seleccionadas para satisfacer la función objetivo específica.

La metodología de un modelo de programación lineal para la minimización del valor presente de los costos de m proyectos de mejoramiento del pavimento, cada uno con k proyectos alternativos para un periodo de T años, puede ser planteado de la siguiente forma:

Minimizar $$\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{k} \sum_{t=1}^{T} X_{ijt} \, C_{ijt} \qquad \text{(a)}$$

Sujeto a $$\sum_{t=1}^{T} \sum_{j=1}^{k} X_{ijt} \leq 1 \quad \text{para } i = 1, 2, \ldots m, \qquad \text{(b)}$$

$$\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{k} X_{ijt} \; D_{ijt} \leq P_t \quad \text{para } t = 1, 2, \ldots T, \qquad (c)$$

$$X_{ijt} \leq 0$$

Donde,

X_{ijt} = Sección i (de m secciones totales) con la alternativa j (de k tratamientos alternativos) en el año t (de los T años en el periodo de programa).

C_{ijt} = Valor presente de los costos anuales (incluyendo el valor de rescate de la sección i, con la alternativa j, construida en el año t, todo descontado al año base a una determinada tasa de descuento.)

D_{ijt} = Construcción actual y/o costo de conservación de la sección i, con la alternativa j, construida en el año t.

P_t = Presupuesto para el año t.

X_{ijt} es una variable discreta e igual a 1 si un proyecto es seleccionado para la sección i en el año t, e igual a 0 si se trata del otro caso.

La ecuación a es la función objetivo para la minimización de los costos.

La ecuación b establece que una combinación X_{ijt} es única. Esto es, una sección no puede ser seleccionada dos veces durante el periodo de análisis.

La ecuación c representa la restricción del presupuesto de cada año en el periodo del programa, el cual no puede ser excedido. Se establece que la suma de las m secciones totales y de las k alternativas de tratamiento de todos los costos X_{ijt} deben ser menores o iguales a el presupuesto P_t.

En la actualidad, existen diversos programas de computadora para la solución de programas de programación lineal y estos pueden ser utilizados en un sistema de administración de pavimentos.

A continuación se muestra un ejemplo de un planteamiento de programación lineal para m secciones, k tratamientos alternativos y t años de periodo de programa para el pavimento de un aeropuerto:

Tabla 7.3 Expresión de programación lineal

Proyecto	AÑO 1	AÑO 2		AÑO t
	Alternativas	Alternativas		Alternativas
	1 2 3 ... k	1 2 3 ... k		1 2 3 ... k
1	X_{111} X_{121} X_{131} ... X_{1k1}	X_{112} X_{122} X_{132} ... X_{1k2}	. . .	X_{11t} X_{12t} X_{13t} ... X_{1kt}
2	X_{211} X_{221} X_{231} ... X_{2k1}	X_{212} X_{222} X_{232} ... X_{2k2}	. . .	X_{21t} X_{22t} X_{23t} ... X_{2kt}
3	X_{311} X_{321} X_{331} ... X_{3k1}	X_{312} X_{322} X_{332} ... X_{3k2}	. . .	X_{31t} X_{32t} X_{33t} ... X_{3kt}
. . .	. . .	. . .		. . .
M	X_{m11} X_{m21} X_{m31} ... X_{k1}	X_{m12} X_{m22} X_{m32} ... X_{mk2}	. . .	X_{m1t} X_{m2t} X_{m3t} ... X_{mkt}

El análisis de programación lineal puede ser realizado por diferentes programas de software que existen actualmente.

Para ilustrar los resultados que se mostrarían al usuario del SAP a partir del procedimiento anterior, podemos suponer la realización de un análisis para una pista de x miles de metros de longitud de un determinado aeropuerto, dividida en 30 secciones homogéneas, cada una con diferentes longitudes en función del tipo y espesor de pavimento. Para efectos del ejemplo, el periodo de programa sería de 5 años. Asimismo se pueden tener dos alternativas de conservación para cada una de las secciones que ya han sido definidas. Una alternativa puede ser la colocación de una sobrecarpeta de

determinado espesor y determinado costo por metro cuadrado. La otra alternativa sería una reconstrucción de la base y de la superficie de concreto asfáltico del pavimento.

