



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARPETA DE RODADURA
DE LA PISTA PRINCIPAL DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL
DE GUATEMALA LA AURORA**

**XIOMARA SAPÓN ROLDÁN
ASESORADA POR ING. AUGUSTO RENÉ PÉREZ MÉNDEZ**

GUATEMALA , FEBRERO DE 2004.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARPETA DE RODADURA
DE LA PISTA PRINCIPAL DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL
DE GUATEMALA LA AURORA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

XIOMARA SAPÓN ROLDÁN
ASESORADA POR ING. AUGUSTO RENÉ PÉREZ MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2004.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympos Paíz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahan Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Francisco Guillermo Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Rolando Vargas Oliva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los requisitos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CARPETA DE RODADURA
DE LA PISTA PRINCIPAL DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL
DE GUATEMALA LA AURORA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 17 de septiembre de 2002.

Xiomara Sapón Roldán

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Augusto René Pérez Méndez, asesor de esta investigación, por su apoyo durante esta investigación y sus valiosos consejos para mi formación como profesional.

Al las autoridades de la Dirección General de Aeronáutica Civil, DGAC., especialmente al Ingeniero Ronald Marín, Jefe de Infraestructura, Sr. Roderico Robles Jefe de Mantenimiento del Aeropuerto La Aurora, por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación.

Al personal de Pavimentos de Guatemala, PADEGUA, especialmente Ing. Luis Rocco, Ing. Luis Estévez, Ing. Hugo Rodríguez, Ing. Marco Antonio Cornejo, por facilitar los medios para la realización de los muestreos y ensayos de laboratorio realizados durante la investigación.

Al Sr. Carlos Ovalle Jefe de Laboratorio de PADEGUA, por transmitirme sus conocimientos, sin reserva alguna.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería y Escuela de Ingeniería Civil.

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

Reconociendo que toda sabiduría e inteligencia provienen de Él.

MIS PADRES

Clara O. Roldán de Sapón

Enrique Adrián Sapón Poncio

Por su amor y dedicación, que ésta sea una pequeña muestra de mi agradecimiento.

MIS HERMANOS

Como una muestra de mi cariño.

MI ABUELITA

Juanita Vda. De Sapón

Por haber sido un ejemplo en mi vida.

FAMILIA

Tíos, primos, Sapón Velásquez, por su apoyo incondicional.

MIS AMIGOS

Por compartir una de mis metas.

A

Gabriel Alejandro Guzmán Salán.

Porque siempre estará presente en mis recuerdos y en mis metas.

Leonardo Martínez Lecaros.

Por su cariño y apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVI
1. GENERALIDADES SOBRE AEROPUERTOS.....	1
1.1 Elementos de un aeropuerto.....	1
1.1.1 Elementos lado terrestre.....	1
1.1.1.1 Carretera primaria de acceso.....	2
1.1.1.2 Carretera de acceso al área terminal.....	2
1.1.1.3 Carretera frente a la terminal.....	3
1.1.1.4 Carreteras de servicio.....	3
1.1.1.5 Estacionamiento público.....	4
1.1.2 Edificios terminales.....	4
1.1.2.1 Edificio terminal de pasajeros.....	6
1.1.2.2 Edificio terminal de carga.....	6
1.1.3 Elementos lado aéreo.....	6
1.1.3.1 Pistas de aterrizaje y despegue.....	6
1.1.3.1.1 Orientación de las pistas.....	7
1.1.3.1.2 Longitud de las pistas.....	7
1.1.3.1.3 Zona de seguridad en las pistas.....	9

1.1.3.1.4	Pendientes de pistas.....	9
1.1.3.2	Plataformas de estacionamiento para aeronaves.....	10
1.1.3.3	Pistas de rodaje.....	11
1.1.3.4	Torres de control.....	11
1.2.	Normas nacionales para aeropuertos.....	12
1.2.1.	Ley de aviación civil Guatemala.....	13
1.3.	Características aeropuerto internacional de Guatemala “La Aurora”.....	14
1.3.1	Elementos lado terrestre.....	15
1.3.1.1	Terminales.....	15
1.3.2	Elementos lado aéreo.....	16
2.	PAVIMENTOS EN AEROPUERTOS.....	19
2.1.	Parámetros por considerar para el diseño de pavimentos por el método de la Agencia Federal de Aviación FAA.....	20
2.1.1	Aeronave de diseño.....	20
2.1.2	Peso máximo aeronave de diseño.....	21
2.1.3	Salidas anuales equivalentes aeronave de diseño.....	21
2.1.4	Índice de penetración de california CBR.....	21
2.2.	Diseño de pavimentos flexibles.....	22
2.2.1.	Estructura de los pavimentos flexibles.....	23
2.2.1.1	Subrasante.....	23
2.2.1.2	Sub-base.....	23
2.2.1.3	Base.....	24
2.2.1.3.1	Áreas críticas.....	24
2.2.1.4	Carpeta de rodadura.....	25
2.2.2	Procedimiento de diseño.....	25
2.3	Diseño de pavimentos rígidos en aeropuertos.....	27

2.3.1	Procedimiento de diseño.....	28
2.4	Carpetas asfálticas.....	30
2.5	Tipos de asfalto.....	30
2.5.1	Asfaltos líquidos de fraguado lento.....	31
2.5.2	Asfaltos líquidos de fraguado medio.....	31
2.5.3	Asfaltos líquidos de fraguado rápido.....	31
2.5.4	Emulsiones asfálticas.....	32
2.5.5	Cementos asfálticos.....	32
2.6	Propiedades físicas del asfalto.....	32
2.6.1	Durabilidad.....	32
2.6.2	Endurecimiento y envejecimiento.....	33
2.6.3	Susceptibilidad a la temperatura.....	33
2.6.4	Densidad.....	34
2.6.5	Adherencia.....	34
2.6.6	Cohesión.....	35
2.7	Fallas en pavimentos asfálticos.....	35
2.7.1	Deformaciones superficiales de pavimentos asfálticos.....	36
2.7.1.1	Ahuellamiento.....	36
2.7.1.1.1	Posibles causas.....	36
2.7.1.2	Corrimiento.....	37
2.7.1.2.1	Posibles causas.....	37
2.7.1.3	Corrugación.....	37
2.7.1.3.1	Posibles causas.....	38
2.7.1.4	Hinchamiento.....	38
2.7.1.4.1	Posibles causas.....	38
2.7.1.5	Hundimiento.....	38
2.7.1.5.1	Posibles causas.....	38
2.7.2	Fisuras y grietas.....	40
2.7.2.1	Fisuras piel de cocodrilo.....	40
2.7.2.1.1	Posibles causas.....	40

2.7.2.2	Fisuras en bloque.....	41
2.7.2.2.1	Posibles causas.....	41
2.7.2.3	Fisuras en arco.....	41
2.7.2.3.1	Posibles causas.....	42
2.7.2.4	Fisura transversal.....	42
2.7.2.4.1	Posibles causas.....	42
2.7.2.5	Fisura longitudinal.....	43
2.7.2.5.1	Posibles causas.....	43
2.7.2.6	Fisura por reflexión de junta.....	43
2.7.2.6.1	Posibles causas.....	44
2.7.3	Desintegración en los pavimentos asfálticos.....	46
2.7.3.1	Baches.....	46
2.7.3.1.1	Posibles causas.....	46
2.7.3.2	Peladura.....	46
2.7.3.2.1	Posibles causas.....	47
2.7.3.3	Desintegración de bordes.....	47
2.7.3.3.1	Posibles causas.....	47
2.7.4	Otros deterioros en los pavimentos asfálticos.....	49
2.7.4.1	Exudación del asfalto.....	49
2.7.4.1.1	Posibles causas.....	49
2.7.4.2	Parchados y reparaciones de servicios públicos.....	49
3.	EVALUACIÓN SUPERFICIAL CARPETA DE RODADURA, PISTA PRINCIPAL AEROPUERTO LA AURORA.....	51
3.1.	Evaluación funcional.....	52
3.1.1	Inspección de calzada.....	52
3.1.1.1	Geometría.....	52
3.1.1.2	Drenajes.....	53
3.1.1.2.1	Drenajes de aguas negras.....	53

3.1.1.2.2	Drenajes de aguas lluvias.....	53
3.1.1.3	Daños en la calzada.....	53
3.1.2	Identificación y descripción de fallas visibles.....	54
3.2.	Diagnóstico evaluación funcional.....	58

4.	EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CARPETA DE RODADURA, PISTA PRINCIPAL AEROPUERTO “LA AURORA”.....	59
4.1.	Método Marshall para diseño de mezclas asfálticas.....	59
4.2.	Descripción método Marshall de diseño de mezclas.....	60
4.3.	Probetas del ensayo Marshall.....	60
4.3.1.	Determinación del peso específico total.....	61
4.3.2.	Ensayos de estabilidad y fluencia.....	61
4.3.2.1	Estabilidad Marshall.....	61
4.3.2.2	Fluencia Marshall.....	62
4.3.3.	Análisis de densidad y vacíos.....	63
4.3.3.1	Análisis de vacíos.....	63
4.3.3.2	Análisis de peso unitario.....	63
4.3.3.3	Análisis de vacíos en el agregado mineral.....	63
4.3.3.4	Análisis de vacíos llenos de asfalto.....	64
4.3.4.	Determinación del contenido óptimo de asfalto.....	64
4.4.	Ensayo por método Marshall aplicado a la carpeta de rodadura del aeropuerto “ La Aurora ”.....	68
4.4.1	Investigación de campo.....	68
4.4.2	Descripción de ensayos.....	69
4.4.2.1	Porcentaje residual de asfalto.....	69
4.4.2.2	Granulometría de la mezcla.....	69
4.4.2.3	Estabilidad y fluencia Marshall.....	70

4.4.2.4	Densidad.....	71
4.4.3	Resultados obtenidos.....	71
4.4.3.1	Porcentaje residual de asfalto.....	72
4.4.3.2	Granulometría.....	74
4.4.3.3	Estabilidad y fluencia Marshall.....	77
4.4.3.4	Densidad de la carpeta asfáltica.....	78
4.4.4	Análisis de los resultados.....	80
4.4.4.1	Porcentaje residual de asfalto.....	80
4.4.4.2	Granulometría de la mezcla.....	80
4.4.4.3	Estabilidad y fluencia Marshall.....	81
4.4.4.4	Densidad.....	82
4.5	Diagnóstico.....	83
5.	ALTERNATIVAS DE RESTAURACIÓN PARA LA CARPETA DE RODADURA.....	85
5.1.	Tratamientos asfálticos superficiales.....	85
5.1.1.	Mortero asfáltico.....	86
5.1.2.	Mortero asfáltico modificado con polímeros.....	86
5.1.3.	Micro-pavimento.....	86
5.1.3.1.	Tratamiento superficial con micro-pavimento.....	87
5.1.3.1.1	Materiales.....	88
5.1.3.1.1.1	Agregados.....	88
5.1.3.1.1.2	Emulsión asfáltica.....	90
5.1.3.1.1.3	Relleno mineral.....	92
5.1.3.1.1.4	Polímeros.....	92
5.1.3.1.1.5	Agua.....	93

5.1.3.1.1.6	Aditivos de control de ruptura en campo....	93
5.1.3.2.	Parámetros de dosificación de la mezcla.....	94
5.1.3.2.1	Tolerancia.....	95
5.1.3.2.2	Requerimientos técnicos.....	95
5.1.3.3.	Aplicación de micro-pavimentos.....	96
5.1.3.4.	Fallas en la aplicación de micro-pavimentos.....	98
5.1.3.4.1	Calidad de los agregados.....	98
5.1.3.4.2	Condiciones climatológicas.....	99
5.1.3.4.3	Diferencias de tonalidades en el mortero.....	99
5.1.3.4.4	Rompimiento del material pétreo.....	100
5.1.3.4.5	Formación de burbujas en la superficie.....	100
5.1.3.4.6	Desprendimiento de material pétreo.....	100
5.1.3.4.7	Lavado total o parcial de la superficie.....	101
5.1.3.4.8	Rayado de una superficie recién tendida.....	101
5.1.3.4.9	Presencia de corrimientos en la superficie.....	102
5.1.3.4.10	Rayado fino y uniforme.....	102
5.1.3.4.11	Exceso de derrames laterales.....	102
5.1.3.4.12	Aparecimiento de huellas de automóvil.....	102
5.1.3.4.13	Desprendimiento del tratamiento.....	103
5.1.3.4.14	Falta de uniformidad.....	103
5.1.3.4.15	Deformaciones y partículas expuestas.....	103
5.1.3.4.16	Aparición de arcilla.....	104
5.1.3.4.17	Mortero con superficie abierta.....	104
6.	MEDIDAS DE CONSERVACIÓN RUTINARIA PARA CARPETAS ASFÁLTICAS.....	105
6.1.	Factores que influyen en el deterioro de los pavimentos.....	105
6.2.	Tipos de mantenimiento.....	106
6.2.1.	Mantenimiento rutinario.....	106

6.2.2.	Mantenimiento periódico.....	107
6.3.	Planificación del mantenimiento.....	107
6.4.	Identificación de los daños.....	108
6.5.	Determinación de las causas de las fallas, antes de su desarrollo y reparación	109
6.6.	Definición de alternativas de mantenimiento de los pavimentos, en relación con los daños encontrados	109
6.7.	Estrategias de mantenimiento en función del tipo de fallas y sus respectivas severidades.....	111
CONCLUSIONES.....		119
RECOMENDACIONES.....		121
BIBLIOGRAFÍA.....		123
APÉNDICE		
	Reporte de laboratorio para control de mezcla de la muestra sur 01.....	124
	Reporte de laboratorio para control de mezcla de la muestra norte 1.9.....	126

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva de diseño de pavimento flexible	26
2.	Curva de diseño de pavimento rígido	28
3.	Pérdida de finos	55
4.	Desprendimiento de agregados	55
5.	Baches	56
6.	Fisura longitudinal	56
7.	Fisura transversal	57
8.	Fisura piel de cocodrilo	57
9.	Equipo para estabilidad de Marshall	62
10.	Gráfico granulométrico carpeta asfáltica aeropuerto (muestra sur 01)	74
11.	Gráfico granulométrico carpeta asfáltica aeropuerto (muestra norte 1.9)	75
12.	Planta pista de aterrizaje y despegue del aeropuerto Internacional La Aurora	128

TABLAS

I.	Distribución de áreas en la terminal de pasajeros	5
II.	Sistema de codificación de referencia de aeropuerto FAA	9
III.	Dimensiones pista aeropuerto La Aurora	16
IV.	Aeronaves que operan en el aeropuerto la aurora	17
V.	Niveles de severidad de deformaciones superficiales	39
VI.	Niveles de severidad, fisuras y grietas	45
VII.	Niveles de severidad de desintegración	48
VIII.	Niveles de severidad, otros deterioros	50
IX.	Criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall	66
X.	Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA)	67
XI.	Graduación muestra sur 01	74
XII.	Graduación muestra norte 1.9	75
XIII.	Composición de mezclas tipo IV, Instituto del Asfalto	76
XIV.	Estabilidad Marshall muestra sur 01	77
XV.	Estabilidad Marshall muestra norte 1.9	77
XVI.	Volumen y tipo de tráfico	87
XVII.	Granulometría ISSA de los agregados	89
XVIII.	Requerimientos para agregados	90
XIX.	Estrategias de mantenimiento en función del tipo de fallas y de sus respectivas severidades	112

GLOSARIO

Emulsión asfáltica aniónica	Emulsión asfáltica, en la cual las partículas de asfalto poseen carga negativa.
Emulsión asfáltica catiónica	Emulsión asfáltica, cuyas partículas asfálticas poseen carga positiva.
Ligante	Término general para el cemento asfáltico, el cual incluye asfalto o bitumen, hulla asfáltica o asfaltos modificados con polímero.
Riego de liga	Aplicación de asfalto líquido de baja viscosidad o emulsión, entre capas de materiales asfálticos, para prevenir su deslizamiento y/o desprendimiento.
Tensión interfacial	Fuerza que actúa a 90° en una línea de la fase intermedia experimentada por moléculas como resultado de un desbalance de fuerzas de atracción de dos fases. La tensión interfacial y la energía libre interfacial son medidas del trabajo requerido para incrementar el área interfacial.
Tratamiento superficial	Terminología para riego de asfalto líquido, seguido por una aplicación con agregados de cierta granulometría.

Aeródromo

Campo destinado al aterrizaje y despegue de los aviones.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre el conjunto de elementos que forman un aeropuerto, el cual para facilitar su estudio es posible clasificarlo en tres grupos: lado terrestre, terminales y lado aéreo. La pista de aterrizaje y despegue de un aeropuerto se considera el elemento principal del mismo y es clasificada dentro del lado aéreo. Considerando su importancia, la pista de aterrizaje y despegue del aeropuerto internacional La Aurora ha sido objeto de una evaluación superficial y estructural durante esta investigación.

La determinación de la condición o estado superficial de la carpeta de rodadura se basa en la evaluación funcional de la misma, que es la que interesa a los usuarios. Como resultado de éste tipo de evaluación, es posible detectar inicio de fallas, determinar sus posibles causas, así como establecer zonas prioritarias de conservación. Las fallas localizadas en la carpeta de rodadura de la pista del aeropuerto La Aurora, corresponden a pérdida de finos, desprendimiento de agregados, baches, fisuras y grietas.

Aun cuando la evaluación superficial permite conocer la condición de la pista, para el diseño de su rehabilitación es necesaria una evaluación de tipo estructural que permita conocer y/o modificar los criterios de diseño vigentes. Esta evaluación tiene por objeto determinar la estructura actual de la carpeta de rodadura, así como también, conocer su comportamiento bajo la acción de las cargas, para lo cual se utilizó el conocido método para diseño de mezclas Marshall, que permitió determinar los valores de densidad, estabilidad, fluencia y porcentaje residual de asfalto.

Obtenidos los resultados de las evaluaciones superficial y estructural, se dan a conocer algunas opciones para la restauración de la carpeta de rodadura, entre ellas los micro-pavimentos, que consisten en una mezcla aplicada como superficie de desgaste sobre pavimentos, producida, esparcida y uniformemente distribuida para adherirse firmemente sobre una capa de rodadura previamente preparada, para lograr resistencia al agrietamiento e incremento de rugosidad, además de propiedades de impermeabilidad y antideslizantes, que se utilizan en proyectos de recuperación de ahuellamiento, nivelación y sello de vías de alto tráfico.

Con el propósito de contribuir a la preservación de la integridad de la infraestructura de la pista en un nivel aceptable, se hace referencia a aquellos procesos de mantenimiento, tanto preventivos, como correctivos, así como un conjunto de estrategias de mantenimiento recomendadas para las fallas más frecuentes que se localizan en los pavimentos flexibles de aeropuertos.

OBJETIVOS

GENERAL

Proporcionar un estudio técnico, sobre la evaluación de la capacidad estructural de la carpeta de rodadura de la pista principal del aeropuerto internacional de Guatemala “La Aurora”.

ESPECÍFICOS

- Con base en los resultados obtenidos de la evaluación estructural de la carpeta de rodadura y considerando el tiempo y los recursos disponibles, proponer una alternativa para la restauración de la misma.
- Presentar un detalle acerca de las propiedades y aplicación de la alternativa propuesta para la restauración de la carpeta.
- Proporcionar alternativas para el mantenimiento preventivo de la carpeta de rodadura de la pista principal del aeropuerto, que permitan conservar sus características estructurales y funcionales.
- Que esta investigación constituya un aporte para enriquecer los conocimientos de los futuros profesionales en el área de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

Un aeropuerto está compuesto de una serie de instalaciones, las cuales son fundamentales para el manejo de pasajeros, equipaje, carga, estacionamiento de aeronaves, mantenimiento y reparación de las mismas. Todas ellas son de vital importancia para su funcionamiento; sin embargo, la pista del aeropuerto es el elemento esencial de éste, ya que esta estructura es la que hace posible el despegue y aterrizaje de aviones y tiene que ver directamente con la seguridad de las personas.