Los resultados que se mostrarían al usuario del sistema podrían aparecer de la siguiente forma:

Tabla 7.4 Resultados del procedimiento

Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
	a) Nivel de presupuesto: $500,000 por año			
07 - R		05 - S	14 – S	04 – S
		13 - R	21 – S	14 – R
		17 - R	22 – S	
			23 – S	
			24 - S	
	b) Nivel de presupuesto: $1,000,000 por año			
07 - R	13 – S	05 - R	04 - R	
	14 – S	17 - R	24 - R	
	15 – S			
	21 – S			
	22 – S			
	23 – S			
	c) Nivel de presupuesto: $2,000,000 por año			
05 - R	13 – R	04 - R		
07 - R	14 – R	23 - R		
	15 – R			
	17 – R			
	21 – R			
	22 – R			
	24 – R			

Donde:

S: Sobrecarpeta

R: Reconstrucción

La resolución del procedimiento mostraría que para un determinado presupuesto, se tendría por ejemplo que la sección número 7 sería candidata a ser reconstruida. En el año 2 no se haría ningún tipo de rehabilitación y en el año 3 la sección 5 se le colocaría una sobrecarpeta. Para ese mismo año, las secciones 13 y la 17 se les haría un trabajo de reconstrucción y así sucesivamente para los siguientes años del programa de periodo.

Con lo anterior descrito, solamente se trataría de mostrar al usuario cuales serían las secciones a recibir cierto tipo de conservación con diferentes tipos de presupuesto.

Antes de la asignación del presupuesto, es obvio que se debio haber conducido el análisis económico por cada año, y por cada combinación de sección o proyecto con las diferentes estrategias de conservación.

CAPÍTULO 8

INVESTIGACIÓN

8. Investigación

El sistema de administración de pavimentos es una herramienta muy útil para proporcionar un plan sistemático de investigación en el mejoramiento continuo del diseño de pavimentos, construcción y tecnología de conservación.

En la actualidad, los parámetros que deben ser considerados en un sistema de administración de pavimentos son muy dependientes de los siguientes aspectos:

1. El modelo utilizado.
2. Experiencia pasada en la cual se pueda basar el conocimiento del comportamiento del pavimento y los factores significativos involucrados.
3. La calidad de la instrumentación o de las técnicas de medición disponibles para determinar los parámetros.
4. La calidad y extensión de la información, así como la base de datos disponible.
5. La variabilidad inherente que gobierna la cantidad de datos requeridos para definir los parámetros adecuadamente.

Estos cinco aspectos constituyen gran parte del problema en el desarrollo para el mejoramiento del sistema de administración de pavimentos.

La intención de aislar los varios subsistemas o factores en la administración de pavimentos para poder identificar las necesidades de investigación puede guiarnos a resultados erróneos. Por ejemplo, el tratar de modelar solamente el efecto del medio ambiente sobre el deterioro del pavimento estaría incompleto porque siempre habría una interacción del medio con las aplicaciones de carga de los trenes de aterrizaje de las aeronaves.

Otro ejemplo de subdividir el problema ha sido el de aproximar el desarrollo del diseño y otros métodos para usos inmediatos por una parte del organismo mientras que otra parte, usualmente en la sección de investigación, están tratando de resolver el problema en términos de teorías sofisticadas para dar respuestas perfectas. Si éstas teorías ignoran de lo que actualmente es utilizado, el esfuerzo es inútil y no nos guiará a un método eficiente y económico.

Los esfuerzos de la investigación deben tener un impacto importante en la tecnología del proceso de la administración de pavimentos, particularmente en relación con los siguientes factores:

1. Adquisición de datos de campo (mejoramiento en los métodos de prueba, procesamiento de datos e interpretación de los mismos)
2. Predicción del comportamiento (mejoramientos substanciales en la modelación del deterioro).
3. Opciones de conservación:
   a) Materiales (mejores métodos de evaluación)
   b) Tratamientos.

La ejecución más apropiada de los resultados de cualquier investigación, es cuando la investigación es formulada en primer término. También es conveniente tener personal específicamente encargado en la puesta en práctica de los resultados, aun dentro del equipo encargado del sistema de administración de pavimentos. Sin embargo, el personal del equipo de ejecución debe trabajar en forma cercana con el equipo de investigación y con el equipo de operación del sistema de administración; asimismo el equipo de ejecución no tendrá éxito si trabaja independientemente de los otros equipos. Este equipo será responsable de preparar los manuales necesarios, documentos y demás formas para poner en práctica los resultados obtenidos de la investigación.

Por lo tanto, el sistema de administración de pavimentos proporciona la estructura organizacional requerida, tanto para definir las necesidades de investigación como para proveer un mecanismo para implementar los resultados de la investigación.

En un sentido más general, la investigación constituye el punto básico de los problemas para lograr nuevos o mejores procesos, materiales, métodos, procedimientos, decisiones, y economía.

8.1 Principales elementos para llevar a cabo una investigación

La iniciación, desarrollo y ejecución de la investigación actual, se resume en la siguiente figura.

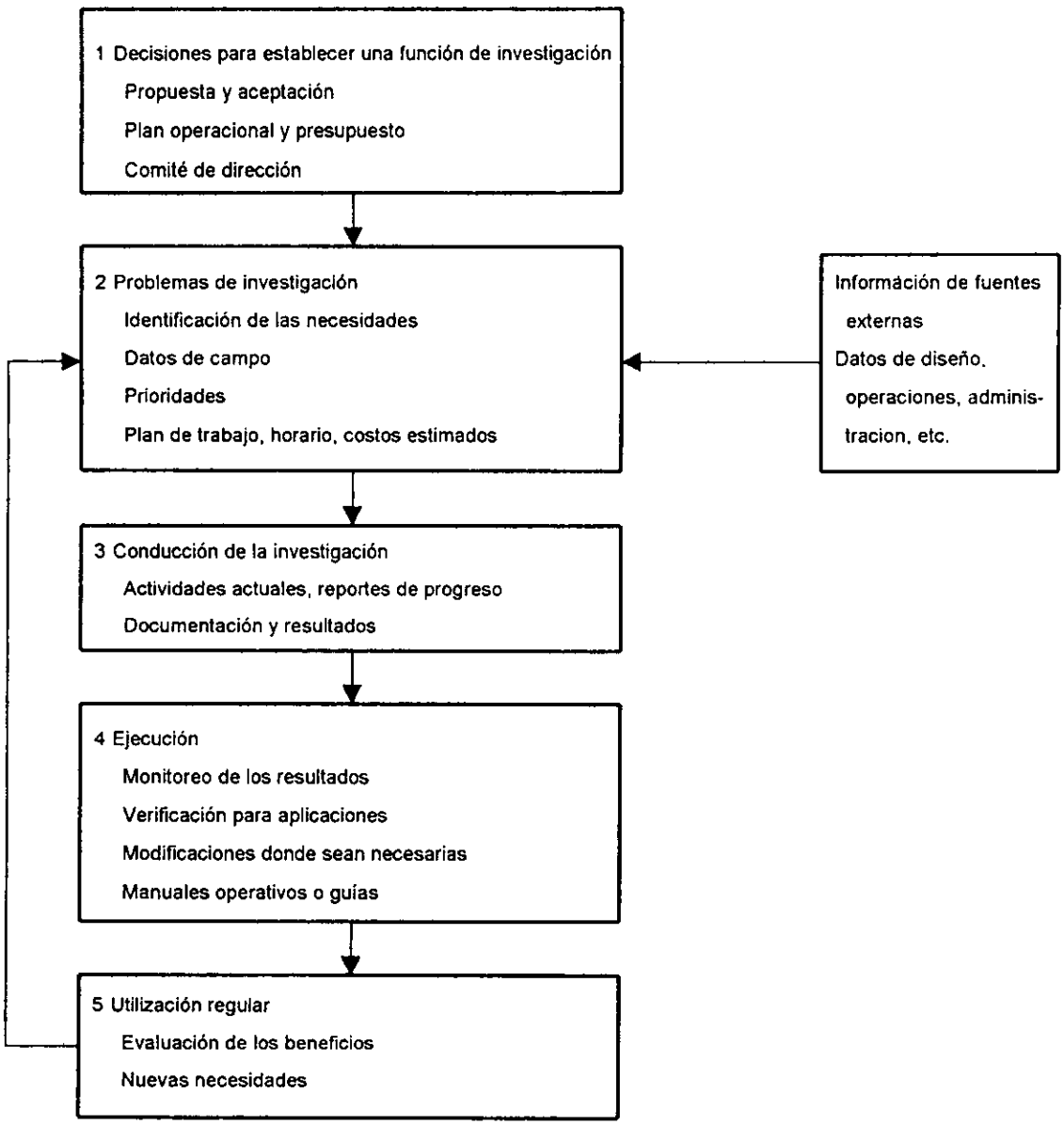

Figura 8.1 Principales elementos para llevar a cabo una investigación

El progreso que se tiene en la figura anterior empieza con una decisión para desarrollar una función de investigación o programa, y continua adelante para identificar problemas, conducir, e implementar la investigación.