En la pista de un aeropuerto, la capa superficial debiera estar diseñada, para proveer una superficie de rodaje tersa para aviones, dar espacio a cargas de tráfico, proteger la base del agua superficial, resistir patinamiento, abrasión y desgaste a la intemperie; sin embargo, algunas veces esta estructura no ha sido diseñada, según las necesidades de transitabilidad de la vía y en otras ocasiones, el efecto del tráfico en el tiempo va alterando estas cualidades, lo cual se refleja sólo cuando la vía presenta señales visibles de fatiga.

El Aeropuerto Internacional de Guatemala “La Aurora” ha estado en servicio desde aproximadamente cincuenta años, y en los últimos siete años, ha soportado una frecuencia promedio de aterrizajes y despegues de 80 diarios. La pista principal del aeropuerto presenta actualmente señales de fatiga visibles. Durante años, las diversas autoridades a cargo han proporcionado mantenimiento y reparaciones a la carpeta de rodadura de la pista principal, lo que ha permitido en cierta forma cubrir superficialmente y por cortos períodos de tiempo las fallas; sin embargo, para esto solamente se han efectuado inspecciones visuales, que si bien es cierto tienen importancia para determinar la condición de la superficie y su funcionalidad, que es lo que finalmente interesa al

usuario, cabe mencionar que este tipo de estudios no es suficiente para cumplir con una rehabilitación efectiva.

Considerando la importancia de contar con un diagnóstico de la condición actual de la carpeta asfáltica de la pista principal, a través de este trabajo de graduación, se realizó una evaluación estructural de la misma. Para el desarrollo de esta investigación, se contó con la autorización de la Dirección General de Aeronáutica Civil, DGAC, para la extracción de las muestras de la carpeta asfáltica, que fueron objeto de estudio. Dichas muestras fueron ensayadas en el laboratorio de la empresa privada Pavimentos de Guatemala, PADEGUA, que cuenta con el equipo apropiado, y de esta manera fue posible determinar las propiedades de la carpeta como: granulometría, densidad, estabilidad, fluencia, etc., que permitieron conocer su condición real.

Finalmente y con base en los resultados obtenidos, se plantea como alternativa para el mejoramiento y reparación de la carpeta de rodadura, un tratamiento asfáltico superficial con micro-pavimento; este tratamiento está definido por la *International Slurry Surfacing Association*, ISSA, como el tipo más avanzado de tratamiento asfáltico, de mayor estabilidad, y recomendado para su aplicación en aeropuertos. Así también, se propone una serie de obras de conservación rutinaria, que podrían garantizar la prolongación de la vida de servicio del pavimento de la pista.

1. GENERALIDADES SOBRE AEROPUERTOS

1.1 Elementos de un aeropuerto

Los aeropuertos requieren áreas extensas y espacio aéreo libre y con buena visibilidad para aproximarse a ellos. Un aeropuerto comprende una variedad de instalaciones para el aterrizaje, despegue, movimiento en tierra y estacionamiento de aeronaves; mantenimiento y reparación de las mismas, almacenamiento de combustible, manejo de pasajeros, equipajes y carga.

Para el mejor estudio de este conjunto de elementos que conforman el sistema aeropuerto, es posible clasificarlos en tres grupos: lado terrestre, edificios terminales y lado aéreo.

1.1.1 Elementos lado terrestre

El lado terrestre comprende la carretera de acceso, las calles frente a la terminal, las aceras y los estacionamientos de vehículos; este elemento constituye el canal que permite el “flujo de salida”, a través del cual, tanto pasajeros como carga, entran al sistema para ser trasladados a otros destinos fuera del aeropuerto. Para analizar el lado terrestre y en lo que respecta a las carreteras, es conveniente mencionar algunos conceptos que son básicos para un mejor entendimiento de este tema. Dichos conceptos son: capacidad y nivel de servicio.

El manual americano de carreteras define “La capacidad” como la estimación del número máximo de personas o vehículos, a las que una instalación puede dar servicio con seguridad razonable dentro de un período de tiempo. La capacidad puede definirse en términos de personas por hora o de vehículos por hora, según el tipo de instalación estudiada.

El mismo manual define el nivel de servicio, como medidas cualitativas que caracterizan, tanto las condiciones de explotación del tráfico vial, como su percepción por los conductores y pasajeros. Tales medidas son: la velocidad, el tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, las interrupciones a la circulación, el confort y la conveniencia.

1.1.1.1 Carretera primaria de acceso

Es la que conecta la ciudad y el aeropuerto. Se considera que debe tener un valor de capacidad por vía de 700 a 800 vehículos por hora en condiciones de flujo de tráfico interrumpido, con intersecciones señalizadas, con velocidad promedio de 30 a 35 km/hr. Si la carretera fuese de acceso restringido bajo condiciones de tráfico ininterrumpido, se considera un valor de capacidad por vía de 1,200 a 1,600 vehículos por hora, con velocidades promedio de 60 a 80 km/hr. Esta carretera debe tener como mínimo dos vías para cada dirección y cada vía debe tener un ancho mínimo de 3.6 m.

1.1.1.2 Carretera de acceso al área terminal

Es la que conecta la carretera primaria de acceso con los edificios terminales y las facilidades de estacionamiento. Esta carretera es utilizada por los pasajeros, visitantes, empleados y distintos usuarios del aeropuerto.

La circulación al frente del edificio terminal debe ser de un solo sentido y siguiendo el sentido contrario a las agujas del reloj, lo que permite que los pasajeros aborden y bajen del vehículo a la derecha. Esta carretera debe tener una capacidad de 900 a 1,000 vehículos por hora y por vía. El ancho de cada vía debe ser de 3.6 m.

1.1.1.3 Carretera frente a la terminal

Es la que distribuye los vehículos directamente al edificio terminal. Por lo menos deben proveerse dos vías adyacentes a la acera del edificio terminal. La vía interior contiguo a la acera debe ser de 2.4 m de ancho y su capacidad se debe considerar igual a cero. La vía exterior debe tener un ancho de 3.6 m, con una capacidad de 300 vehículos por hora. El frente de la terminal es un elemento crítico en la eficiencia de la operación del sistema terrestre de un aeropuerto. Consecuente con lo anterior, para eliminar el congestionamiento causado por el inevitable estacionamiento doble, se recomienda un mínimo de cuatro vías frente a la terminal, cuando la llegada y salida de pasajeros están al mismo nivel.

1.1.1.4 Carreteras de servicio

Éstas se dividen en dos categorías: de uso general y de uso restringido. Las carreteras de servicio de uso general se utilizan para el suministro de bienes, servicios, carga aérea, suministro de cocina de vuelo, etc. Las carreteras de servicio de uso restringido son utilizadas para mantenimiento, servicio de extinción de incendios, servicio de combustible, equipaje, carga y vehículos para el servicio de aeronaves.

1.1.1.5 Estacionamiento público

Un aeropuerto necesita de amplios estacionamientos para automóviles de pasajeros, espectadores, ejecutivos y empleados del mismo. Se debe ubicar a una distancia menor o igual a 300 m de la puerta de las terminales de aerolíneas, para minimizar las distancias por caminar. Si esta distancia es mayor, deben proveerse facilidades para el movimiento de los pasajeros, como bandas, vehículos, etc. Para reducir las distancias, algunos aeropuertos tienen estructuras de estacionamiento en varios niveles adyacentes a la terminal.

La capacidad de un estacionamiento público, para el caso de aeropuertos, se evalúa con base en: a) el número de posiciones de estacionamiento igual a 1.5 veces el número de pasajeros en hora pico, cuando existe esta información; b) 1200 vehículos por cada millón de pasajeros, cuando no se cuenta con la información de hora pico, c) que cada posición de estacionamiento (incluyendo las vías de circulación), debe tener un área de 31.5 a 36.0 m². Los estacionamientos deben ser diseñados para manejar sobreflujo de tráfico. También se debería contar con espacio para estacionamiento de camiones que efectúan suministros diversos.

1.1.2 Edificios terminales

Una terminal es simplemente el principio o el fin de una línea de transporte. En el caso de un aeropuerto, sirve generalmente de transición a pasajeros y tripulaciones de tierra a aire y viceversa, para lo cual requiere de instalaciones adecuadas, como salas de espera, secciones de manejo de equipaje, oficinas y mostradores para venta de boletos. Entre otras funciones de una terminal, están; el almacenamiento, clasificación, concentración y reexpedición de carga.

El diseño de cada uno de sus ámbitos funcionales ha de estar encaminado a garantizar una circulación rápida, cómoda y lo más corta posible a los pasajeros con su respectivo equipaje.

Es considerable la diversidad de instalaciones necesarias y disponibles en las terminales, las áreas principales de un edificio terminal, y se recomienda distribuirlas de la siguiente manera:

Tabla I. Distribución de áreas en la terminal de pasajeros

CLASIFICACIÓN	DISTRIBUCIÓN DE AREA	INCLUYE
LÍNEAS AÉREAS	27 %	<ul style="list-style-type: none"> • Mostradores chequeo salida pasajeros • Oficinas de tiquetes de líneas aéreas • Zona de manejo de equipaje • Área de reclamo de equipaje
CONCESIONARIOS	17 %	<ul style="list-style-type: none"> • Tiendas libres • <i>Snacks</i> y restaurantes • Correos, <i>couriers</i>, bancos • Rentas de autos • Turismo, etc
USO PÚBLICO	34 %	<ul style="list-style-type: none"> • Salón de chequeo de pasajeros • <i>Lobby</i> público, pasajeros que salen • Salas de última espera + circulaciones • Sala de pasajeros en tránsito + circulaciones • <i>Lobby</i> espera para público, pasajeros que entran
ADMINISTRACIÓN Y GOBIERNO	17 %	<ul style="list-style-type: none"> • Oficinas administrativas • Aduana: entrada y salida • Migración: entrada y salida • Policía antinarcóticos
OTRAS ÁREAS	15 %	<ul style="list-style-type: none"> • Incluye todas aquellas zonas no incluidas en las agrupaciones anteriores.

Fuente: **Estudio Centroamericano de Transporte, Secretaria de Integración Centroamericana, SIECA.** Los porcentajes recomendables en las diferentes clasificaciones pueden por lo tanto variar, pero respetándose que la suma porcentual de áreas rentables no debe ser menor al 55%, y de las no rentables del 45%. Se consideran rentables las áreas de concesionarios, administración y líneas aéreas; el resto constituyen las áreas no rentables.

1.1.2.1 Edificio terminal de pasajeros

El tamaño estimado deseable del edificio terminal de pasajeros, es posible determinarlo, con base en un área asignada por pasajero de hora pico. Este criterio es posible aplicarlo a los aeropuertos de los que se obtiene información de los movimientos de pasajeros en hora pico. El área total unitaria se considera de 30 m² / pasajero hora pico. Este valor puede reducirse hasta unos 24 m² / pasajero hora pico, límite en que todavía se considera un espacio comfortable. Esto permite un margen de variación del área total de un -20% como aceptable.

1.1.2.2 Edificio terminal de carga

El edificio terminal de carga es el que funciona para el manejo de carga que entra, sale y transita por el país por transporte aéreo. Se estima que el área aproximada de la terminal de carga, con base en un coeficiente de producción de 4 toneladas por metro cuadrado por año, se tiene en cuenta que no son terminales de carga mecanizadas.

1.1.3 Elementos lado aéreo

1.1.3.1 Pistas de aterrizaje y despegue

El elemento principal de un aeropuerto son sus pistas, que es una necesidad fundamental para el aterrizaje y despegue de todos los aviones; su longitud y ancho deben ser los adecuados para satisfacer las necesidades de espacio de las aeronaves que operan en la misma, las condiciones de vuelo; número de aterrizajes y despegues; las características físicas de las aeronaves y todo lo que representa la demanda de pista.

1.1.3.1.1 Orientación de las pistas

La orientación de las pistas debe ser tal, que los despegues y aterrizajes se puedan efectuar con viento de frente o de cola, cuando esté el 95% de las operaciones libres de vientos cruzados que excedan 24 kph, o de 32 a 48 kph. Esto exige un estudio de los vientos dominantes, que por lo general se marcan en líneas radiales de la llamada rosa de los vientos, para indicar el porcentaje de tiempo que los vientos de diferentes velocidades soplan desde las direcciones radiales. Para librarse de los vientos cruzados se puede necesitar más de una pista para usarse alternativamente a medida que el viento cambie de dirección. Las pistas se deben situar también, de manera que no haya conflicto entre dos que se usan simultáneamente.

1.1.3.1.2 Longitud de las pistas

La longitud de pista requerida para que aterrice o despegue una aeronave, se acorta o se alarga, según sea la velocidad del viento de frente o de cola. Asimismo, la longitud de pista requerida es mayor cuanto mayor sea la temperatura del lugar, ya que esa condición crea un aire menos denso, que produce una baja capacidad de empuje y una reducida capacidad de ascenso. Es evidente que una aeronave que despegue contra pendiente requiere mayor longitud de pista, que al hacerlo en una pista a nivel o a favor de la pendiente. Por otra parte cuanto más alta es la elevación de un aeródromo, menor será la presión barométrica, que da como resultado la demanda de mayor longitud de pista.

Los factores, que afectan la longitud de pista requerida para las operaciones de las aeronaves, son las siguientes:

1. La pendiente de la pista y la condición de su superficie
2. Atmósfera, particularmente el viento de superficie y la temperatura
3. Características de rendimiento y volumen de operación de las aeronaves
4. Las condiciones topográficas del terreno
5. La ubicación del aeródromo, como es el caso de la elevación del sitio en que se asienta, lo que afecta directamente la presión barométrica

Para determinar la longitud de una pista, se deben tener en cuenta las operaciones de despegue y aterrizaje en condiciones muy críticas, de las naves que se espera que hagan uso regular del aeropuerto.

La longitud segura de pistas para aviones, basada en las regulaciones que periódicamente publica la Agencia Federal de Aviación de los Estados Unidos (FAA), debe cumplir con tres requisitos para los transportes aéreos civiles:

1. Las longitudes de las pistas deben ser suficientes, para que los aviones aceleren hasta alcanzar la velocidad de despegue y luego, en caso de falla de un motor crítico, frenen y se detengan dentro de los límites de la pista (o franja útil de aterrizaje).
2. En caso de que ocurra la falla de un motor crítico en el momento del despegue, los aviones deben tener capacidad para despegar con uno o más motores en funcionamiento. Los aviones con motores de pistones deben tener capacidad para librar el extremo de la pista a una elevación de 50 ft y los de turbina, a una elevación de 35 ft.

- En el aterrizaje, los aviones deber librar el extremo de aproximación de la pista en 50 ft, tomar tierra y detenerse dentro del 60% de la longitud disponible de la pista.

1.1.3.1.3 Zona de seguridad en las pistas

En cada extremo, es necesaria una zona nivelada de seguridad de 240 a 1000 ft de largo, según la categoría de aproximación de los aviones y el grupo de diseño. El ancho que se requiere varía de 120 a 500 ft. Para los primeros 200 ft, a partir de los extremos de la pista, la zona de seguridad debe tener una pendiente descendente entre 0 y 3 % a lo largo del eje longitudinal.

1.1.3.1.4 Pendientes de pistas

El funcionamiento de las aeronaves esta influido por la pendiente o gradiente de las pistas. Una pendiente ascendente aumenta la potencia necesaria para el despegue; y una pendiente hacia abajo, aumenta las distancias de frenado.

Tabla II. Sistema de codificación de referencia de aeropuerto FAA

Categoría de aproximación (velocidad-nudos)	Grupo de diseño de avión (envergadura, ft)					
	I < 49	II 49 a 78	III 79 a 117	IV 118 a 170	V 171 a 213	VI 214 a 261
A (< 90)	A-I ¹	A-II ^{1,2}	A-III ²	A-IV ²		
B (91 a 120)	B-I ^{1,2}	B-II ^{1,2}	B-III ²	B-IV ^{2,3}		
C (121 a 140)	C-I ²	C-II ^{1,2}	C-III ²	C-IV ^{2,3}	C-V ³	C-VI ³
D (141 a 165)	D-I ²	D-II ²	D-III ^{2,3}	D-IV ^{2,3}	D-V ³	
E (166 o más)		E-II ²	E-III ^{2,3}			

¹ Aviones pequeños (12,500 lb o menos de peso máximo al despegue).

² Aviones grandes (más de 12,500 lb de peso máximo al despegue).

³ Aviones pesados (peso de 300,000 lb o más dl despegue).

Fuente: *Airport Pavement*, Federal Aviation Administration, FAA.

Las pendientes longitudinales para aeropuertos, que prestan servicio a aviones de categorías C y D, no deben exceder 1.5% en cualquier punto del perfil de la pista, y para las categorías A y B está permitido un máximo de 2%.

Las pendientes transversales en pistas de aterrizaje no deben rebasar un 2% para categorías A y B de aproximación y el 1.5% para las categorías C y D.

Las pendientes en los acotamientos sin pavimentar deben ser mas pronunciadas para mejorar el escurrimiento. La pendiente transversal del acotamiento, que rebase una longitud de 10 ft, debe ser de hasta 5% para las categorías de aproximación A y B, y no más de 3% para las categorías C y D.

La pendiente descendente en la zona de seguridad para los primeros 200 ft medidos desde los extremos de la pista, debe estar entre 0 y 3% a lo largo del eje longitudinal. Los cambios longitudinales de pendiente están limitados a 2% por 100 ft hacia arriba o hacia abajo.

1.1.3.2 Plataformas de estacionamiento para aeronaves

Suelen ser zonas pavimentadas adyacentes a una terminal aérea, utilizadas por aviones como aproximación al edificio, que permiten el ascenso y descenso de pasajeros y tripulantes de los aviones, para abastecer combustible y efectuar servicios y verificaciones menores, cuyo tamaño depende del número necesario de posiciones de carga y del tamaño, así como las características de giro de los aviones.

1.1.3.3 Pistas de rodaje

Estas pistas se diseñan para conectar la terminal con los extremos de las pistas en el caso de los despegues y para hacer salidas de la pista en varios puntos, así como dar salida a los aviones que aterrizan. Los aterrizajes, generalmente, no necesitan toda la longitud de la pista. Para despejar la pista de los aviones que van aterrizando, tan rápido como sea posible, se diseñan salidas con vueltas fáciles hacia las pistas de rodaje.

1.1.3.4 Torres de control

Estas se construyen en los aeropuertos, para ayudar a la navegación del tráfico aéreo; éstas son requeridas para la operación segura y eficiente de las aeronaves. Su construcción está regulada con base en los requerimientos que establece la Organización de Aviación Civil (OACI) y la Agencia Federal de Aviación de los Estados Unidos (FAA).

Son construcciones altas desde las que los controladores de tráfico pueden observar las pistas de aterrizaje y despegue, pistas de rodaje y plataformas para estacionamiento de aviones. Cuando el piloto se aproxima al punto de aterrizaje, el vuelo queda bajo el control de la torre del aeropuerto y recibe instrucciones de aterrizaje (o de espera); y le informa respecto al clima, el techo, la prioridad de aterrizaje y la pista que le corresponde, para evitar algún accidente. Los vuelos se detectan y controlan desde que están a casi 56.3 km de la torre de control de un aeropuerto. El control total se toma cuando el avión se encuentra a unos 11.3 km de distancia. El control local se ejerce en el tráfico, dentro y cerca del patrón del aeropuerto.