Decisión para establecer una función de investigación.

La decisión básica para establecer una función de investigación empezaría con la propuesta que se le haría al director administrativo por parte de alguien dentro o fuera de la agencia. Dicha propuesta incluiría un plan operativo y de presupuesto, asi como también la designación de un comité de dirección y de coordinación.

El plan de investigación podría ser actualizado periodicamente al mismo tiempo que la investigación es conducida.

Problemas de investigación

Las exposiciones de los problemas de investigación algunas veces reflejan los intereses de los investigadores más que las necesidades actuales de la agencia u organismo. Por lo tanto, debe de haber una fuerte información del personal de operaciones, incluyendo a aquellos que se encuentran en el campo, para la identificación de las necesidades. Adicionalmente, los resultados de investigación y demás información que proviene fuera de la agencia u organismo pueden ser utilizados como una guía para el desarrollo de un programa de investigación.

Como muchos de los resultados de la investigación eventualmente encontrarán su camino en el campo de la aplicación, es importante que los datos obtenidos de campo sean utilizados para identificar las necesidades de investigación y para la evaluación de los resultados cuando los mismos sean aplicados. Sin embargo, debido a la naturaleza diaria de este trabajo, el personal de campo no siempre puede estar al tanto de las necesidades o de las implicaciones de ciertos esfuerzos de investigación. Por lo tanto, el personal de investigación debe realizar esfuerzos extras para comunicar y justificar sus propuestas. Hay que señalar que el personal de campo frecuentemente resuelve problemas en base a mejores métodos de construcción o conservación, nuevo equipo y mejor uso de los materiales. La función de investigación puede asistir con la documentación de estas soluciones. Un plan de trabajo bien desarrollado, programa y estimaciones de costos son esenciales para la conducción de cualquier investigación exitosa.

Conducción de la investigación

Las actividades de investigación actuales presumiblemente seguirían el plan de trabajo previamente establecido. Los resultados de las actividades de cualquier investigación deben ser bien documentados, en la forma de reportes, guías, programas de computadora y manuales del usuario. Los reportes de progreso que se realicen durante la conducción de la investigación son útiles tanto para propósitos administrativos como técnicos.

Asimismo, los reportes de progreso de la investigación son muy útiles para los mismos investigadores, ya que pueden lograr forzar una disciplina interna en relación con el programa, distribución de tareas, documentación y comunicación de resultados.

Hay que mencionar que para grupos operadores de aeropuertos no muy grandes, las actividades de investigación pueden consistir en la evaluación del trabajo realizado por otros grupos para la aplicación potencial en sus necesidades.

Ejecución

El primer paso que se tiene que dar en la ejecución de los resultados de la investigación usualmente consiste en hacer una serie de estudios piloto. Esto puede servir no solamente para verificar la aplicabilidad de los resultados, sino también para realizar cualquier modificación que sea necesaria. Como ya se ha dicho anteriormente, la ejecución debe ser un esfuerzo entre el personal de investigación y operación.

Utilización regular.

En esta etapa se puede realizar una evaluación de los beneficios, y esta debe incluir, de ser posible, valores monetarios; sin embargo, el beneficio que se obtiene es difícil de cuantificar y por lo tanto es usualmente necesario elaborar evaluaciones subjetivas. La evaluación de los beneficios de la investigación puede ser muy útil como retroalimentador para actualizar las necesidades de investigación.

Por otro lado, la forma en que se desarrolle el trabajo de investigación estará en función del tamaño, recursos y necesidades del grupo u organismo. En el caso de grupos pequeños, sería conveniente contratar los servicios de un instituto de investigación o de

una empresa de consultoría para que realice investigación en problemas específicos. Para grupos más grandes, es deseable realizar algún tipo de balance de la investigación que se hace tanto dentro del grupo como la que se contrata fuera de este. Las ventajas de contratar la investigación incluyen la aceleración en la realización de los proyectos, y el tener un grado de objetividad que no siempre puede existir dentro del grupo. Por otra parte, la investigación que se hace dentro del grupo puede proporcionar una función de entrenamiento valiosa en el personal, hacer más fácil la puesta en práctica de los resultados y ser más sensible a las necesidades especiales del organismo. Asimismo, los grupos grandes e importantes tienen un grado de responsabilidad para la conducción de investigación, que puede ser utilizada por organismos más pequeños dentro de sus regiones.

La buena investigación produce innovaciones y estas ahorran dinero a los grupos operadores. La investigación en la administración de pavimentos en las pasadas dos décadas ha sido enfocada principalmente en las necesidades de corto plazo. La falta de soporte para los esfuerzos de mediano y largo plazo desafortunadamente deja muchos problemas sin resolver, tal como una carencia para realizar buenos modelos de predicción del comportamiento a largo plazo de los pavimentos.

La administración de pavimentos en general ha progresado a partir de un concepto en los años sesentas hasta un grado significativo de ejecución en los ochentas y noventas. Los principios han sido formulados y mucho se ha aprendido de la experiencia de la ejecución. Sin embargo, es necesario una substancial cantidad de innovación si queremos realizar un proceso de administración de pavimentos estandarizado que tenga una aplicabilidad universal.

Para lo anterior, es necesario promover la investigación y las innovaciones necesarias para mejorar la administración de pavimentos. Es decir, la perspectiva es la de dirigir la evolución futura de la investigación de pavimentos para complementar la tecnología de los sistemas de administración. Se necesita realizar investigaciones para mejorar la predicción del comportamiento de pavimentos, materiales, construcción y tecnología de la conservación, buenas bases de datos, reducción en los costos de operación de las aeronaves y mejor recopilación de los pesos por pierna de los aviones.

Lo que frecuentemente ha faltado en un organismo es una revisión de lo que es realmente requerido para lograr un exitoso programa de investigación y por supuesto, los beneficios asociados a largo plazo.

Para lograr un exitoso programa, se deben incorporar los siguientes principales cuatro tipos de investigación:

1. Desarrollo de soluciones para problemas de corto plazo.
2. Investigación de mediano plazo y desarrollo.
3. Estrategia o investigación a largo plazo.
4. Ejecución, incluyendo transferencia de tecnología y el desarrollo de capacidades de investigación.

Como ya hemos dicho anteriormente, el énfasis en la investigación de pavimentos en las pasadas décadas se ha centrado en periodos de corto plazo.

Por último, hay que mencionar la capacidad de investigación reside en las universidades, institutos, consultorías y grupos de investigación a nivel federal y estatal. Mientras que mucha de esta capacidad ha sido adquirida en el trabajo, las fuentes básicas residen en las universidades. Muchas personas que se encuentran en la investigación de pavimentos tienen grados de maestría o doctorado en donde aprendieron los conceptos básicos que son requeridos para una buena investigación. Es esencial que exista una continua regeneración de la capacidad de investigación, con las universidades desempeñando una parte integral importante, y que exista una fuerte interacción entre los sectores público, privado y las universidades.

8.2 Evolución de la administración de pavimentos

La evolución del proceso en la administración de pavimentos proporciona un buen contexto para la identificación de oportunidades para la innovación y principales avances en la tecnología. Se puede asumir que el proceso en si no cambiará sustancialmente por lo menos hasta dentro de diez años, por dos principales razones:

1. La experiencia que se ha tenido en la implementación ha demostrado que el SAP es aceptable en su forma presente para la mayoría de los organismos; más aún, es necesario un periodo de tiempo para la consolidación y por el gran número de organismos y agencias que requieren instalar sus sistemas.

2. El mayor empuje que se necesita realizar es el mejoramiento de la tecnología dentro del proceso, más que el proceso en sí. La investigación es necesaria en el proceso de la administración de pavimentos.

Las cuatro áreas importantes de oportunidad que existen en la tecnología del sistema de administración de pavimentos son las siguientes:

1. Mejoramientos progresivos en la tecnología.
2. Desarrollo de nuevos equipos y métodos y su automatización.
3. Aplicación de nuevas tecnologías.
4. Diseño, construcción y conservación de pavimentos que tengan garantizado un buen comportamiento a largo plazo.