1.2 Normas nacionales para aeropuertos

Entre los convenios internacionales de la Aviación Civil se encuentra el Convenio de Chicago (1944), el cual contiene el convenio sobre Aviación Civil Internacional, que constituye la creación de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Ésta es una división especializada de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que fue establecida en 1947, para elaborar los principios y la técnica de la navegación aérea internacional, y para fomentar el establecimiento y desenvolvimiento del transporte aéreo internacional.

Entre las disposiciones principales del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, se encuentran además: el reconocimiento al principio de soberanía exclusiva y absoluta de todo estado, sobre el espacio aéreo correspondiente a su territorio, así como el reconocimiento de los derechos de sobrevuelo, tránsito y aterrizaje a aeronaves en servicio no regular y la concesión a los estados del derecho a reservar el tráfico interno en forma exclusiva a sus propias empresas aéreas.

Los fines y objetivos de la OACI son los siguientes:

- Velar por el progreso seguro y ordenado de la aviación civil internacional en todo el mundo.
- Fomentar la técnica de la construcción y utilización de aeronaves para fines pacíficos.
- Estimular el desarrollo de aerovías, aeropuertos, instalaciones y servicios para la navegación aérea, que son empleados en la aviación civil internacional.
- Satisfacer las necesidades de los pueblos del mundo en lo que respecta a transportes aéreos seguros, regulares, eficaces y económicos.
- Evitar el despilfarro económico producido por la competencia no controlada.

- Asegurar que se respeten plenamente los derechos de los estados contratantes, y que cada estado contratante tenga oportunidad equitativa de explotar empresas de transporte aéreo internacional.
- Evitar preferencia entre estados contratantes.
- Promover la seguridad de vuelo en la navegación aérea internacional.
- Fomentar, en general, el desarrollo de la aeronáutica civil internacional en todos sus aspectos.

En Centroamérica, cada país posee su propia ley de aviación civil, la que regula todas estas normas.

1.2.1 Ley de aviación civil Guatemala

El objeto de esta ley es regular las actividades de aeronáutica civil, para permitir su desarrollo eficiente y seguro de acuerdo con los avances de la aviación mundial.

El artículo 6 de la Ley de Aviación Civil de Guatemala determina que será la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), el órgano encargado de normar y supervisar, con base en lo establecido en esta Ley, los servicios de transporte aéreo y en general todas las actividades de aeronáutica civil en el espacio aéreo de Guatemala. Esta Dirección es dependencia del Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Viviendas, y posee funciones de carácter técnico, económico y administrativo.

Algunas de las funciones técnicas normadas en esta ley son las siguientes:

- Desarrollar sus actividades de acuerdo con la ley, a las normas y anexos de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y a los convenios, acuerdos y tratados aprobados por el Gobierno de la República.
- Supervisar la construcción y prestación de los aeródromos, la prestación de los servicios de navegación y de control de tráfico aéreo, así como la prestación de los servicios de transporte aéreo para que cumplan con los requisitos de seguridad y protección al vuelo.
- Expedir o prorrogar, así como suspender o cancelar certificados de matrícula y de aeronavegabilidad.
- Investigar los incidentes y accidentes de aviación ocurridos en el territorio de Guatemala.

1.3 Características aeropuerto internacional de Guatemala La Aurora

El sistema nacional de aeropuertos de Guatemala cuenta con dos aeropuertos de carácter internacional, La Aurora, en la ciudad capital y Santa Elena, en El Petén; 6 aeropuertos nacionales de relativa importancia localizados en: Puerto Barrios, Izabal; Cobán, Alta Verapaz; Puerto de San José, Escuintla; Retalhuleu, Retalhuleu; y Poptún, Petén; cuenta además con 31 pistas de aterrizaje públicas. El principal aeropuerto es el aeropuerto internacional La Aurora que concentra el 93% del tráfico de pasajeros y carga del país.

Según estudio realizado por la Secretaría de Integración Económica Centroamericana, el aeropuerto La Aurora es el segundo aeropuerto de Centroamérica con mayor tráfico de pasajeros y carga.

En cuanto a los distintos elementos que componen el sistema del aeropuerto internacional La Aurora, es importante conocer las siguientes características:

1.3.1 Elementos lado terrestre

En cuanto al aeropuerto internacional La Aurora, está ubicado en una zona densamente poblada, lo cual restringe su desarrollo normal.

Las carreteras de accesos de entrada y salida de pasajeros, son a distintos niveles con carriles de 3.6 m de ancho, lo que hace que su capacidad sea de 3,000 vehículos por hora de tráfico ininterrumpido, cubriendo las necesidades del aeropuerto.

1.3.1.1 Terminales

El edificio terminal de pasajeros cuenta con un área total de 22,000 m², distribuidos de la siguiente manera:

- Las zonas de uso público, 4,902.49 m²
- Las zonas de concesionarios, 2,027.55 m²
- Las zonas para aerolíneas, 3,642.72 m²
- Las zonas de gobierno y administración, 1,533.10 m²
- Otras áreas, 9,894.14 m²

Cabe mencionar que el área recomendable para el aeropuerto La Aurora es de aproximadamente 25,800 m², para alojar todos sus elementos y cumplir con las especificaciones y áreas de seguridad correspondientes.

El aeropuerto cuenta en términos generales con un área rentable de 207 locales en funcionamiento, dentro de los cuales están: 82 locales comerciales, 70 para oficinas y bodegas de aerolíneas, 25 para empresas arrendadoras de automóviles, 30 para empresas relacionadas con la aviación, 5 estacionamientos de vehículos entre los cuales 1 es de uso exclusivo de las rentadoras de vehículos y es administrado por Aeronáutica Civil, 3 son administrados por el Comité Central de Acción Social de la Presidencia de la República y 1 es administrado por la Dirección General de Aeronáutica Civil. El servicio de combustible no es una concesión; éste es proporcionado por 3 empresas privadas, que cobran únicamente el área utilizada.

1.3.2 Elementos lado aéreo

Las dimensiones de la pista de aterrizaje y despegue y de la calle de rodaje del aeropuerto internacional La Aurora, son las siguientes:

Tabla III. Dimensiones pista aeropuerto La Aurora

Elementos	Dimensiones (metros)
Longitud de pista	2,987
Ancho de pista	60
Ancho de hombros de pista	0
Ancho de calle de rodaje	23
Ancho de hombros de calle de rodaje	0
Separación entre eje de pista y eje de calle de rodaje	70

Fuente: **Estudio Centroamericano de Transporte, Secretaria de Integración Centroamericana, SIECA.**

En el lado aéreo, existe limitación en la separación entre calle de rodaje y pista, ya que la distancia actual está por debajo de la distancia recomendable, que es de 198 m.

Las aeronaves que operan en el Aeropuerto Internacional La Aurora, poseen las siguientes características:

Tabla IV. Aeronaves que operan en el aeropuerto La Aurora

TIPO DE AVIÓN	Longitud de campo de referencia del avión. (m)	Envergadura (m)	Anchura total del tren de aterrizaje principal. (m)
AIRBUS 320	2480	33.9	8.7
BOEING 727-200	3176	32.9	6.9
BOEING 737	2499	28.4	6.4
BOEING 737-200	2295	28.4	6.4
BOEING 737-700	2499	28.9	6.4
BOEING 757	2057	38.0	8.7

Fuente: Estudio Centroamericano de Transporte, Secretaría de Integración Centroamericana, SIECA.

El avión BOEING 757 es la aeronave crítica o de diseño, en el aeropuerto internacional La Aurora.

2. PAVIMENTOS EN AEROPUERTOS

Los pavimentos aeroportuarios son construidos para soportar las cargas impuestas por las aeronaves, así como de proporcionar una superficie adecuada y segura para transitar en cualquier condición meteorológica.

La determinación del espesor del pavimento se basa en el análisis teórico de la distribución de las cargas por los pavimentos y los terrenos de fundación (subrasantes), en el análisis de los datos experimentales relativos al pavimento y en un estudio del comportamiento de los pavimentos, en condiciones de servicio reales.

Aun cuando la estructura básica y la función de los pavimentos en aeropuertos es esencialmente la misma, que en una carretera, existen diferencias significativas entre uno y otro, como por ejemplo: la anchura, la forma, los pesos totales y la elevada presión que los neumáticos de las ruedas de las aeronaves transmiten. Los pavimentos en las pistas también tienen que soportar las vibraciones del período de calentamiento, el escape de los motores de reacción y los impactos del aterrizaje.

Las pistas sufren menos aplicaciones de carga que una carretera normalmente concurrida. La disposición de las ruedas y los patrones de carga son diferentes; por lo general, las aeronaves tienen un tren de aterrizaje en triciclo, con una rueda o conjunto de ruedas dirigitas. Las cargas se canalizan en la parte media de la pista, y quedan un 80 % de las cargas dentro de 8% más o menos del área pavimentada. Así pues, el esfuerzo se concentra dentro del tercio central del pavimento.

Uno de los métodos aceptados comúnmente para el diseño de pavimentos aeroportuarios civiles, es el método modificado del *Airport Paving Manual* publicado por la *Federal Aviation Administration*, el cual calcula la resistencia de los pavimentos de un aeropuerto, en función del peso bruto de la aeronave, para cada tipo de tren de aterrizaje.

Los pavimentos se dividen en general en dos tipos: flexible y rígido. Cuando está apropiadamente diseñado y construido, cada tipo proporcionará un pavimento aeroportuario satisfactorio.

2.1 Parámetros por considerar para el diseño de pavimentos por el método de la agencia federal de aviación (FAA)

Hay varios factores que ejercen influencia sobre el espesor del pavimento requerido. Estos son la calidad del terreno de fundación y de los materiales, que constituyen la estructura del pavimento, la magnitud y el carácter de las cargas de las aeronaves que han de soportarse, el volumen del tránsito y su concentración en ciertas zonas. Relacionando estos conceptos, la FAA ha preparado una serie de curvas para el cálculo de los pavimentos, tanto rígidos como flexibles, con base en un cálculo de vida útil de 20 años. Estas curvas simplifican los procedimientos de cálculo, para lo cual es necesario contar con los siguientes parámetros:

2.1.1 Aeronave de diseño

Las características de las aeronaves que influyen en el diseño de los pavimentos son: peso bruto, porcentaje de carga sobre la rueda de proa, disposición de las ruedas, carga sobre la pata principal, presión de los neumáticos y el área de contacto de cada uno.

La aeronave de diseño se selecciona verificando todas las aeronaves del pronóstico de tránsito del aeropuerto, así como el espesor de pavimento requerido por las mismas, con la utilización de las respectivas gráficas. La aeronave que necesite mayor espesor de pavimento será considerada como la aeronave de diseño.

2.1.2 Peso máximo aeronave de diseño

Es el peso máximo de despegue de la aeronave, que proporciona cierto grado de prudencia en el diseño, debido a que pueden presentarse cambios en el uso operacional del pavimento, y en consideración de que el tránsito previsto es una aproximación.

2.1.3 Salidas anuales equivalentes aeronave de diseño

Con el pronóstico del tránsito anual de cada tipo de aeronave y el número de salidas anuales de la aeronave de diseño, se determina el número de salidas anuales equivalentes, que transforman los diferentes tipos de tren de aterrizaje de las distintas aeronaves, al tipo de tren de aterrizaje que posee la aeronave de diseño, por medio de un factor de conversión establecido. Con este procedimiento, se logra un único número de salidas anuales de la aeronave de diseño.

2.1.4 Índice de penetración de california (CBR)

Es la relación entre la fuerza por unidad de superficie necesaria, para penetrar en una masa de suelo y la fuerza necesaria que permite penetrar en un material normalizado, se expresa en porcentajes. Determina las características de resistencia del suelo para ser utilizado en el diseño de pavimentos.

2.2 Diseño de pavimentos flexibles

Un pavimento flexible es un conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada. Generalmente las capas que lo constituyen son: terreno de fundación (subrasante), sub-base, base y capa de rodadura, sin embargo, éstas pueden no ser todas necesarias, según la magnitud de las cargas y la calidad de los materiales de la subrasante, base y sub-base.

El diseño de pavimentos flexibles por el método de la FAA, se basa en los resultados de pruebas de suelos de subrasantes, para reducir así la presión superficial a un valor que el terreno de fundación pueda soportar. Cada una de las capas de la estructura debe poseer el espesor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inferior inmediata. Así también, la capa de rodadura debe tener resistencia suficiente para aceptar sin peligro las presiones producidas por los neumáticos de las aeronaves sobre la misma, además de una adherencia adecuada entre la aeronave y el pavimento, aún en condiciones húmedas.

La FAA ha ideado una relación entre las clases de suelo y el espesor de la capa superficial, la capa base y la sub-base necesaria, para diferentes pesos brutos de aeronaves, basados en diferentes condiciones de drenaje y la acción de congelación.

2.2.1 Estructura de los pavimentos flexibles

2.2.1.1 Subrasante

Se considera la cimentación del pavimento, por lo que es indispensable realizar un análisis de las propiedades físicas del terreno, con el fin de conocer las variaciones importantes de su estructura, cambios de contenido de humedad, nivel de aguas freáticas, condiciones de drenaje, etc., lo cual permitirá proporcionar una estimación del valor soporte del suelo bajo diferentes condiciones. Cuanta mejor calidad tenga esta capa, el espesor del pavimento será más reducido.

Los ensayos por realizarse para la determinación de las propiedades físicas del suelo, están normalizados en las publicaciones de la ASTM para pavimentos, que están previstos para servir a las aeronaves.

Las subrasantes deben compactarse escrupulosamente, para proporcionar la más alta capacidad de soporte posible.

2.2.1.2 Sub-base

La sub-base está compuesta de material granular, integrante generalmente de la estructura del pavimento flexible, está protegida por la carpeta y la base, colocada sobre la sub-rasante compactada. Impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evita que el pavimento sea absorbido por la sub-rasante. Ésta debe transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías. Para los mejores grupos de suelos, es posible prescindir de este elemento.

En algunos casos, esta capa permite transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de sub-base.

2.2.1.3 Base

La base es el componente estructural más importante de un pavimento flexible ya que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por las cargas concentradas aplicadas a la superficie. Su propósito fundamental consiste en evitar que se presenten deformaciones por corte y consolidación de la sub-rasante, y adicionalmente provee un sub-drenaje al pavimento, así como protección contra la acción de las heladas cuando fuere necesario.

Generalmente esta capa, además de la compactación, necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización), para resistir las cargas sin deformarse y transmitir las adecuadamente. Los materiales para la base son variados, con el fin de aprovechar los materiales locales. Cuando se usan agregados de alta calidad, los tratamientos de asfalto o cemento Pórtland producen bases que son más eficaces que las bases no tratadas. De acuerdo con ello, la FAA reconoce una pulgada de ciertos materiales tratados para base, como equivalente de 1.5 pulgadas de materiales para bases no tratadas.

2.2.1.3.1 Áreas críticas

Son las que requieren mayor espesor de pavimento. Incluyen los extremos de las pistas de aterrizajes, todas las pistas de rodaje y las plataformas. Estas son áreas sujetas a las más diversas cargas por parte de los aviones. El espesor del pavimento en zonas no críticas puede reducirse respecto del espesor mismo en las zonas que sí lo son.

2.2.1.4 Carpeta de rodadura

Es la parte superior del pavimento flexible, que proporciona la superficie de rodamiento; es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico, según los requerimientos de tránsito. La carpeta de rodadura tiene como función proteger la base del agua superficial y en el caso de las pistas de los aeropuertos, proveer una superficie de rodaje tersa para las aeronaves, dar espacio a cargas de tráfico, resistir patinamiento, resistir la abrasión al tráfico y el desgaste a la intemperie.

Para las mezclas asfálticas, es de gran importancia conocer la cantidad de asfalto por emplearse, debiéndose buscar un contenido óptimo, ya que en una mezcla este elemento debe formar una membrana alrededor de las partículas, de un espesor tal, que sea suficiente para resistir los efectos del tránsito y de la intemperie, pero no debe resultar muy gruesa, ya que además de ser antieconómica puede provocar una pérdida de la estabilidad en la carpeta; este exceso de asfalto puede hacer resbalosa la superficie. Para calcular este contenido óptimo de asfalto, se tienen las pruebas de compresión simple para mezclas en frío, la prueba de Marshall para muestras en caliente, y otras.

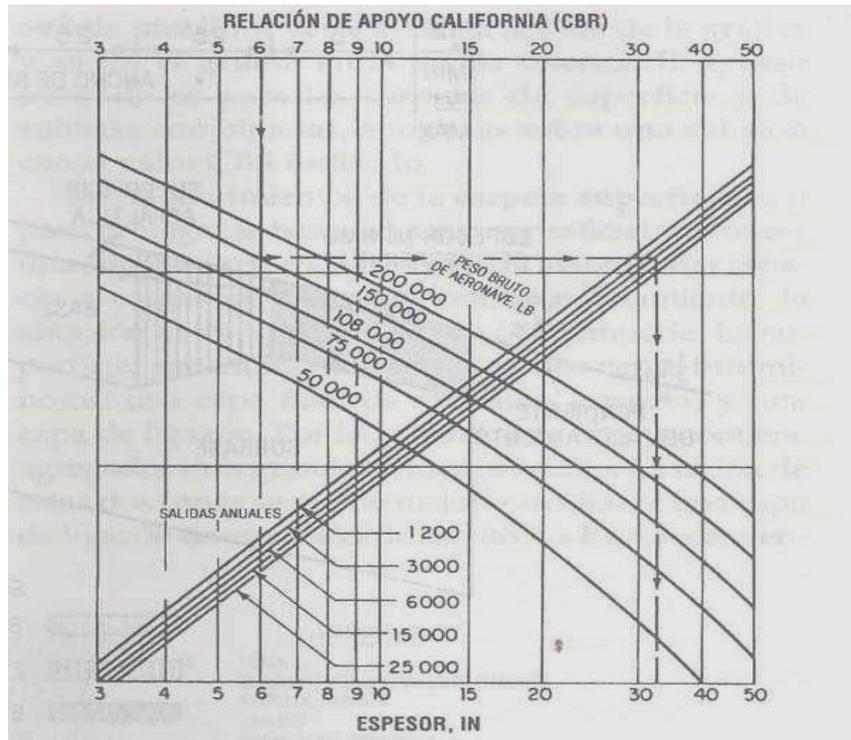
2.2.2 Procedimiento de diseño

Para el diseño de los pavimentos flexibles se requiere de los siguientes parámetros:

- CBR del suelo de fundación
- CBR del material para la sub-base
- Peso bruto de la aeronave de diseño
- Número de salidas anuales de la aeronave de diseño

Una vez obtenidos los anteriores parámetros, se hace uso de las curvas publicadas por la FAA (figura 1).

Figura 1. Curva de diseño de pavimento flexible



Fuente: **Airport Pavement, Federal Aviation Administration, FAA.** Curva de diseño de pavimento flexible en zonas críticas; tren de aterrizaje de doble rueda, así también se han establecido curvas para tren de aterrizaje de una rueda y de tándem doble.

Mediante el uso de las curvas de cálculo, se determina el espesor del pavimento para cada aeronave, el espesor del revestimiento asfáltico, el espesor mínimo de la base y sub-base.

Se registra en la abscisa superior el valor CBR del terreno de fundación, que se proyecta verticalmente hasta el peso bruto de la aeronave, en el punto de intersección se traza una línea horizontal, hasta el número de salidas anuales equivalentes; y de este nuevo punto de intersección, se proyecta verticalmente hacia abajo, para determinar el espesor total del pavimento requerido. El mismo procedimiento se utiliza para la determinación del espesor de la sub-base, excepto que se ingresa el valor CBR del material de la sub-base. Habiendo determinado estos valores y el espesor de la carpeta asfáltica, que también es proporcionado por las curvas, se determina el espesor de la base.

El procedimiento anterior es utilizado para determinar los espesores en áreas críticas de las pistas, que son las que por su posición sufren concentración de movimientos de las aeronaves, para el caso de las áreas no críticas, las que sufren menos concentración de esfuerzos; el espesor del pavimento se obtiene tomando el valor 0.9 de los espesores críticos.

2.3 Diseño de pavimentos rígidos en aeropuertos

Un pavimento rígido consiste en una capa de concreto hidráulico, simple o reforzado que actúa simultáneamente como cuerpo estructural básico y como superficie de rodadura. Esta capa de concreto hidráulico puede estar apoyada, ya sea sobre una sub-base o directamente sobre la sub-rasante compactadas.

Los pavimentos rígidos se recomiendan para áreas sujetas a considerable derrame del combustible en las posiciones de operación o de servicio en plataformas.

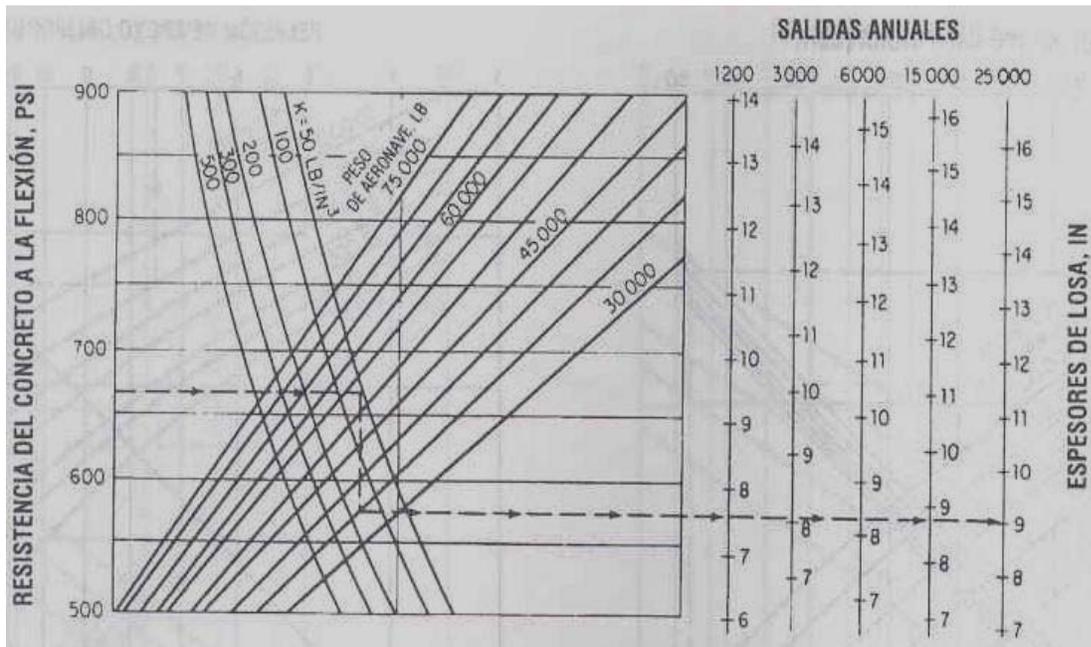
2.3.1 Procedimiento de diseño

En el caso de los pavimentos rígidos, las curvas para el cálculo de los mismos requieren de los siguientes parámetros:

- Resistencia del concreto a la flexión
- Módulo de reacción del terreno de fundación
- Peso bruto de la aeronave de diseño
- Salidas anuales de la aeronave de diseño

Una vez obtenidos los anteriores parámetros, se hace uso de las curvas publicadas por la FAA (figura 2).

Figura 2. Curva de diseño de pavimento rígido



Fuente: **Airport Pavement, Federal Aviation Administration, FAA.** Curva de diseño de pavimento rígido; tren de aterrizaje de una rueda, así también se han establecido curvas para tren de aterrizaje de ruedas dobles y de tándem doble.

Se debe determinar la resistencia del concreto a flexión a 90 días, según las normas ASTM, y el módulo de reacción del terreno de fundación, que es una constante elástica del material que soporta el pavimento rígido.

Contando con los datos anteriores, se determina el espesor total de la capa de concreto hidráulico utilizando la curva de cálculo correspondiente a la aeronave de diseño. Se registra en la ordenada izquierda la resistencia del concreto a flexión, luego se proyecta horizontalmente hasta intersectar la línea de módulo de reacción correspondiente; desde este punto de intersección se proyecta verticalmente hacia el peso bruto de la aeronave de diseño y en la intersección se traza una proyección horizontal, hasta la ordenada derecha de las salidas anuales correspondientes, y en esta línea, se determina el espesor de la losa de concreto.

El espesor de la sub-base se adopta de 10 cm, excepto en el caso de que el peso de la aeronave de diseño sea igual o mayor a 100,000 lbs se coloca una sub-base estabilizada.

En caso de que las salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño sean mayores de 25,000, deberá modificarse el espesor obtenido de las curvas de cálculo, de acuerdo con las disposiciones establecidas por la FAA.

En áreas no críticas, como en el caso de los pavimentos flexibles, se aplica el factor de 0.9 del espesor total.

2.4 Carpetas asfálticas

Como anteriormente se dio a conocer, la carpeta asfáltica es una parte de la estructura de los pavimentos flexibles, sin embargo, por la importancia de ésta específicamente en esta investigación, se ampliará información que se considera importante proporcionar para conocer mejor la función de la misma.

El asfalto es definido por la *American Society for Testing Materials* (ASTM) como un material cementoso, de color café oscuro a negro, en el cual los constituyentes predominantes son materiales bituminosos, que se encuentran en la naturaleza o que son derivados del petróleo. El asfalto le proporciona una flexibilidad limitada a las mezclas de agregados de minerales, con el cual es generalmente combinado. También es muy resistente a reacciones con la mayoría de ácidos, alcalinos y sales. Aunque es sólido o semisólido a temperatura atmosférica, el asfalto puede convertirse a líquido aplicando calor, o al disolverlo en solventes de petróleo, o en agua emulsificada. Los refinadores de crudo tienen maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que éstos cumplan ciertos requisitos.

2.5 Tipos de asfalto

Los asfaltos más empleados en la construcción son los siguientes:

- Asfaltos líquidos de fraguado lento (S.C.), llamados también *road oils*
- Asfaltos líquidos de fraguado medio (M.C.), llamados también asfaltos rebajados.
- Asfaltos líquidos de fraguado rápido (R.C.), llamados también asfaltos rebajados.
- Cementos asfálticos (A.C.)
- Emulsiones asfálticas.

2.5.1 Asfaltos líquidos de fraguado lento (S.C.) o *road oils*

Son aceites residuales asfálticos con poco o ningún elemento volátil; pueden ser fabricados de la mezcla de un cemento asfáltico (A.C.) con un aceite residual; varía sus propiedades desde un material de características ligantes pobres, hasta un material viscoso de excelentes características. Para su uso en trabajo de carreteras, estos asfaltos deben llenar las especificaciones dadas por el Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de América.

2.5.2 Asfaltos líquidos de fraguado medio (M.C.) o *cutbacks*

Se obtienen de la mezcla de un cemento asfáltico con un producto altamente volátil, en este caso, con kerosina. Este tipo de asfaltos son fácilmente trabajables a bajas temperaturas, en que se evapora el volátil al ser expuestos al aire o al calor. Para utilizarlos en las carreteras, deben llenar las especificaciones dadas por el Instituto del Asfalto.

2.5.3 Asfaltos líquidos de fraguado rápido (R.C.) o *cutbacks*

Se obtienen mezclando un cemento asfáltico con productos más volátiles que la kerosina, como la nafta o la gasolina. Este tipo de asfalto es semejante a los de fraguado medio y presenta alta trabajabilidad a bajas temperaturas, evaporándose el volátil al ser expuestos al aire o al calor, más rápidamente que en los de fraguado lento. Para su preparación, se emplean cementos asfálticos de menor penetración que para los M.C., y su utilización en carreteras, está determinada por las especificaciones del Instituto del Asfalto.

2.5.4 Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas están compuestas por tres elementos: asfalto, agua y un agente emulsionante. Se pueden clasificar en aniónicas o alcalinas y catiónicas o ácidas, teniendo cada una características bien definidas que dependen básicamente del agente emulsionador. El manejo de las emulsiones es sencillo, pero se debe tener cuidado de evitar un rompimiento prematuro, el cual puede producirse por exceso de calor, frío o presión.

2.5.5 Cementos asfálticos

La característica de los cementos asfálticos es que están afectados directamente por las propiedades del crudo de donde se obtienen, el cual a su vez depende de las características propias de cada campo petrolífero. También influyen en la calidad y características de los cementos asfálticos, los procedimientos de refinado. Los cementos asfálticos y los asfaltos líquidos de curado lento (S.C.) son similares en su composición; los primeros son los más viscosos pues contienen menos aceites fluxantes no volátiles.

2.6 Propiedades físicas del asfalto

2.6.1 Durabilidad

Es la medida de cuánto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, que a su vez está afectado por el diseño y características de la mezcla, por consiguiente, es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto, como son la prueba de película delgada en horno (TFO) y la prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO). Ambas incluyen el calentamiento de películas delgadas de asfalto.

2.6.2 Endurecimiento y envejecimiento

Durante la construcción, los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica, y el endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto en combinación con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (en el proceso de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas del agregado). Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto que cubre las partículas de agregado.

2.6.3 Susceptibilidad a la temperatura

Los asfaltos son termoplásticos; esto es, que se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si los asfaltos tuvieran el mismo grado de consistencia.

Es de vital importancia entender que un asfalto sea susceptible a la temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas, para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

2.6.4 Densidad

La densidad de un material es una propiedad fundamental que se usa con frecuencia como auxiliar en la identificación y cuantificación. En la mayor parte de sus aplicaciones, el asfalto se pesa, pero la dosificación final (por ejemplo, en una mezcla para pavimentación) se basa generalmente en relaciones de volumen. De esta manera, es indispensable tener un valor preciso de su densidad para convertir el peso a volumen. Algunas especificaciones para el asfalto exigen una gravedad específica mayor que $1,000 \text{ kg/m}^3$, para prevenir la posibilidad de usar una clase que pueda flotar cuando se ponga en contacto con grandes volúmenes de agua.

2.6.5 Adherencia

La adherencia es la tensión interfacial en este caso de un líquido y una superficie sólida, representa el trabajo necesario para separar los materiales en la interfase (sólido - líquido), que en el caso de los pavimentos se refiere a la relación agregados-asfalto. El ángulo de contacto en la interfase puede usarse para determinar el valor de estas fuerzas.

En la mayor parte de las aplicaciones prácticas del asfalto, la presencia del agua en la interfase agregado-asfalto presenta algunos problemas, cuya severidad depende en gran parte de la naturaleza e historia de la superficie sólida. La adherencia del asfalto a las superficies húmedas es menor (el ángulo de contacto es grande), así como cuando el agua ingresa dentro de una interfase de sólido-asfalto en su empleo.

2.6.6 Cohesión

La cohesión puede considerarse como una manifestación de las fuerzas que mantienen juntas las moléculas del asfalto, así como que la adherencia es la manifestación principal de las fuerzas que actúan entre las moléculas de un asfalto y las de la superficie del sólido. Los asfaltos varían considerablemente en su resistencia interna bajo un conjunto especial de condiciones de temperatura y esfuerzo.

2.7 Fallas en pavimentos asfálticos

La capacidad estructural de un pavimento se refiere a la habilidad que tenga el mismo para soportar las cargas actuales y futuras. Cuando la capacidad estructural de pavimento es excedida, el pavimento falla. Sin embargo, se puede distinguir entre dos tipos de fallas en un pavimento: la falla funcional y la falla estructural, según su relación con la capacidad para cumplir su función o con el deterioro de uno o más de sus componentes.

La Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), a través del Catálogo Centroamericano de Daños a Pavimentos Viales unifica la clasificación de daños en los pavimentos, con la utilización de una terminología común.

Es frecuente que el mismo deterioro sea conocido con nombres diferentes a nivel regional, por lo que se han estandarizado a fin de ser identificados correctamente.

El catálogo es un resumen de las fallas más comunes que se encuentran en la región. En lo que se refiere a las posibles causas, únicamente se presenta una indicación del origen de la falla. Siempre es necesario hacer las investigaciones pertinentes de campo, para establecer la causa definitiva del daño.

2.7.1 Deformaciones superficiales de pavimentos asfálticos

2.7.1.1 Ahuellamiento

Las repeticiones de las cargas de tránsito conducen a deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o en la sub-rasante, lo que se manifiesta en una depresión longitudinal continua a lo largo del rodamiento del tránsito, de longitud mínima de 6.0 m.

2.7.1.1.1 Posibles causas

Las capas estructurales pobremente compactadas, como consecuencia inestabilidad en bases y sub-bases granulares, que fue creada por la presión del agua o saturación de la misma.

Técnica de construcción pobre, espesores deficientes de las capas que lo integran y un bajo control de calidad de los materiales.

La acción del tránsito (sobrecargas y altos volúmenes de tránsito no previstos en el diseño original). Estacionamiento prolongado de vehículos pesados.

2.7.1.2 Corrimiento

Distorsiones de la superficie del pavimento por desplazamiento de la mezcla asfáltica, o bien por desplazamiento de la capa asfáltica sobre la superficie subyacente, generalmente acompañada de un levantamiento hacia el eje de la carretera.

2.7.1.2.1 Posibles causas

Los desplazamientos son ocasionados por las cargas del tránsito, que actúa sobre mezclas asfálticas poco estables, ya sea por exceso de asfalto, falta de vacíos, o bien, por falta de confinamiento lateral.

La inadecuada ejecución del riego de liga o imprimación no permite una adecuada adherencia entre la capa asfáltica de rodadura y la subyacente, que origina mayor posibilidad de corrimiento.

2.7.1.3 Corrugación

Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos menores de 1.0 m entre ellas, a lo largo del pavimento.

2.7.1.3.1 Posibles causas

Este tipo de falla es ocasionado por la acción del tránsito sobre las capas superficiales (carpeta o base del pavimento), muy deformables, pero bien adheridas las capas subyacentes.

2.3.1.4 Hinchamiento

Es un abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento, generalmente en la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera.

2.3.1.4.1 Posibles causas

Son causadas fundamentalmente por la expansión de los suelos de subrasante del tipo expansivo. En muchos casos, pueden estar acompañadas por el fisuramiento de la superficie.

2.3.1.5 Hundimiento

Es la depresión de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo.

2.3.1.5.1 Posibles causas

Los hundimientos son causados por asentamientos de la fundación; son deficiencias durante la construcción o falta de un continuo mantenimiento a los drenes. La heterogeneidad constructiva puede provocar, desde simples descensos de nivel, hasta insuficiencia de espesor e inestabilidad de los materiales.

Tabla V. Niveles de severidad de deformaciones superficiales

DEFORMACIONES SUPERFICIALES EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS			
TIPO DE FALLA	NIVELES DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIANO	ALTO
AHUELLAMIENTO **	- La profundidad promedio es menor de 10 mm.	- La profundidad promedio es de 25 mm.	- La profundidad promedio es mayor de 25 mm.
CORRIMIENTO *	- Causa cierta vibración o balanceo en el vehículo, sin generar incomodidad.	- Causa significativa vibración o balanceo al vehículo que genera incomodidad.	- Causa excesivo balanceo que genera incomodidad y/o riesgo para la circulación, por lo que es necesaria una considerable reducción de la velocidad de tránsito.
CORRUGACIÓN *	- Causa cierta vibración en el vehículo, sin generar incomodidad.	- Causa significativa vibración al vehículo que genera incomodidad.	- Causa excesiva y continua vibración en el vehículo, por lo que es necesaria reducción de la velocidad de tránsito.
HINCHAMIENTO *	- Poco perceptible a una velocidad promedio de operación.	- Genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad de circulación.	- Severa incomodidad, que condiciona la velocidad con peligro para la circulación.
HUNDIMIENTO *	- Poco perceptible a una velocidad promedio de operación.	- Genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad de circulación.	- Severa incomodidad, que condiciona la velocidad con peligro para la circulación.

* Se mide en metros cuadrados de superficie afectada, y cuando existen 2 ó 3 niveles de severidad dentro de una misma área fallada, que no se puedan identificar separadamente, se califica con la mayor severidad observada.

** Se mide en metros lineales; si la falla no tiene el mismo nivel de severidad en toda su extensión, cada porción debe ser registrada por separado.

Fuente: **Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes.** Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura.

2.7.2 Fisuras y grietas

2.7.2.1 Fisuras piel de cocodrilo

Es una serie de fisuras interconectadas que forma pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanzan su valor máximo; las fisuras se propagan a la superficie, inicialmente como una serie de fisuras longitudinales paralelas que evolucionan por el efecto de la repetición, interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo.

Generalmente ocurren en las áreas de canalización del tránsito. En el caso de que la base y la sub-base sean débiles, el fisuramiento será acompañado de ahuellamientos. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache.

2.7.2.1.1 Posibles causas

Este tipo de falla es producto de la fatiga que sufren las capas asfálticas al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisuramiento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil; el material ligante ha envejecido y por tanto ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.

2.7.2.2 Fisuras en bloque

Estas fisuras se presentan interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m². La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.

2.7.2.2.1 Posibles causas

Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas, debido a las variaciones diarias de temperatura. Es difícil comprobar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la capa de rodadura, la base o sub-base.

La ausencia de tráfico tiende a acelerar la formación de estas grietas de contracción. Aun cuando el origen de estas fisuras no está asociado a las cargas de tráfico; cuando éstas ya se han formado, las cargas incrementan la severidad de las mismas. La presencia de fisuras en bloque también es un indicativo de que el asfalto se ha endurecido significativamente.

2.7.2.3 Fisuras en arco

Son fisuras en forma de media luna que apuntan en la dirección de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Estas fisuras no necesariamente apuntan en el sentido del tránsito; en el caso del frenado de un vehículo cuesta abajo, la dirección de las fisuras se presenta cuesta arriba.

2.7.2.3.1 Posibles causas

Se producen cuando los efectos de frenado o giro de las ruedas de los vehículos provocan un resbalamiento y deformación de la superficie de pavimento, debido principalmente a una mezcla asfáltica de baja estabilidad y una deficiente adherencia entre la superficie y la siguiente capa de la estructura del pavimento. Asimismo, espesores de carpeta muy reducidos sobre superficies pulidas, especialmente sobre pavimentos de concreto, suelen ser causas primarias en muchos casos. Otra de las causas también puede ser un contenido alto de arena en la mezcla, sea arena de río o finos triturados.

2.7.2.4 Fisura transversal

Fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie del pavimento, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde del pavimento.

2.7.2.4.1 Posibles causas

Por la contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, debido a un exceso de *filler*, envejecimiento asfáltico, baja temperatura y gradientes térmicos importantes. Defectuosa ejecución de las juntas transversales de construcción de las capas asfálticas de superficie.

2.7.2.5 Fisura longitudinal

Fracturación que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera, y puede localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento. La ubicación de la fisura es indicativa de la causa más probable. Estas fisuras, asociadas a las cargas del tránsito, ocurren a una distancia de 0.30 a 0.60 m del borde y son una evidencia de fatiga por debilidad estructural.

2.7.2.5.1 Posibles causas

Defectuosa ejecución de las juntas longitudinales de construcción, al distribuir las mezclas asfálticas durante la construcción; ocurren en el eje y coinciden con los carriles de distribución y ensanches.

Contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, particularmente ante gradientes térmicos importantes. Reflexión de fisuras causadas por grietas existentes por debajo de la superficie de rodamiento;

2.7.2.6 Fisura por reflexión de junta

Se presentan sólo en pavimentos mixtos constituidos por una superficie asfáltica sobre un pavimento de concreto con juntas. Consiste en la propagación hacia la superficie asfáltica, de las juntas del pavimento de concreto. Como consecuencia, se observan en la superficie fisuras longitudinales y/o transversales, que tienden a reproducir las juntas longitudinales y transversales de las losas inferiores.

2.7.2.6.1 Posibles causas

Son ocasionadas principalmente por el movimiento de las losas de concreto, como resultado de cambios de temperaturas o cambios en los contenidos de humedad. Las grietas por reflexión se propagan dentro de la capa asfáltica, como consecuencia directa de una concentración de tensiones.

El tránsito puede producir la rotura de la capa asfáltica en la proximidad de las fisuras reflejadas, que resulta en peladuras y eventualmente baches.

Tabla VI. Niveles de severidad, fisuras y grietas

FISURAS Y GRIETAS			
TIPO DE FALLA	NIVELES DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIANO	ALTO
Piel de cocodrilo *	- Fisuras < 2 mm de ancho, escasa interconexión, los bordes sin despostillamiento.	- Fisuras < 5 mm de ancho, interconectadas, formando polígonos pequeños, moderado despostillamiento.	- Malla cerrada de pequeños polígonos, con despostillamientos de severidad moderada a alta.
Fisuras en Bloque *	- Ancho promedio 2 mm, despostillamiento menor. - Fisuras selladas satisfactorias, que no permiten la filtración de agua.	- Ancho promedio entre 2 y 5 mm, despostillamiento menor. - Selladas de manera insatisfactoria.	- Sin sellar ancho promedio 5 mm, presencia de despostillamientos severos.
Fisuras en Arco *	- Fisuras son de ancho promedio < 3 mm.	- Ancho promedio < 3mm y > 6 mm. - Área alrededor de fisuras se encuentra fracturada.	- Ancho promedio > 6 mm. - Área alrededor de fisuras se encuentra fracturada, en trozos removibles.
Fisura Transversal **	- Ancho promedio < 3 mm, sin ramificaciones. - Selladas, en condición satisfactoria.	- Sin sellar, ancho promedio entre 3 y 6 mm. - Sin sellar, promedio de ancho 6 mm, evidencian ramificaciones.	- Sin sellar, ancho promedio > 6 mm. - Cualquier fisura, con ramificaciones, moderadas a severas, con tendencia a formar una malla.
Fisura Longitudinal **	- Ancho promedio < 3 mm, sin ramificaciones. - Selladas, en condición satisfactoria.	- Sin sellar, ancho promedio entre 3 y 6 mm. - Sin sellar, promedio de ancho 6 mm, evidencian ramificaciones.	- Sin sellar, ancho promedio > 6 mm. - Cualquier fisura, con ramificaciones, moderadas a severas con tendencia a formar una malla.
Fisura por Reflexión de Junta	- Sin sellar, ancho promedio < 5 mm sin descascaramiento y despostillamiento.	- Sin sellar, ancho promedio entre 5 y 15 mm. - Selladas que evidencien leve despostillamiento de sus bordes.	- Sin sellar ancho promedio mayor a 15 mm. - Cualquier fisura con moderado a severo agrietamiento de la superficie, que evidencia rotura o desprendimiento del material asfáltico.

* Las fisuras se miden en metros cuadrados de superficie afectada, y cuando existen 2 ó 3 niveles de severidad; dentro de una misma área fallada que no se puedan identificar separadamente, se califica con la mayor severidad observada.

** Las fisuras se miden en metros lineales, si la fisura no tiene el mismo nivel de severidad en toda su extensión, cada porción debe ser registrada por separado.

Fuente: **Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes.** Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura.

2.7.3 Desintegración en los pavimentos asfálticos

2.7.3.1 Baches

Desintegración total de la superficie de rodadura, que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes y profundidades irregulares.

2.7.3.1.1 Posibles causas

Los baches se producen por conjunción de varias causas: fundaciones y capas inferiores inestables; espesores insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas. La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento y/o fundación, o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras tipo cuero de cocodrilo, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, que origina un bache.

2.7.3.2 Peladura

Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, que aumenta la textura del pavimento y expone cada vez más los agregados a la acción del tránsito y clima.

2.7.3.2.1 Posibles causas

Esta anomalía es indicativa de que el ligante se ha endurecido apreciablemente, ha perdido sus propiedades o bien que la mezcla asfáltica existente es de deficiente calidad, ya sea por un contenido de ligante insuficiente, empleo de agregados sucios o muy absorbentes, así como por deficiencias durante la construcción, especialmente en tratamientos superficiales bituminosos; frecuentemente se presenta como un desprendimiento de agregados en forma de estrías longitudinales, paralelas a la dirección del riego. El desprendimiento puede ser originado también en un proceso de descubrimiento por pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto, cuando actúan agentes agresivos, tales como solventes y otros derivados del petróleo, e inclusive por la acción del agua pluvial.

2.7.3.3 Desintegración de bordes

Consiste en la progresiva destrucción de los bordes del pavimento por la acción del tránsito. Se hace particularmente manifiesto en pistas con hombros no pavimentados, en las que existe una significativa porción de vehículos que acceden del hombro al pavimento o en el sentido contrario.

2.7.3.3.1 Posibles causas

La causa primaria es la acción localizada del tránsito, tanto por su efecto abrasivo, como por el poder destructivo de las cargas, sobre el extremo del pavimento donde la debilidad de la estructura es mayor, debido al menor confinamiento lateral, a la deficiente compactación del borde, etc.

La presencia de arenas angulosas sueltas, muy próximas a la pista, hace que aumente la abrasión de las llantas que ascienden y descienden del pavimento, que provocan peladuras severas que pueden conducir a la desintegración.

Tabla VII. Niveles de severidad de desintegración

DESINTEGRACIÓN EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS			
TIPO DE FALLA	NIVELES DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIANO	ALTO
BACHE **	<ul style="list-style-type: none"> - Profundidad < 2.5 cm y diámetro promedio de 70 a 100 cm. - Profundidad de 2.5 a 5.0 cm y diámetro < 70 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Profundidad de 2.5 a 5.0 cm y diámetro promedio de 70 a 100 cm. - Profundidad > 5.0 cm y diámetro promedio de 70 a 100 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Profundidad de 2.5 a 5.0 cm y diámetro > 100 cm.
PELADURA *	<ul style="list-style-type: none"> - Pequeñas peladuras superficiales, distribuidas en el pavimento. - Inicio de desprendimiento del agregado y/o ligante. 	<ul style="list-style-type: none"> - Extensivos desprendimientos de agregados pétreos finos y/o ligante, confieren a la superficie una textura abierta y rugosa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Extensivo desprendimiento de agregados pétreos gruesos y finos, confiere a la superficie una textura muy rugosa. - Presencia de oquedades de máximo 10 y 15 mm de diámetro y profundidad, respectivamente.
DESINTEGRACIÓN DE BORDES *	<ul style="list-style-type: none"> - Se observan fisuras paralelas al borde, sin signos de peladuras, desintegración y canales de erosión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se observan fisuras paralelas al borde y/o peladuras de cualquier tipo, sin llegar a la rotura o desintegración total. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desintegración total de los bordes, sectores removidos por el tránsito, que reduce el ancho de calzada.

* Se mide en metros cuadrados de superficie afectada, y cuando existen 2 ó 3 niveles de severidad dentro de una misma área fallada, que no se puedan identificar separadamente, se califica con la mayor severidad observada.

** Los niveles de severidad se han clasificado en función del área afectada y de la profundidad del bache.

Fuente: **Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes.** Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura.

2.7.4 Otros deterioros en los pavimentos asfálticos

2.7.4.1 Exudación del asfalto

Consiste en el afloramiento de un material bituminoso de la mezcla asfáltica a la superficie del pavimento, formando una película continua de ligante, que crea una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante el tiempo cálido.

2.7.4.1.1 Posibles causas

La exudación es causada por un excesivo contenido de asfalto en las mezclas asfálticas y/o sellos bituminosos. Ocurre en mezclas con un porcentaje de vacíos deficientes, durante épocas calurosas. El ligante dilata, llena los vacíos y aflora a la superficie, y deja una película de bitumen en la superficie. Dado que el proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, el asfalto se acumula en la superficie.

2.7.4.2 Parchados y reparaciones de servicios públicos

Un parche es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado, ya sea con material similar o diferente, para reparar el pavimento existente. También un parchado por reparación de servicios públicos es un parche que se ha ejecutado para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo.

Los parchados disminuyen el nivel de servicio del pavimento, y puede constituir un indicador la demanda de mantenimiento, así como de la necesidad de reforzar la estructura de la misma.

Generalmente las áreas parchadas tienen un comportamiento inferior al pavimento original y, en muchos casos, son el origen de una mayor rugosidad del pavimento, de nuevas fallas en el mismo o en el área adyacente, particularmente cuando su ejecución es defectuosa.

Tabla VIII. Niveles de severidad, otros deterioros

OTROS DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS			
TIPO DE FALLA	NIVELES DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIANO	ALTO
EXUDACIÓN DEL ASFALTO *	- Se hace visible la coloración algo brillante de la superficie, por el efecto de pequeñas migraciones de asfalto.	- Exceso de asfalto libre, que forma una película continua en las huellas de canalización del tránsito. - La superficie se torna pegajosa a los zapatos y neumáticos, en días cálidos.	- Cantidad significativa de asfalto libre, da a la superficie aspecto húmedo, intensa coloración negra. - Superficie pegajosa o adhesiva a los zapatos y neumáticos en días cálidos.
PARCHADOS Y REPARACIONES DE SERVICIOS PÚBLICOS *	- El parche se comporta satisfactoriamente, con poco o ningún deterioro.	- Parche moderadamente deteriorado alrededor de sus bordes.	- Parche severamente dañado; la severidad de estos daños indican una condición de falla, lo que indica como necesario el reemplazo del parche.

* Se mide en metros cuadrados de superficie afectada, y cuando existen 2 ó 3 niveles de severidad dentro de una misma área fallada, que no se puedan identificar separadamente, se califica con la mayor severidad observada.

Fuente: **Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes.** Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura.

3. EVALUACIÓN SUPERFICIAL CARPETA DE RODADURA PISTA PRINCIPAL AEROPUERTO LA AURORA (INVESTIGACIÓN DE CAMPO)

La evaluación superficial de un pavimento consiste en la definición del estado superficial de la vía, en este caso la pista, y su entorno; este último comprende todo tipo de obras o elementos auxiliares relacionados con el pavimento, que de manera directa o indirecta pueden afectar a la comodidad y seguridad del usuario.

Como resultado del examen superficial del pavimento, es posible obtener una importante serie de conclusiones:

1. Detectar el inicio de posibles fallas y determinar las posibles causas.
2. Establecer zonas prioritarias para la conservación.
3. Determinar la necesidad de una evaluación de tipo estructural para el diseño de refuerzos.
4. Presentar elementos de juicio, que permitan confirmar o modificar los criterios de diseño vigentes.

En efecto, los métodos modernos para el diseño de los pavimentos, como para el diseño de su rehabilitación, se fundamentan en un buen análisis.

La determinación de la condición o estado de la superficie de rodadura se basa en la evaluación funcional de la misma, que es la que interesa a los usuarios.

3.1 Evaluación funcional

La evaluación funcional está constituida por una inspección de calzada y por menciones de regularidad superficial. En la inspección de calzada, se debe tomar información sobre la geometría de la vía, los daños en calzada, zonas laterales y el estado de las obras de drenaje. La regularidad superficial se encuentra representada por las variaciones del perfil longitudinal de la calzada.

3.1.1 Inspección de calzada

Como complemento de la presente investigación, se ha tomado referencia de una inspección visual realizada por el Ing. Augusto René Pérez Méndez, a solicitud de la Dirección General de Aeronáutica Civil, durante noviembre del año 2001.

3.1.1.1 Geometría

La pista principal del aeropuerto internacional “La Aurora”, tiene las siguientes dimensiones:

- Longitud de pista de 2987 m.
- Ancho de pista de 60 m.

Zona de impacto aproximada:

- Longitud 500 m.
- Ancho 30 m.

La pista no posee hombros.

3.1.1.2 Drenajes

El sistema interno se abastece de la red de agua Municipal. La red de tuberías de 5" de diámetro es alimentada por bombeo hidroneumático desde un tanque subterráneo; este bombeo se realiza a través de una bomba principal y no tiene ninguna planta de tratamiento de agua potable.

3.1.1.2.1 Drenajes de aguas negras

Existe una red interna que recolecta las aguas servidas de los edificios de la terminal aérea y la Dirección de Aeronáutica Civil; esta red conduce el agua hasta el alcantarillado de la Municipalidad. En el área de hangares, algunos conectan sus aguas negras a la red municipal y otros construyen sus propias fosas sépticas. No existe ninguna planta de tratamiento para aguas negras en el aeropuerto.

3.1.1.2.2 Drenajes de aguas lluvias

Para la recolección de aguas lluvias se utiliza el sistema de reposaderas ubicadas a media distancia o al final de las pendientes de bombeo en las diferentes plataformas, estacionamientos, calles de rodaje y propiamente de la pista principal. Al igual que el sistema de agua potable, la red de aguas lluvias interna conecta a la red Municipal.

3.1.1.3 Daños en la calzada

Existen varios métodos para determinar y cuantificar los daños en una calzada; todos éstos están fundamentados en una inspección visual y cálculos relativamente sencillos.

En términos generales, estos daños pueden ser agrupados en fisuras o grietas y deformaciones, que se han tratado ampliamente en el capítulo anterior.

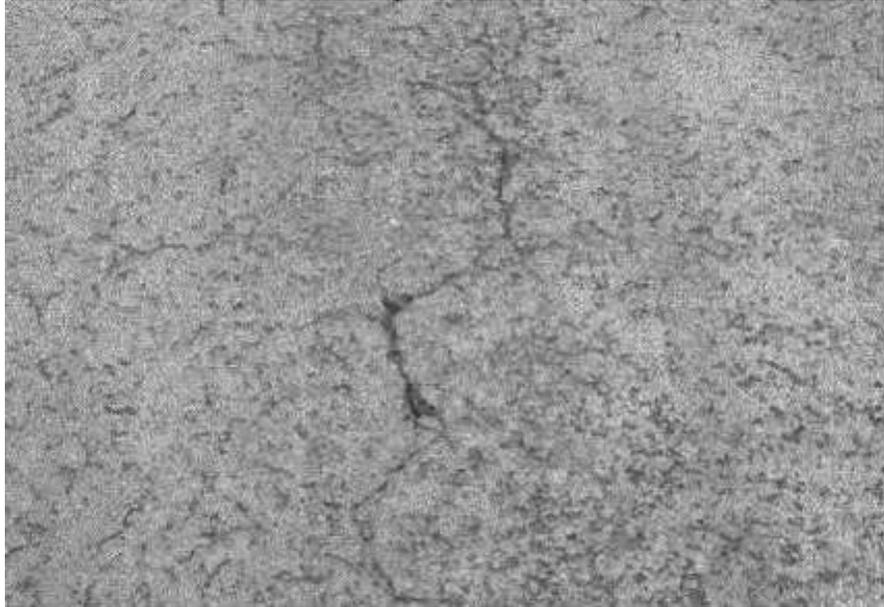
3.1.2 Identificación y descripción de fallas visibles

Se pudieron identificar en la pista de aterrizaje las fallas que se describen a continuación:

- **Pérdida de finos.** Entre el 90% y 95% del total de la pista de aterrizaje denota la pérdida de los finos en la capa de rodadura de asfalto, que muestra un desgaste en los agregados pétreos (figura 3).
- **Desprendimiento de agregados.** Entre el 2% y 3% del área total de la pista, presenta desprendimiento de los agregados, los cuales, si no se tratan de inmediato, se convertirán en baches (figura 4).
- **Baches.** Existen un número reducido de baches, que deben ser tratados de inmediato para evitar el deterioro de la carpeta de rodadura de asfalto de mezcla en caliente (figura 5).
- **Fisuras y grietas.** La pista presenta fisuras longitudinales y transversales, que deben ser selladas adecuadamente con el propósito de que no se conviertan en baches (figuras 6 y 7).
- **Fisura piel de cocodrilo.** En un área reducida (figura 8).

Para mejor ilustración de las fallas localizadas en la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional “La Aurora”, se presentan a continuación algunas fotografías:

Figura 3. Pérdida de finos



Fuente: Pista de aterrizaje y despegue del Aeropuerto Internacional de Guatemala, La Aurora.

Figura 4. Desprendimiento de agregados



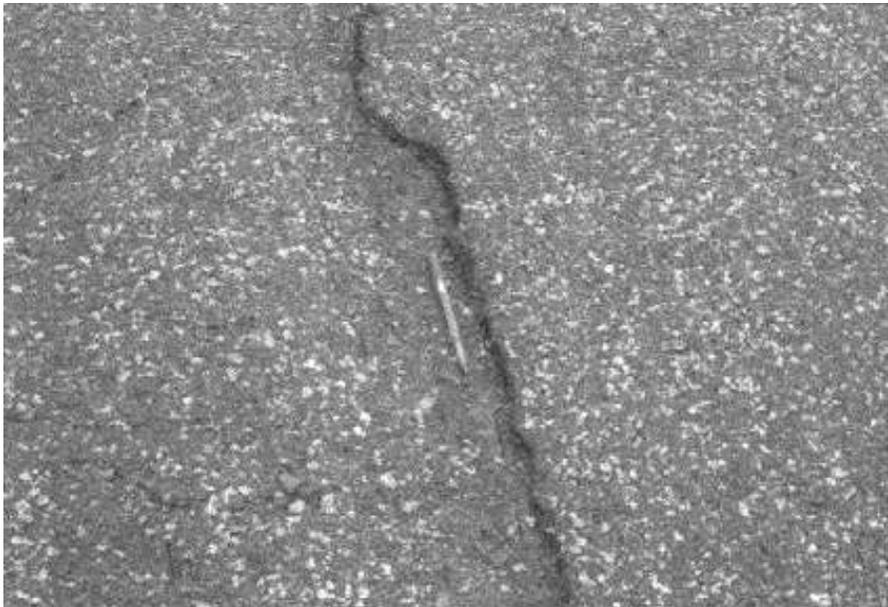
Fuente: Pista de aterrizaje y despegue del Aeropuerto Internacional de Guatemala, La Aurora.

Figura 5. Baches



Fuente: Pista de aterrizaje y despegue del Aeropuerto Internacional de Guatemala, La Aurora.

Figura 6. Fisura longitudinal



Fuente: Pista de aterrizaje y despegue del Aeropuerto Internacional de Guatemala, La Aurora.

Figura 7. Fisura transversal



Fuente: Pista de aterrizaje y despegue del Aeropuerto Internacional de Guatemala, La Aurora,

Figura 8. Fisura piel de cocodrilo



Fuente: Pista de aterrizaje y despegue del Aeropuerto Internacional de Guatemala, La Aurora.

3.2 Diagnóstico evaluación funcional

Durante la inspección visual realizada a la pista de aterrizaje del aeropuerto “La Aurora”, se observó lo siguiente:

- a. No se observaron deformaciones, las cuales son consecuencia de fallas o problemas en el suelo de fundación o sub-rasante, que está frecuentemente presente en aquellos casos en que los esfuerzos aplicados sobre la sub-rasante sobrepasan el valor soporte del suelo.
- b. El tipo de fallas observadas, en su mayoría, corresponden al grupo de fisuras y grietas en la superficie, que están asociadas a la fatiga de la capa de rodadura; su evolución más frecuente son los baches o huecos en la calzada.