8.3 Temas de investigación para llevar a cabo en aeropuertos

Un ejemplo de cual puede ser un proyecto de investigación es la utilización de pavimentos "Open Graded". Esta estructura consiste de una granulometría uniforme en la que casi no hay finos. Esto los hace permeables y de esta forma se evita el posible encharcamiento en la superficie del pavimento. Este tipo de estructuras se ha venido utilizando en carreteras pero hasta el momento nunca en aeropuertos de nuestro país. Para probar su uso en aeropuertos, se puede hacer un programa piloto en el que se construya una sección de pavimento "Open Graded" en una calle de rodaje o pista y empezar a monitorear su comportamiento. El principal obstáculo por la que los directivos de los aeropuertos se oponen a utilizar una estructura de esta naturaleza es porque su valor estructural se reduce mucho al tener un alto contenido de vacíos. Asimismo, se dice que tampoco posee una gran resistencia para soportar los grandes esfuerzos tangenciales que se presentan tanto en los aterrizajes como en los despegues de los aviones. Sin embargo, uno de los propósitos de la investigación es conocer como está comportándose la estructura ante esfuerzos reales para poder confirmar si puede o no resistir las cargas a las que se le está sometiendo.

Otro campo de investigación es el mejoramiento en la adquisición de datos de campo y la predicción en el comportamiento de los pavimentos. Un mejor entendimiento del comportamiento de los pavimentos para aeropuertos bajo condiciones operacionales, constituye uno de los elementos críticos en el desarrollo del mejoramiento de las

metodologías de diseño, en la utilización de nuevos materiales para pavimentos, en la aplicación de técnicas avanzadas de construcción, y mejores procedimientos de construcción.

Para estudiar la respuesta y el comportamiento que tienen los pavimentos bajo condiciones normales de operación, sería necesario instrumentar algunas secciones de pavimento ya sea de una pista, calle de rodaje o plataforma, colocando varios sensores en las varias capas que constituyen la estructura del pavimento cuando estas se encuentren en construcción. Para esto es necesario instalar un elaborado sistema de adquisición de datos para la captura de la información de comportamiento de la estructura del pavimento.

Dentro de la captura de datos se debe incluir respuestas en tiempo real del pavimento del tránsito aéreo actual y condiciones del medio ambiente. Se deberán conducir periódicamente pruebas FWD (Falling Way Deflectometer) para las inspecciones que se tengan que hacer al pavimento. Para esto se tendrá que utilizar una adecuada base de datos para el almacenamiento de los mismos. Con los datos obtenidos del anterior procedimiento se pueden perfeccionar los modelos de predicción del comportamiento de los pavimentos.

CONCLUSIONES

Conclusiones

Con este trabajo se pretendió dar una visión general de como debe funcionar un sistema de administración de pavimentos aplicado a los aeropuertos. También se trató de establecer cuales son los elementos necesarios a tomar en cuenta para establecer el sistema mencionado.

No se profundizó en cada uno de las partes que componen a un sistema de administración para aeropuertos, sino que el objetivo fue el resaltar que cada una de esas partes es fundamental para el buen funcionamiento del sistema y que sin la sola existencia de alguna de ellas no se podría aplicar con éxito el mencionado sistema.

Sin embargo, se hace énfasis en la importancia de tener una base de datos centralizada y actualizada, ya que es fundamental para que los demás elementos del sistema de administración funcionen e interactuen adecuadamente entre sí. De esta forma se trata de lograr el que todos los elementos del sistema funcionen armoniosamente y que se cumpla con los objetivos prefijados, y no que solamente una de sus partes funcione en forma adecuada en detrimento de las demás partes restantes.

Para la captura de datos se enfatiza la necesidad de realizar una evaluación técnica para poder determinar el estado actual de una determinada sección de pavimento, para un momento dado. Estos métodos tiene como propósito el de completar la estructura del pavimento de la sección, tanto a nivel superficial como en profundidad, para ofrecer un servicio adecuado en todo momento. En aeropuertos es mucho más fácil recopilar y actualizar información existente de los elementos de operación terrestre, ya que los mismos contienen menores cantidades de secciones que lo que tendría una red de carreteras. Esto tiene como ventaja que la información que se capture y se actualice estará en forma más completa y detallada.