La formación de fallas en el pavimento del aeropuerto podría afectar severamente la integridad estructural, calidad de rodamiento y seguridad de la pista. Para aliviar los efectos de las fallas e incrementar la serviciabilidad del pavimento, debe adoptarse un programa de mantenimiento efectivo y a tiempo, así como procedimientos de reparación adecuados.

Sin embargo, debe considerarse que en todos los casos de fallas en los pavimentos, el primer paso en la rehabilitación de un pavimento, debe ser, determinar las causas de éstas. Por esa razón se ha realizado la evaluación estructural de la carpeta de rodadura, cuyo estudio se presenta ampliamente en el siguiente capítulo de esta investigación.

4. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CARPETA DE RODADURA DE LA PISTA PRINCIPAL DEL AEROPUERTO LA AURORA

Esta evaluación tiene por objeto determinar la estructura de la carpeta de rodadura existente, así como, conocer su comportamiento bajo la acción de las cargas.

En el caso de esta investigación, la evaluación estructural se realizó por medio del método Marshall. A continuación, se presenta un detalle de las principales características de dicho método.

4.1 Método Marshall para diseño de mezclas asfálticas

El método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación, desarrollado por Bruce Marshall, Ingeniero de bitúmenes del departamento de carreteras del estado de Mississippi, surgió de una investigación iniciada por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos en 1,943.

El propósito del método es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío, que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. Es utilizado para la dosificación y control de mezclas en caliente de agregados y asfalto.

Los datos mas importantes del diseño de mezclas del método Marshall son:

1. El análisis de la relación Vacíos-Densidad
2. La prueba de Estabilidad-Flujo.

4.2 Descripción método Marshall de diseño de mezclas

Los procedimientos, en el diseño Marshall de mezclas, deben adecuarse a la Norma AASHTO T245, ó ASTM D 1559, así como determinar las cualidades que debe poseer la mezcla de pavimentación:

- Estabilidad
- Durabilidad
- Trabajabilidad
- Resistencia al deslizamiento

Y seleccionarse un tipo de agregado y un tipo de emulsión, que puedan combinarse para producir dichas cualidades.

4.3 Probetas del ensayo Marshall

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall, que permiten determinar las propiedades de la mezcla:

- Determinación del peso específico total
- Medición de la estabilidad y fluencia Marshall
- Análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas

4.3.1 Determinación del peso específico total

Éste se determina en cada probeta. La medición del peso específico es esencial para un análisis preciso de Densidad-Vacíos, el cual se determina usando el procedimiento de la norma AASHTO T 166.

4.3.2 Ensayos de estabilidad y fluencia

Este ensayo está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall, y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

4.3.2.1 Estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga, bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan y la carga sobre la briqueta aumenta, al igual que la lectura en el indicador (ver Figura No. 9). Luego se suspende la carga, una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall. La estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación.

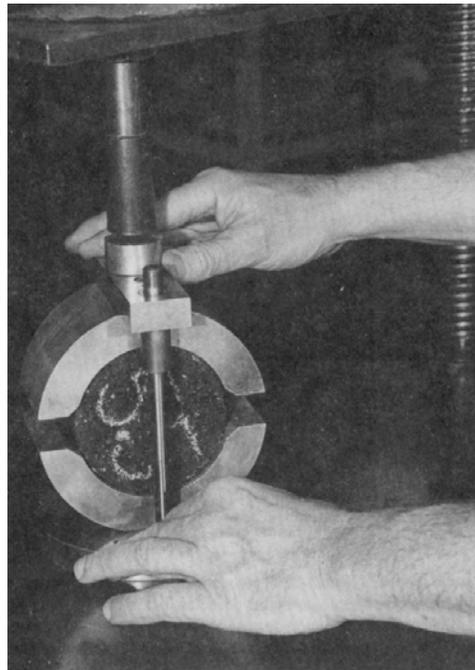
Existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor mas alto será mucho mejor. Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, éste no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a un costo de menor durabilidad.

4.3.2.2 Fluencia Marshall

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta, que ocurre durante el ensayo Marshall. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas, que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall, son consideradas demasiado frágiles y rígidas, para un pavimento en servicio. Aquellas mezclas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito.

Figura 9. Equipo para estabilidad de Marshall



Fuente: **Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.** Serie de manuales No. 22 ((MS-22), Instituto de Asfalto.

4.3.3 Análisis de densidad y vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar el análisis de densidad y vacíos, para cada serie de probetas de prueba, con el propósito de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

4.3.3.1 Análisis de vacíos

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado, para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado; o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

4.3.3.2 Análisis de peso unitario

El peso unitario promedio para cada probeta, se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 kg/m^3 (62.4 lb/ft^3).

4.3.3.3 Análisis de vacíos en el agregado mineral (VMA)

Están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de probeta, que incluye los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA, puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

4.3.3.4 Análisis de vacíos llenos de asfalto (VFA)

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA), que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA, se calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego se divide por el VMA, y se expresa el valor final como un porcentaje.

4.3.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto

De acuerdo con el criterio de diseño Marshall del Instituto del Asfalto, la determinación del contenido de asfalto óptimo se basa principalmente en los vacíos de la mezcla.

El óptimo contenido asfáltico debe ser tal, que los vacíos en la probeta sean de 3 a 5%, y que se cumplan las condiciones específicas, según el tipo de tránsito de:

- **Estabilidad y fluencia:** para asegurar que la mezcla no sufrirá deformación.
- **Vacíos en el agregado mineral:** para asegurar suficiente espacio en el agregado para alojar el asfalto.

- **Vacíos llenos de asfalto:** para asegurar la durabilidad de la mezcla.

1. Se determina el contenido de asfalto, para el cual el contenido de vacíos es de 4%.
2. Se evalúan todas las propiedades calculadas y medidas para éste contenido de asfalto, y se compara con los criterios de diseño (tabla IX y X).
3. Si se cumplen todos los criterios, éste es el contenido de diseño de asfalto que debería poseer la mezcla. Si no se cumplen los criterios, será necesario hacer algunos ajustes o volver a diseñar la mezcla.

Tabla IX. Criterios del Instituto del Asfalto (U.S.A.) para el diseño Marshall

Criterios para mezcla del método Marshall	Tránsito liviano		Tránsito mediano		Tránsito pesado	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta.	35		50		75	
Estabilidad (N)	3336		5338		8006	
(lb)	(750)	---	(1200)	---	(1800)	---
Flujo, 0.25 mm (0.01 pulgadas)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	ver tabla 10.					
Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)	70	80	65	75	65	75

NOTAS

1. Todos los criterios y no sólo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayan a 60°C, se consideraran satisfactorias, si cumplen los criterios cuando se ensayan a 38°C, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas, puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.
2. Clasificación del tránsito
 - Liviano que son condiciones de tránsito que resultan en un EAL de diseño < 104
 - Mediano que son condiciones de tránsito que resultan en un EAL de diseño entre 104 y 106
 - Pesado que son condiciones de tránsito que resultan en un EAL de diseño > 106
3. Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberían aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo tránsito.
4. Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.
5. Cuando se este calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.
6. El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado, con base en el peso específico total ASTM del agregado.

Fuente: **Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.** Serie de manuales No. 22 ((MS-22). Instituto del Asfalto.

Tabla X. Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA)

Tamaño máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
Porcentaje		Vacíos de diseño, por ciento		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.6	22.5	23.5
2.36	No. 6	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

1. Especificación Normal para Tamaños de Tamices usados en Pruebas ASTM E 11 (AASHTO M 52).

2. El tamaño máximo nominal de partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene mas del 10 por ciento del material.

3. Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño, que se encuentren entre los que están citados.

Fuente: **Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.** Serie de manuales No. 22 ((MS-22)". Instituto del Asfalto.

4.4. Ensayo por método Marshall aplicado a la carpeta de rodadura del aeropuerto La Aurora

4.4.1 Investigación de campo

De la carpeta de rodadura de la pista de aterrizaje y despegue, se procedió a extraer una muestra de 0.40 x 0.40 m y 0.08 m de altura, del extremo identificado como Sur-01 y otra muestra con las mismas dimensiones del extremo Norte 1-9 (figura 12) , para su evaluación, por medio del método Marshall, el cual como se da a conocer en el presente capítulo, permite determinar la capacidad estructural de cualquier diseño de mezcla asfáltica.

Debe observarse que las muestras se tomaron de los extremos de la pista, por considerar que de esta forma se obtendrían los resultados más representativos del diseño de mezcla inicial de la carpeta de rodadura, ya que dichos puntos son los que se encuentran menos sometidos al impacto de las cargas.

Por medio del método de diseño Marshall, fue posible determinar las siguientes características de la carpeta de rodadura:

1. Porcentaje residual de asfalto
2. Granulometría
3. Estabilidad y fluencia Marshall
4. Densidad en campo y densidad en laboratorio.

A continuación, se presenta un detalle de los procedimientos realizados para obtener dichos resultados.

4.4.2 Descripción de ensayos

4.4.2.1 Porcentaje residual de asfalto

- a) Las muestras fueron limpiadas cuidadosamente, para eliminar residuos de otros materiales que se hubiesen agregado a las mismas durante su extracción, y de esa manera reducir la posibilidad de alteración de los resultados de laboratorio.
- b) Se procedió a desintegrar las muestras exponiéndolas a una temperatura aproximada de 280 ° a 330° F, ya que éstos son los rangos de temperatura, en que se debe manejar una mezcla en caliente, en el momento de ser aplicada en campo.
- c) De cada una de las muestras, se tomó una cantidad aproximada a 1000 gramos para ser procesada en la máquina centrífuga, durante aproximadamente 20 minutos, aplicándole un solvente, para determinar el porcentaje residual en la mezcla y separarlo del material pétreo.

4.4.2.2 Granulometría de la mezcla

- a) Las muestras de 1000 gramos utilizadas en la máquina centrífuga para la determinación del % residual de asfalto, después de haberles aplicado el solvente, se procedió a lavarlas a través del tamiz No. 200 (0.075 mm), para remover cualquier polvo mineral que estuviera cubriendo el agregado y posteriormente se secaron para calcular su granulometría.

- b) Estas muestras permanecieron en la máquina de Los Ángeles durante aproximadamente 15 minutos. Cabe mencionar que éste ensayo no debería durar más tiempo, para evitar la degradación del material pétreo.
- c) Posteriormente se procedió a pesar los materiales retenidos por los tamices, y de esta forma determinar la granulometría.

4.4.2.3 Estabilidad y fluencia Marshall

- a) De las muestras que fueron desintegradas a una temperatura aproximada de 330°F, se formaron tres pastillas de la extracción Sur-01 y tres pastillas del extremo Norte 1-9.
- b) Las pastillas Marshall se realizaron con una cantidad aproximada de 1000 gramos cada una compactando la misma con 75 golpes de cada lado para aproximarse a la densidad (compactación) máxima obtenida en el pavimento bajo tránsito. Las dimensiones de las pastillas Marshall, que se formaron, fueron de 10 cm. de diámetro y aproximadamente 6.5 cm. de altura.
- c) Las pastillas Marshall fueron enfriadas para ser posteriormente ensayadas.
- d) Previo al ensayo de las pastillas en el aparato Marshall, las muestras debieron ser calentadas en baño María, a una temperatura aproximada de 60°F; esta temperatura representa normalmente la temperatura más alta que un pavimento en servicio puede experimentar, por las condiciones climáticas en campo.

- e) Posteriormente las probetas fueron removidas del baño María, secadas y colocadas rápidamente en el aparato Marshall (figura 9), que como se observa consiste en un dispositivo que aplica carga sobre la probeta y posee unos medidores de carga (estabilidad) y deformación (fluencia). La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto, hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.

4.4.2.4 Densidad

- a) Para el cálculo de la densidad, se procedió a realizar el cálculo de los pesos secos y pesos húmedos de dos porciones de las muestras extraídas, antes de ser desintegradas, para determinar su densidad en campo.

- d) De las pastillas Marshall que se realizaron, se procedió a realizar de la misma manera los cálculos, para determinar la densidad en laboratorio. Con esto es posible determinar el porcentaje de compactación que posee la carpeta de rodadura.

4.4.3 Resultados obtenidos

Se presenta una breve descripción referencial para facilitar la comprensión de los cálculos realizados, y así obtener los resultados que se presentan en el reporte de los ensayos de laboratorio (ver apéndice).

Debe tomarse en cuenta que estos cálculos son aplicables de la misma manera, para las dos muestras extraídas de la carpeta asfáltica del aeropuerto.

4.4.3.1 Porcentaje residual de asfalto

P.B.M.	=	Peso Bruto Muestra (gramos)
P.T.	=	Peso Tara (gramos)
P.N.M.	=	Peso Neto Muestra (gramos)
P.P.A.	=	Peso papel antes de ser introducido a la máquina centrífuga (gramos).
P.P.D.	=	Peso papel después de haber sido ensayada la muestra (gramos).
P.E.	=	Peso Extraído (gramos)
P.B.E.	=	Peso Bruto Extraído (gramos)
P.N.E.	=	Peso Neto Extraído (gramos)
DIF.	=	P.N.M. – P.N.E.

Determinación del % residual de asfalto

$$P.B.E. = P.E. + P.P.D.$$

$$P.N.E. = P.B.E. - (P.T. + P.P.A.)$$

$$DIF. = P.N.M. - P.N.E.$$

$$\% \text{ Residual de Asfalto} = \frac{DIF.}{P.N.M.} * 100$$

Muestra sur 01

Aplicando las fórmulas descritas anteriormente, se obtuvieron los resultados siguientes:

$$\begin{aligned} 1. \quad \text{P.B.E.} &= 902.50 + 11.53 \\ \text{P.B.E.} &= 914.03 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \quad \text{P.N.E.} &= 914.03 - (220.93 + 10.86) \\ \text{P.N.E.} &= 682.24 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \quad \text{DIF.} &= 722.97 - 682.24 \\ \text{DIF.} &= 40.73 \end{aligned}$$

$$4. \quad \% \text{ Residual de asfalto} = \frac{40.73}{722.97} * 100$$

$$\% \text{ Residual de asfalto} = 5.63$$

Muestra norte 1.9

$$\% \text{ Residual de asfalto} = 4.91$$

4.4.3.2 Granulometría

Muestra sur 01

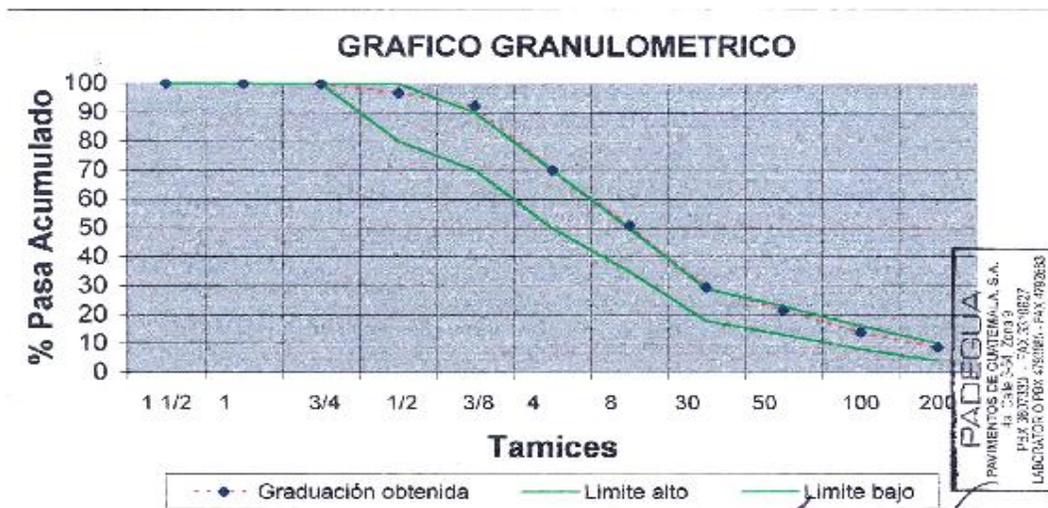
Se encuentra entre los límites de una granulometría tipo III, para tráfico pesado, de la clasificación establecida por la ISSA, *International Slurry Surfacing Association* o Asociación Internacional de Recubrimientos con Morteros (cuadro XVII).

Tabla XI. Graduación muestra sur 01

TAMIZ	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	4	8	30	50	100	200
Graduación Obtenida	100.00	100.00	100.00	96.89	92.30	70.10	50.96	29.66	21.53	13.89	8.61
Límite Alto	100	100	100	100	90	70	50	29	23	16	10
Límite Bajo	100	100	100	80	70	50	35	18	13	8	4

Fuente: Ensayos realizados en laboratorio de la empresa Pavimentos de Guatemala, PADEGUA.

Figura 10. Gráfico granulométrico carpeta asfáltica aeropuerto (muestra sur 01)



Fuente: Ensayos realizados en laboratorio de la empresa Pavimentos de Guatemala, PADEGUA.

Muestra norte 1.9

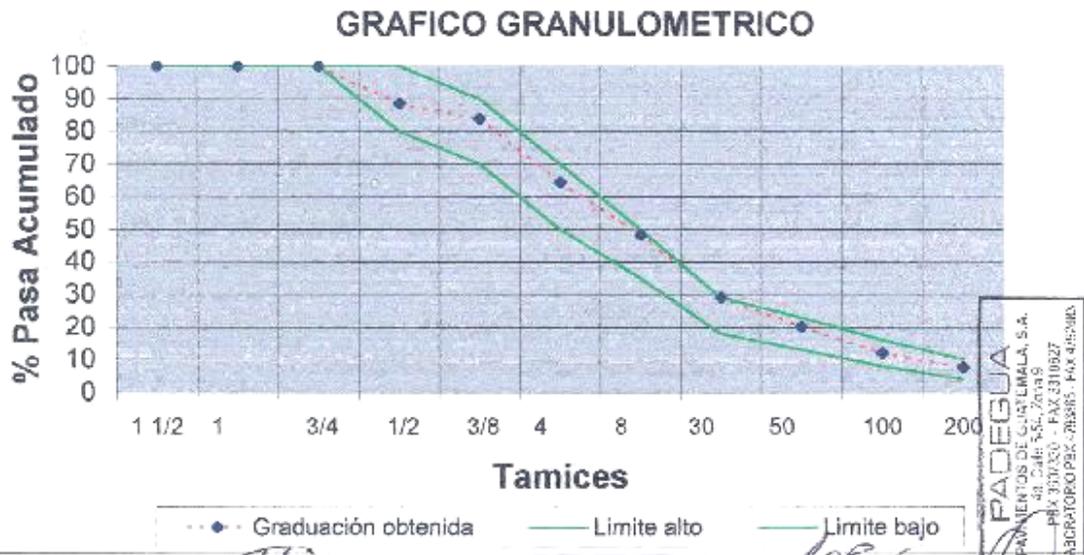
De igual manera, la muestra norte se encuentra dentro de los límites de la granulometría tipo III de la ISSA. Sin embargo, debe observarse la inclinación de la gráfica hacia los límites finos.

Tabla XII. Graduación muestra norte 1.9

TAMIZ	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	4	8	30	50	100	200
Graduación Obtenida	100.00	100.00	100.00	88.64	83.95	64.46	48.26	29.11	20.20	12.08	7.61
Límite Alto	100	100	100	100	90	70	50	29	23	16	10
Límite Bajo	100	100	100	80	70	50	35	18	13	8	4

Fuente: Ensayos realizados en laboratorio de la empresa Pavimentos de Guatemala, PADEGUA.