Cabe mencionar la importancia que tiene el poder comunicar la información de la estrategia de diseño al personal de construcción y conservación. Esta comunicación no deja de ser importante para el mejoramiento de la coordinación y eventualmente de la eficiencia del sistema de administración de pavimentos.

En lo referente a conservación de pavimentos se quiso hacer ver que un supuesto ahorro aplicando acciones de conservación baratas, que no atacan los problemas de raíz, ocasionaría un costo adicional de operación para las aerolíneas al usar pavimentos que rápidamente alcanzarían índices de perfil bajos (altas rugosidades). Conviene entonces,

en términos generales, aplicar diseños con periodos útiles prolongados cada vez que sea posible.

En el aspecto del módulo económico, se recalcó la importancia de saber los costos de operación de las aeronaves cuando se encuentren operando en el aeropuerto. Si no se toman en cuenta los costos de operación, no se podrá cuantificar con certeza los beneficios que se puedan obtener de las diferentes opciones. No obstante de que en México no se ha realizado un estudio para relacionar los costos de operación con el estado actual que presentan los pavimentos, de los elementos que conforman un aeropuerto, en este trabajo se propuso como pueden ser obtenidos esos costos a partir de los datos de mantenimiento que se les da a las aeronaves, tomando en cuenta las diferentes etapas de servicio que se da en un ciclo vehicular y relacionando los costos obtenidos con el estado en que se encuentre la estructura del pavimento.

Por otra parte, una vez elegido y aplicado el método de evaluación económica más conveniente para las distintas opciones, se realiza la asignación presupuestal. En México y en otras partes del mundo, todavía se sigue utilizando el asignar aquellos recursos a las secciones que se encuentran en peor estado, sin considerar con mucho cuidado la utilidad de los fondos a gastarse, en lugar de identificar las estrategias de conservación y rehabilitación que maximicen los beneficios totales o minimicen los costos totales sujeto a diferentes restricciones.

En lo referente a investigación, el sistema de administración de pavimentos posee la estructura organizacional adecuada que lograría la interacción entre las distintas áreas del organismo operador del aeropuerto con los responsables de la investigación y de esta forma se lograría poner en práctica los resultados de las investigaciones. Por lo tanto, el sistema de administración de pavimentos proporciona la estructura para definir tanto las necesidades de investigación como el de proveer un mecanismo para la puesta en práctica de los resultados de las investigaciones. Es claro que hace falta realizar investigación sobre pavimentos de aeropuertos en nuestro país. Por lo general los ingenieros mexicanos adaptan a nuestras condiciones los resultados de investigación realizadas en países desarrollados, principalmente de Estados Unidos, pero aún así, dichas adaptaciones no son de lo más precisas cuando se aplican en nuestro país.

El uso del SAP fortalece el rol del tomador de decisiones. Este sistema no toma por si solas las decisiones sino que procesa la información en función con un preseleccionado

conjunto de modelos. Por lo tanto, esto proporciona una eficiente herramienta para organizar y procesar información que expande el campo del tomador de decisiones.

Para finalizar, hay que mencionar que cada uno de las partes que conforman el SAP para aeropuertos y que fueron tratados de manera resumida en el presente trabajo, deben ser objeto de otros trabajos más minuciosos que permitan finalmente integrar todo el sistema.

Referencias

1. Modern Pavement Management. Ralph Haas, W. Ronald Hudsun and John Zaniewski. 1994
2. Ingeniería de aeropuertos. Módulo planificación. Secretaría de Comunicaciones y Transportes y Universidad Nacional Autónima de México. 1986
3. Ingeniería de aeropuertos. Módulo proyecto. Secretaría de Comunicaciones y Transportes y Universidad Nacional Autónoma de México. 1986
4. Ingeniería de aeropuertos. Módulo construcción. Secretaría de Comunicaciones y Transportes y Universidad Nacional Autónoma de México. 1986
5. Planning and Design of Airports. Robert Horonjeff and Francis X. McKelvey. McGraw Hill. 1986
6. Airport Engineering. Ashford and Wright. Wiley – Interscience publication, 1992
7. Transportation Research Record No. 1508. 1995
8. Módulo técnico del sistema mexicano para la administración de los pavimentos. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
9. Módulo geográfico del sistema mexicano para la administración de pavimentos. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
10. Standard Test Method for Airport Pavement Condition Surveys. ASTM Designation: D5340 - 93