Figura 11. Gráfico granulométrico carpeta asfáltica aeropuerto (muestra norte 1.9)



Fuente: Ensayos realizados en laboratorio de la empresa Pavimentos de Guatemala, PADEGUA.

Tabla XIII. Composición de mezclas tipo IV, del Instituto del Asfalto

Mezcla No.	Iva	Ivb	Ivc	Ivd
Uso Recomendado	Superficie	Superficie	Superficie o sub-base	Sub-base o base
Tamaño de Tamiz	Porcentaje que pasa			
1 1/2"				100
1"			100	80 - 100
3/4"		100	80 - 100	70 - 90
1/2"	100	80 - 100
3/8"	80 - 100	70 - 90	60 - 80	55 - 75
No. 4	55 - 75	50 - 70	48 - 65	45 - 62
No. 8	35 - 50	35 - 50	35 - 50	35 - 50
No. 30	18 - 29	18 - 29	19 - 30	19 - 30
No. 50	13 - 23	13 - 23	13 - 23	13 - 23
No. 100	8 - 16	8 - 16	7 - 15	7 - 15
No. 200	4 - 10	4 - 10	0 - 8	0 - 8
1. Contenido de asfalto: De 3.5 a 7.0% por peso total de la mezcla 2. Limitaciones de tráfico: Ninguna 3. Textura de superficie: Medio a fino.				

Fuente: "Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales No. 22 ((MS-22), Instituto del Asfalto.

4.4.3.3 Estabilidad y fluencia Marshall

El valor de la carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia Marshall. Se realizó el ensayo Marshall a dos pastillas elaboradas de cada muestra, para obtener un valor promedio que permita acercarse lo más posible a la realidad. Dichos valores son obtenidos directamente de los medidores del aparato Marshall (ver apéndice).

Muestra sur 01

Tabla XIV. Estabilidad Marshall (muestra sur 01)

No. Pastilla	% Asfalto	Lectura micrometros	Libras	Volumen pastilla	Corr.	Libras Corr.	Estab. Prom.	Flow (Fluencia)	Prom. Flow
1	5.63	440	3308	493.00	1.09	3605	3605	15.00	15
2	5.63	440	3308	494.00	1.09	3605		15.00	

Fuente: Ensayos realizados en laboratorio de la empresa Pavimentos de Guatemala, PADEGUA.

Estabilidad Marshall = 3,605 lbs.

Fluencia Marshall = 15.05

Muestra norte 1.9

Tabla XV. Estabilidad Marshall (muestra norte 1.9)

No. Pastilla	% Asfalto	Lectura micrometros	Libras	Volumen pastilla	Corr.	Libras Corr.	Estab. Prom.	Flow (Fluencia)	Prom. Flow
1	4.91	420	3159	537.40	0.93	2937	2903	7.0	6.8
2	4.91	410	3084	537.50	0.93	2868		6.5	

Fuente: Ensayos realizados en laboratorio de la empresa Pavimentos de Guatemala, PADEGUA.

Estabilidad Marshall = 2,903 lbs.

Fluencia Marshall = 6.8

4.4.3.4 Densidad de la carpeta asfáltica

P.N.P.	=	Peso Neto de la Pastilla
P.en H ₂ O	=	Peso en el agua
V.P.	=	Volumen de pastilla
D _{Max.}	=	Densidad máxima de compactación
D _{Campo}	=	Densidad en campo
D _{Lab}	=	Densidad en laboratorio

Determinación de la densidad máxima

$$V.P. = P.N.P. - P.en H_2O$$

$$\text{Densidad} = \frac{P.N.P.}{V.P.}$$

$$D_{Max.} = \frac{D_{\text{Promedio campo}}}{D_{\text{Promedio Lab}}}$$

Muestra sur 01

Densidad en laboratorio

$$V.P. = 1132.50 - 639.50$$

$$V.P. = 493$$

$$D_{Lab1} = \frac{1132.50}{493}$$

$$D_{Lab1} = 2.29$$

$$D_{Lab2} = 2.30$$

$$D_{\text{Promedio Lab.}} = 2.29$$

Densidad en campo

$$D_{\text{Campo1}} = 2.27$$

$$D_{\text{Campo2}} = 2.29$$

$$D_{\text{Promedio campo}} = 2.28$$

$$\text{Densidad máxima} = \frac{D_{\text{Promedio campo}}}{D_{\text{Promedio Lab.}}}$$

$$D_{\text{Máxima}} = \frac{2.28}{2.29} = 99.6 \%$$

Muestra norte 1.9

$$\text{Densidad máxima} = \frac{D_{\text{Promedio campo}}}{D_{\text{Promedio Lab.}}}$$

$$D_{\text{Máxima}} = \frac{2.205}{2.09} = 105.5 \%$$

4.4.4 Análisis de los resultados

4.4.4.1 Porcentaje residual de asfalto

El porcentaje residual de asfalto en la carpeta se encuentra dentro de los límites permisibles, según el Instituto de Asfalto (cuadro XIII), de lo cual se deduce que la cantidad de asfalto en la mezcla conserva sus propiedades de cohesión y cumple con su función de impermeabilizador.

4.4.4.2 Granulometría de la mezcla

La granulometría determinada en las muestras se encuentra dentro de los límites del tipo III de la ISSA, *International Slurry Surfacing Association* o Asociación Internacional de Recubrimientos con Morteros, para tráfico pesado. Sin embargo, debe observarse que existe diferencia entre los resultados obtenidos de las dos muestras; se considera que ésta variación de los resultados se debe a lo siguiente:

1. Durante la extracción de la muestra Sur 01, se observó que debajo de la misma existe otra capa asfáltica, que corresponde a uno de los recapeos anteriores; ésta muestra pudo extraerse sin fraccionarse. Cabe mencionar que se observó una leve segregación en la misma, lo que significa la acumulación de agregados gruesos en la parte baja de la muestra, mientras que en la parte próxima a la superficie se observó un mayor porcentaje de agregados finos; este tipo de segregación generalmente es ocasionado durante la aplicación de la mezcla, cuando quienes aplican la mezcla eliminan de la superficie los agregados gruesos, para obtener una superficie mas lisa, sin embargo, alteran la granulometría de diseño.

2. Durante la extracción de la muestra Norte 1.9, se observó que ésta se encontraba sobre un suelo con material talpetate y agregados gruesos, del cual se adhirieron algunas partículas a la muestra extraída; dicha muestra fue extraída en dos partes de aproximadamente 0.04 m cada una; esto es debido a que probablemente la aplicación se haya realizado en dos capas. En esta muestra, se observó menos segregación en la mezcla.

De lo anterior, se puede considerar que los resultados que más se aproximan al diseño real de granulometría en la mezcla son los que refleja la muestra sur 01, que se aproxima al límite fino de una muestra tipo III, ya que la muestra norte 1.9, contiene algunos agregados del suelo base.

4.4.4.3 Estabilidad y fluencia Marshall

Como lo reflejan los resultados de los ensayos en laboratorio, los valores de estabilidad y fluencia Marshall de la carpeta asfáltica están dentro de las normas establecidas por el Instituto de Asfalto (cuadro IX), por lo que no se observan deformaciones en la carpeta asfáltica, lo cual concuerda con el diagnóstico de la evaluación superficial de la carpeta asfáltica.

4.4.4.4 Densidad

La carpeta asfáltica posee suficiente densidad, según los resultados de la compactación en campo y laboratorio. Es importante mencionar que durante el procedimiento para el ensayo de compactación de la muestra Norte 1.9, que como se mencionó anteriormente, fue extraída en dos partes; la densidad de campo solamente fue calculada a una de las partes, mientras que debió hacerse a las dos partes extraídas para calcular así un promedio y obtener un valor más aproximado a la realidad. Por eso, se considera que el valor de compactación que más refleja el estado actual de la carpeta es el obtenido de la muestra sur 01 de 99.6%.

4.4.5 Diagnóstico

De los resultados de laboratorio obtenidos de las características de la estructura de la carpeta asfáltica de la pista de aterrizaje y despegue del aeropuerto internacional “La Aurora”, se observa lo siguiente:

1. La mezcla asfáltica, aplicada a la pista del aeropuerto, corresponde a una mezcla tipo IVb (cuadro XIII).
2. Las propiedades de estabilidad, fluencia, proporciones de ligante y densidad de la mezcla están dentro de las normas establecidas por el Instituto de Asfalto, lo cual ha evitado deformaciones en la carpeta asfáltica.
3. Su granulometría se encuentra dentro de los límites establecidos, muy próxima hacia el límite de los finos, y se observó un leve porcentaje de segregación que puede ser ocasionado durante la aplicación de la mezcla.
4. Las fallas localizadas en la pista son asociadas con la fatiga de la misma, ya que según información proporcionada por autoridades del aeropuerto, la carpeta asfáltica evaluada corresponde a un recapeo aplicado durante el año 1,996, lo cual indica que tiene como mínimo 7 años en servicio. Esto sobrepasa el parámetro de 5 años, durante el cual se considera que una carpeta asfáltica presta su servicio bajo óptimas condiciones estructurales.

De lo anterior se deduce que aun cuando las propiedades estructurales del diseño de mezcla de la carpeta asfáltica de la pista del aeropuerto cumple con las normas establecidas, las fallas localizadas reflejan la fatiga de la misma y la necesidad de una reparación pronta.

Los resultados obtenidos representan las características estructurales de los extremos de la pista, los cuales no están sometidos al mismo volumen de tráficos de la zona de impacto, por lo que los resultados en la zona de impacto, se considera que tienen una variación debido a la intensidad y frecuencia de cargas, que es un factor que determina el deterioro de los pavimentos.

Las reparaciones deben ser realizadas tempranamente, aunque se considere que las fallas son menores, ya que la demora en la reparación de los pavimentos sólo permite que la falla menor se convierta en una de mayores proporciones.

5. ALTERNATIVAS DE RESTAURACIÓN PARA LA CARPETA DE RODADURA

5.1 Tratamientos asfálticos superficiales

Los tratamientos asfálticos superficiales representan una alternativa económica, fácil de colocar y de larga duración. Todos ellos sellan y agregan años de servicio a las superficies de los caminos, pero cada tipo de tratamiento tiene uno o más propósitos específicos. Un tratamiento de superficie no es un pavimento, sino una técnica de mantenimiento económicamente efectiva, que permite prolongar la vida de servicio del pavimento.

Este tipo de tratamiento se emplea como capa de desgaste; resiste la abrasión del tráfico y actúa como sello para la estructura inferior, y agrega poca resistencia estructural, razón por la cual no debe considerarse como parte estructural del pavimento.

El término mortero asfáltico, define a varios tratamientos utilizados en la conservación de pavimentos como son:

- Mortero asfáltico
- Mortero asfáltico modificado con polímeros
- Micro-pavimentos

5.1.1 Mortero asfáltico

Es la mezcla de agregados, emulsión asfáltica, agua, relleno mineral y aditivos debidamente proporcionados, mezclados y esparcidos sobre una superficie apropiadamente preparada.

5.1.2 Mortero asfáltico modificado con polímeros

Es un mortero asfáltico diseñado con una emulsión que ha sido modificada con polímeros, cuyo objetivo es mejorar una o más propiedades del mortero, bajo requerimientos particulares. Modificando las emulsiones, se mejora la liga entre el asfalto y los agregados, con lo cual se obtiene más durabilidad y mejor textura en el mortero asfáltico.

5.1.3 Micro-pavimento

Es la mezcla de una emulsión catiónica modificada con polímeros, agregados triturados, agua, relleno mineral y otros aditivos, apropiadamente proporcionados y esparcidos sobre una superficie preparada. Los micro-pavimentos se pueden aplicar en espesores de una sola capa o multicapas, en proyectos de recuperación de ahuellamiento y repavimentación.

Los criterios normativos, para la aplicación de los diferentes tratamientos con mortero asfáltico, se basan de acuerdo con el volumen y tipo de tráfico, según se indica en el siguiente cuadro.

Tabla XVI. Volumen y tipo de tráfico

TRATAMIENTO	GRANULOMETRÍA	VOLUMEN			VELOCIDAD	
		LIVIANO-MEDIO	MEDIO-PESADO	PESADO-MUY PESADO	BAJA	ALTA
Mortero asfáltico	Tipo II*	X			X	
	Tipo III	X				X
Mortero asfáltico modificado con polímeros	Tipo II*		X		X	
	Tipo III		X			X
Micro-pavimento	Tipo II*			X	X	
	Tipo III			X		X

* Recomendado también para su aplicación en aeropuertos.

Fuente: **Mortero asfáltico, slurry seal.** Gustavo Rivera E., editorial Alfaomega 1997.

Con base en estos aspectos, recientemente se ha considerado a los micro-pavimentos, uno de los más recomendados para su aplicación en aeropuertos, por lo que se realiza una exposición detallada de esta técnica, para que sea considerada como una alternativa en el mejoramiento y reparación de la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional “La Aurora”, que es el objeto de esta investigación.

5.1.3.1 Tratamiento superficial con micro-pavimento

El micro-pavimento aprobado con norma ISSA A143 de la *International Slurry Surfacing Association* o Asociación Internacional de Recubrimientos con Morteros, se define como la mezcla compuesta por emulsión asfáltica catiónica modificada con polímeros, agregados pétreos triturados con granulometría definida, relleno mineral, agua y aditivos retardadores de ruptura; todo esto es proporcionalmente mezclado de acuerdo con el diseño de mezcla, que define la fórmula maestra de obra. Esta mezcla, aplicada como superficie de desgaste sobre pavimentos, es producida, esparcida y uniformemente distribuida por una máquina especialmente diseñada para este propósito, la misma que deberá adherirse firmemente sobre una capa de rodadura previamente preparada, y así

lograr resistencia al agrietamiento e incremento de rugosidad, además de las propiedades de impermeabilidad y antideslizantes, durante todo el tiempo de vida.

El objeto de la utilización de polímeros en mezclas de micro-pavimentos es reducir la susceptibilidad del ligante a los cambios térmicos en la vía, que permiten rendimientos más elevados que en morteros asfálticos, por lo que se utilizan en proyectos de recuperación de ahuellamiento y repavimentación de vías de alto tráfico.

Las aplicaciones de micro-pavimentos no requieren de riegos de liga o adherencia, excepto sobre pavimentos rígidos.

5.1.3.1.1 Materiales

Para obtener tratamientos de superficie de alta calidad y durabilidad, los componentes deben cumplir con normas de calidad establecidas .

5.1.3.1.1.1 Agregados

Los agregados deben cumplir con un óptimo control de calidad, para obtener una aplicación de alto rendimiento con micro-pavimentos; el proceso de trituración y manejo incluirá un control en la granulometría, fracturación de caras, limpieza del material y el equivalente de arena. Los agregados deben ser 100 % triturados, sin fluctuaciones drásticas en su granulometría, que afecten el diseño de la mezcla previamente aprobado.

La Asociación Internacional de Recubrimientos con Morteros (ISSA), describe dos granulometrías estándar, que han sido diseñadas según la estructura existente, tráfico y condiciones climatológicas en el área de aplicación.

Tabla XVII. Granulometría ISSA de los agregados

TAMAÑO DEL TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA		
	TIPO I	TIPO II	TIPO III
3/8 (9.50mm)	100	100	100
No. 4 (4.75mm)	100	90-100	70-90
No. 8 (2.36mm)	90-100	65-90	45-70
No. 16 (1.18mm)	65-90	45-70	28-50
No. 30 (0.60mm)	45-65	30-50	19-34
No. 50 (0.30mm)	25-42	18-30	12-25
No. 100 (0.15mm)	15-30	10-21	7-18
No. 200 (0.075mm)	10-20	5-15	5-15
Contenido de asfalto en micro-pavimento %		5.5-9.5	5.5-9.5
Típica tasa de aplicación kg/m ²		5.4-9.1	8.2-13.6

Fuente: **Mortero asfáltico, slurry seal.** Gustavo Rivera E., editorial Alfaomega 1997.

La Granulometría tipo II se aplica en aeropuertos, carreteras y vías urbanas.

El peso suelto promedio del agregado es de 1730 kg/m³ y puede variar de 1250 kg/m³ a 1850 kg/m³. Todos los diseños de mezcla de micro-pavimento se basan en el peso seco del agregado. Por eso se debe tomar en cuenta la variación del peso volumétrico suelto del agregado.

Tabla XVIII. Requerimientos para agregados

MICRO-PAVIMENTO	NORMAS
Equivalente de arena > 65	ASTM D 2419
Pérdida por abrasión (Los Ángeles) 30% máximo	ASTM C 131 - AASHTO T 96 - INEN 860
Resistencia a la desintegración 15-20 % máximo	ASTM C 88 - AASHTO T 104
Cubrimiento 90 % mínimo	ISSA TB 114
Granulometría	ASTM C 136 - AASHTO T 27
Gravedad específica	ASTM C 127/128 - AASHTO T 84
Forma y textura de la partícula	ASTM D 3398
Azul de metileno < 10	ISSA TB 145

Fuente: **Mortero asfáltico, *slurry seal***. Gustavo Rivera E., editorial Alfaomega 1997.

5.1 3.1.1. 2 Emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica utilizada para la producción de micro-pavimentos, debe ser modificada con polímeros, obedeciendo a un diseño previo, de acuerdo con las características de los agregados, mezcla, tipo de aplicación, condiciones ambientales y climatológicas.

Las emulsiones asfálticas recomendadas para micro-pavimentos son normalmente del tipo CQS 1p (emulsión catiónica de ruptura rápida para mezclas), que deberán ser especialmente ensayadas para verificar la compatibilidad y reactividad con los agregados, y deberán ser suministradas con el correspondiente certificado de análisis y producción, según el diseño solicitado.

Ensayos para emulsiones asfálticas (NORMA ASTM D 977)

Pruebas generales

- 1. Viscosidad ASTM D 244:** determina la manejabilidad de la emulsión en el campo.

2. **Carga de partícula ASTM D 244:** identifica la carga iónica de la emulsión.
3. **Tamaño y distribución de partícula (norma en proceso):** define características del tamaño y distribución de la micropartícula del asfalto en la emulsión; se recomienda un tamaño máximo de partícula de 7 micrones.
4. **Asentamiento ASTM D 244:** determina la estabilidad al almacenamiento.
5. **Tamizado ASTM D 244:** determina la estabilidad al manejo y al almacenamiento prolongado.
6. **Mezclado y cubrimiento bajo agua ASTM D 2397:** determina el mezclado con emulsiones; su cubrimiento en agua bajo saturación permanente e identifica la ruptura rápida de mezclas con emulsiones tipo CQS.
7. **Contenido de asfalto residual ASTM D 244 – AASHTO T 59:** determina el contenido de ligante modificado en la emulsión.

Pruebas en el residuo por evaporación

1. **Viscosidad absoluta ASTM 2171:** especifica requerimientos en la emulsión y su grado de modificación con polímeros.
2. **Penetración ASTM D 2397:** determina la dureza del asfalto y es utilizada como un indicador de la disponibilidad del asfalto para diferentes condiciones climáticas.
3. **Punto de ablandamiento ASTM D 36:** determina la resistencia al ahuellamiento del micro-pavimento, en climas cálidos.
4. **Ductilidad ASTM D 113:** determina el rendimiento del micro-pavimento en función a las características del cemento asfáltico.
5. **Contenido de polímero en asfalto residual ISSA (norma en proceso):** determina las características del ligante de acuerdo con la temperatura en campo.

6. Solubilidad en tricloroetileno AASHTO M 140: determina características de cubrimiento de agregados, en función de la temperatura ambiental.

5.1.3.1.1.3 Relleno mineral

La finalidad de una adición de relleno mineral es incrementar las propiedades de manejabilidad de la mezcla, así como mejorar la parte fina de la curva granulométrica de los agregados, lo cual influye directamente en el comportamiento a la ruptura y curado del micro-pavimento.

Según la norma ASTM D 546 – AASHTO T 37, es posible utilizar como relleno mineral: cemento pórtland tipo I, cal hidratada con un porcentaje máximo de 2%.

5.1.3.1.1.4 Polímeros

El propósito de la adición de polímeros a la mezcla del mortero asfáltico, es mejorar las propiedades de cohesión y adhesión, incrementar la rigidez y reducir la susceptibilidad al cambio de temperatura. El incremento de rigidez evita la formación de ahuellamientos en climas cálidos, y permite el uso de cementos asfálticos más blandos, que se comportan de mejor manera en climas fríos.

Los polímeros utilizados en micro-pavimentos son los mismos que se aplican en otras mezclas asfálticas; el más común es el látex natural, aunque se pueden utilizar otros como: SBR (*Styrene-Butadiene-Rubber*), SBS (*Styrene-Butadiene-Styrene*) y EVA (*Ethylene-Vinil-Acetate*). La cantidad mínima y el tipo del polímero modificador deberá ser determinada por el laboratorio responsable del diseño de mezcla; dicha cantidad deberá basarse en el contenido del residuo

asfáltico en peso; para mezclas de micro-pavimentos, se especifica esta cantidad de 3% a 4%.

5.1.3.1.1.5 Agua

Es el principal factor en la determinación de la consistencia del micro-pavimento, durante su producción y aplicación, formando parte importante en la estabilidad de la mezcla.

Según el porcentaje de humedad que contienen los agregados, se determinará la adición de agua como recubrimiento de la mezcla. La cantidad de agua por añadirse es del 10%, como máximo, respecto al peso seco del agregado. Las mezclas de micro-pavimentos utilizan cantidades bajas de agua de mezclado en climas fríos y cantidades altas en climas cálidos. Cuando la mezcla posee un bajo contenido de agua, dificulta su esparcido y presentará una pobre adhesión al pavimento existente, y en el caso de exceder el 10% de agua, la mezcla se vuelve muy fluida, segrega los materiales y evidencia la presencia de asfalto que flota en la superficie.

El agua para mezclas de micro-pavimentos debe cumplir la norma MOP-001-F 2000. Si el agua es potable, no es necesario practicar ensayos, sin embargo, si es excesivamente alta en minerales como magnesio, hierro, calcio, etc., deberán reducirse estos elementos, con el uso de químicos ablandadores.

5.1.3.1.1.6 Aditivos de control de ruptura en campo

Es común el uso de un aditivo para retardar el tiempo de ruptura de mezclas de micro-pavimentos.

La alta temperatura y reactividad de los agregados condicionan el rompimiento y curado del micro-pavimento. Para ajustar este proceso en el campo, es necesario adicionar aditivos químicamente similares a los emulsificantes, los cuales se añaden en porcentajes de 0.1% a 0.5% de la mezcla.

5.1.3.2 Parámetros de dosificación de la mezcla

Entre las guías y métodos de ensayo para el diseño de micro-pavimentos, se encuentran, además de la norma ISSA A143, otros métodos de control específicos, como los siguientes:

- 1. Prueba de cohesión en húmedo – ASTM D 3910:** determina los tiempos de ruptura de la mezcla y su apertura al tráfico.
- 2. Prueba de mezclado manual – ISSA TB 113:** determina la compatibilidad de los materiales y el tiempo mínimo de mezclado.
- 3. Prueba de consistencia – ISSA TB 106:** determina la consistencia de aplicación de la mezcla en campo.
- 4. Prueba de abrasión bajo agua – ISSA TB 100:** determina el contenido mínimo de emulsión asfáltica en la mezcla de micro-pavimento.
- 5. Prueba de rueda cargada – ISSA TB 109:** determina el contenido máximo de emulsión asfáltica en la mezcla de micro-pavimento.
- 6. Prueba de cubrimiento bajo agua – ISSA TB 114:** determina el grado de cubrimiento en agregados por emulsión asfáltica bajo saturación.
- 7. Prueba de compatibilidad Schulze-Brever-Ruck – ISSA TB 144:** determina la compatibilidad entre los finos del agregado en tamices de 0 a 2 mm, y la emulsión asfáltica modificada con polímeros.

Con las pruebas de los incisos 4 y 5, que deben ser realizadas para diferentes contenidos de emulsión asfáltica, se procede a la determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica en el diseño de la mezcla.

Los resultados de estas pruebas se grafican en ejes cartesianos, de la siguiente manera: a) La prueba de abrasión bajo agua (contenido de emulsión Vrs. pérdida de peso), permite determinar el mínimo contenido de emulsión asfáltica en el micro-pavimento; b) La prueba de rueda cargada (contenido de emulsión Vrs. incremento de peso), permite determinar el contenido máximo de emulsión asfáltica en la mezcla de micro-pavimento. Los resultados se grafican en ejes cartesianos y el punto de intersección, como resultado de la superposición de las dos gráficas anteriores, determina el contenido óptimo de emulsión asfáltica para la mezcla.

5.1.3.2.1 Tolerancia

El contenido óptimo de emulsión asfáltica en el diseño de mezcla está determinado por la función del efecto “*bulk*” (saturación en campo) de los agregados. El rango de tolerancia del contenido óptimo de emulsión asfáltica es de +/- 1.5%.

5.1.3.2.2 Requerimientos técnicos

Para la ejecución de cualquier proyecto de aplicación de emulsiones asfálticas y micro-pavimento, deberá contarse anticipadamente con los siguientes requerimientos técnicos:

1. Reporte técnico de laboratorio para diseño de mezcla
2. Análisis y evaluación de los agregados triturados propuestos
3. Análisis y evaluación de la emulsión propuesta

4. Resultado del diseño de mezcla

5.1.3.3 Aplicación de micro-pavimentos

- a. La superficie que va a pavimentarse con micro-pavimento deberá prepararse cuidadosamente, y recuperar el perfil longitudinal y transversal con sistemas de bacheo y sellado de grietas, con la utilización de equipo y procedimientos adecuados.
- b. Debe utilizarse el barrido como método de limpieza, y de esta manera eliminar la mayor cantidad de polvo y materiales nocivos al micro-pavimento.
- c. Se recomienda el riego de agua, previo a la aplicación del micro-pavimento, como control de ruptura prematura de la mezcla y como mejorador de adherencia a la superficie existente. Según las condiciones climáticas, se aplicará el riego de pulverización con agua, en la máquina aplicadora.
- d. Se mezclan los componentes del micro-pavimento. Debe tomarse en cuenta, que una vez los componentes del micro-pavimento son mezclados, se inicia el proceso de ruptura de la mezcla. Este tiempo depende de la química de los agregados y finos, la formulación de la emulsión, el tipo y concentración de aditivos, así como la temperatura ambiental.
- e. Posteriormente, para tender el micro-pavimento sobre la vía, se requiere un tiempo mínimo de mezclado de 2 minutos, tiempo en el cual el micro-pavimento permanece fluido y puede ser distribuido sobre la superficie.

- f. Una vez colocado sobre la vía, el micro-pavimento continúa con el proceso de ruptura, liberación de agua clara. La terminación del proceso de ruptura se logra cuando la coloración de la mezcla cambia de café a negro en pocos minutos.
- g. Finalmente, el tiempo de apertura al tráfico se establece cuando la mayor parte de agua es expulsada de la mezcla, que ocurre en función del sistema utilizado. En el caso de micro-pavimentos, cuya emulsión es CQS-1p, la apertura al tráfico se establece como máximo en 60 minutos.

Para la adecuada aplicación del micro-pavimento, es necesario considerar otros aspectos como:

- a. El micro-pavimento no debe ser aplicado si el pavimento o la temperatura del ambiente está por debajo de las 5°C. Debe aplicarse a partir de los 7°C, siempre y cuando esta temperatura se pronostique en aumento.
- b. No se deberá aplicar micro-pavimento si hay presencia de niebla o llovizna, o si la temperatura ambiente tiende a descender hasta 0°C, dentro de las 24 horas posteriores a su aplicación.
- c. Cuando en un proyecto existan áreas inaccesibles para la aplicación de micro-pavimento, con la caja terminadora/esparcidora, éstas deberán ser cubiertas manualmente con el uso de rastrillos de neopreno. En este caso, se humedecerá primeramente el área de aplicación para asegurar la uniformidad y adherencia de la aplicación.

- d. El agua en la mezcla reduce la tensión superficial del pavimento y ayuda a los operarios a trabajar la mezcla con más facilidad. El micro-pavimento, que se ha endurecido durante el trabajo manual, deberá ser removido.

5.1.3.4 Fallas en la aplicación de micro-pavimentos

En consideración a que se trata de una técnica relativamente nueva y aun desconocida para muchos, la aplicación de micro-pavimentos requiere un mayor cuidado y atención en muchos aspectos.

5.1.3.4.1 Calidad de los agregados

La calidad de los agregados provoca las fallas más frecuentes en los morteros asfálticos. Hay dificultad para obtener agregados de buena calidad y que conserven la uniformidad constante.

Los problemas frecuentes son:

1. La falta de finos, la cual hace que se presente una mezcla abierta sin cohesión, con partículas aisladas, es decir, que no hay un empaque adecuado, y se llega a escurrir la emulsión.
2. El exceso de finos produce abultamientos irregulares, y la mezcla tiene una pastosidad típica que la hace difícil de tender.
3. La formación de terrones, especialmente cuando se trata de materiales calizos, con una dureza que difícilmente se logrará deshacer durante el mezclado.

4. La contaminación del material pétreo, frecuentemente originada en el mismo banco del material o durante el acarreo por falta de limpieza de la caja del camión. Especialmente la contaminación con arcilla, se manifiesta con un valor del equivalente de arena bajo. Este tipo de contaminación produce una pobre adherencia y un alto valor de abrasión.

5.1.3.4.2 Condiciones climatológicas

Clima frío: retarda el curado del mortero, y cuando éste no está previsto, el tratamiento debe ser cerrado a la circulación hasta lograr su curado total, con las consecuencias lógicas durante este lapso, especialmente si se trata de un aeropuerto.

Calor excesivo: produce el rompimiento prematuro de la emulsión, al evaporarse el agua rápidamente al contacto del pavimento que alcanza temperaturas hasta de 60 a 70°C.

5.1.3.4.3 Diferencias de tonalidades en el mortero

La superficie del mortero presenta diferentes tonalidades que pueden ir de café claro a muy oscuro, en una sola franja o en diferentes franjas. Esto generalmente se debe a las siguientes causas:

- Cambio de material
- Diferencia de humedades del material pétreo en el almacén
- Sedimentación de la emulsión en el almacén
- Falta de recirculación

5.1.3.4.4 Rompimiento del material pétreo

El material pétreo se rompe al paso de los vehículos. Las causas que originan este tipo de falla son las siguientes:

- No se realizaron en laboratorio las pruebas de resistencia al desgaste de Los Ángeles.
- Cambio de materiales, sin la debida supervisión
- Posible contaminación de los materiales
- Formación de grumos por apelmazamiento de los finos, debido a humedad en el almacén.

5.1.3.4.5 Formación de burbujas en la superficie

Las causas que originan este tipo de falla:

- Exceso de aditivo
- Exceso de emulsificante
- Error de operación
- Mal diseño de la mezcla

5.1.3.4.6 Desprendimiento de material pétreo

El material pétreo del mortero se desprende por falta de cohesión, lo cual se debe a lo siguiente:

- Contaminación del material pétreo con arcilla
- Contaminación del agua de mezclado, con arcilla o sales.
- Falta de comprobación de afinidad entre el material pétreo y la emulsión
- Granulometría que no cumple con las especificaciones y falta de finos
- Ausencia de cohesión en la mezcla debido a la falta de emulsión.

5.1.3.4.7 Lavado total o parcial de la superficie

La superficie de tratamiento queda total o parcialmente sin asfalto. Esto ocurre debido a las siguientes causas:

- Posibles lluvias prematuras sobre el tratamiento, antes de que éste cure totalmente.
- El tipo de emulsión, cuando es aniónica y se realiza el tratamiento a pesar de amenazar la lluvia.
- Cuando durante la aplicación nocturna, se hace la aplicación con agua.

5.1.3.4.8 Rayado de una superficie recién tendida

Las posibles causas de este tipo de falla:

- Cuando el cribado del material pétreo no se hizo correctamente y tiene partículas mayores a la granulometría del diseño.
- La superficie no fue barrida correctamente.
- Los grumos de finos que se formaron en el almacén por humedad.
- Posible rotura de la emulsión dentro del cajón de mezclado o en la rastra.
- La rastra de la maquinaria no fue limpiada correctamente, antes de iniciar el tendido.

5.1.3.4.9 Presencia de corrimientos en la superficie

La superficie presenta corrimientos después de pasado cierto tiempo, las causas:

- No se limpió la superficie por tratar
- Exceso de asfalto en la mezcla
- Exceso de finos y demasiado asfalto
- Tránsito pesado que efectúa parada y arranques excesivos.

5.1.3.4.10 Rayado fino y uniforme

Aparición de un rayado fino y uniforme en la superficie tratada. Las posibles causas:

- El hule de la rastra está mal colocado o roto.
- Puede existir error de operación.

5.1.3.4.11 Exceso de derrames laterales

Sucede cuando el hule de cierre lateral de la rastra está mal colocado o roto. Se considera error de operación.

5.1.3.4.12 Aparecimiento de huellas de automóvil

El aparecimiento de huellas de automóvil, en arrancadas o frenadas, sucede frecuentemente debido a:

- La mezcla no había curado totalmente, cuando se abrió el tránsito (falta de señalización).
- Una mezcla con exceso de aditivo.

5.1.3.4.13 Desprendimiento del tratamiento

Esto ocurre por falta de adherencia con la superficie del pavimento. Las posibles causas:

- No se barrió correctamente y se dejó polvo en la superficie del pavimento.
- La superficie se encontraba muy pulida antes de la aplicación, y no se dio un riego de liga previo a la aplicación.

5.1.3.4.14 Falta de uniformidad

La rastra no dejó una superficie uniformemente distribuida en uno, o los dos carriles. Las posibles causas:

- La alimentación de la mezcla no es suficiente en la rastra.
- El operador no alimentó, ni repartió correctamente la mezcla.
- La mezcla se rompió parcialmente en la rastra.
- La velocidad del camión fue demasiada y no dio tiempo para que la alimentación de la rastra fuese suficiente.

5.1.3.4.15 Deformaciones y partículas expuestas

Las partículas o las pequeñas deformaciones del pavimento tratado no fueron cubiertas totalmente. Las posibles causas:

- El espesor del mortero no fue suficiente.
- Falta de alimentación de materiales, por excesiva velocidad de la maquinaria aplicadora.
- Exceso de agua en la mezcla y los patines de la rastra estaban demasiado bajos.

5.1.3.4.16 Aparición de arcilla

Esto sucede generalmente días después de su aplicación, debido a:

- Posiblemente no se limpió correctamente la superficie
- La maquinaria aplicadora tenía arcilla en las llantas.

5.1.3.4.17 Mortero con superficie abierta

Esto sucede por la falta de finos en la granulometría o al lavado del material, debido a las lluvias.

6. MEDIDAS DE CONSERVACIÓN RUTINARIA PARA CARPETAS ASFÁLTICAS

Una de las grandes preocupaciones de los administradores de infraestructura de aeropuertos es el mantenimiento de pavimentos. La preservación de las características estructurales y funcionales de las áreas pavimentadas depende fundamentalmente del mantenimiento de rutina y/o correctivo, que se proporcione a las mismas.

Un adecuado mantenimiento de los pavimentos de un aeropuerto es importante, para que pueda funcionar en forma segura, suave y sin que ocurran fenómenos inadecuados en la interacción aeronave/pavimento. El mantenimiento de pavimentos equivale a un costo de conservación, el cual será compensado a lo largo del tiempo, pues, la no conservación de ellos trae consigo costos mayores.

6.1 Factores que influyen en el deterioro de los pavimentos

El comportamiento de los pavimentos está influido principalmente por las características de los suelos de sub-rasantes, las capas que conforman el pavimento, el tránsito, clima y condiciones de drenaje. Sin embargo, también influyen el diseño y algunas deficiencias de tipo constructivo, lo que hace inevitable la presencia inmediata de daños en el mismo, y de no adoptarse las medidas correctivas del caso, evolucionan en forma gradual y posteriormente afectarán la integridad del pavimento. Si el propósito del pavimento es mantener un estándar de servicio, para el cual fue diseñado, el mantenimiento debería comenzar tan pronto como la construcción termina.

Como se puede observar, hay muchos factores que actúan individualmente o en conjunto, en el deterioro de un pavimento. Éstos pueden agruparse de la siguiente manera:

1. Material
2. Carga
3. Medio ambiente

6.2 Tipos de mantenimiento

Las técnicas de mantenimiento son los procedimientos usados para llevar a cabo o implementar una estrategia, corregir alguna deficiencia en el pavimento o prevenir un mayor deterioro en el mismo. De esta manera, de acuerdo con su función y la oportunidad en que se lleven a cabo, suelen clasificarse en correctivas y preventivas.

6.2.1 Mantenimiento rutinario

Son todos aquellos procesos, tanto preventivos como correctivos, que tienden a preservar la integridad de la infraestructura en un nivel aceptable, siempre que no involucren mayores aportes a la estructura del pavimento. Se refiere a trabajos como: parchado, bacheo, tratamientos superficiales localizados, rellenos de fisuras y reparaciones varias, requeridos para permitir un deterioro controlado del pavimento.

Se asume que las actividades son ejecutadas en secciones discontinuas, a excepción de aquellas tareas como tratamientos superficiales, que son requeridos para minimizar la oxidación o desgaste de la capa asfáltica superior.

6.2.2 Mantenimiento periódico

Se refiere a todos aquellos procesos destinados, tanto a restaurar, como a mejorar la serviciabilidad del pavimento, que lo dotan de la capacidad superficial o estructural necesaria para incrementar la vida funcional del pavimento posterior al término del período de diseño ya cumplido. Es decir, comprende todo trabajo dirigido a extender significativamente la vida de servicios de un pavimento existente, a partir de actividades de tratamiento superficiales, refuerzo estructural o reconstrucciones.

La actividad de mantenimiento periódico viene a sostener el nivel de servicio de la vía por sobre un mínimo preestablecido y, de esa manera, proporcionar al usuario el servicio requerido, para asegurar que los costos de conservación y de operación vehicular no sean más elevados que los de diseño.

6.3 Planificación del mantenimiento

La fase de planificación del mantenimiento tiene por objeto elaborar planes de acción, para que por medio de la aplicación continua de las técnicas de mantenimiento, se conserve la serviciabilidad del pavimento. La planificación de las estrategias de mantenimiento se compone de un conjunto de actividades: tiempo en que deben ser llevadas a cabo, su período de servicio efectivo, los costos asociados a dichas actividades y los factores que puedan ser limitativos en su aplicación.

La aplicación de un programa de mantenimiento se caracteriza por el desarrollo de las siguientes etapas:

1. Identificación de daños en los pavimentos e investigación de las causas de su desarrollo.

2. Definición de alternativas de mantenimiento de los pavimentos, en relación con los daños encontrados.
3. Aplicación de normas y procedimientos de ejecución de actividades de mantenimiento.
4. Elaboración de un plan para la implementación y de control de calidad de los trabajos de mantenimiento.

Estos aspectos de planificación tienen repercusión en la programación y ejecución del mantenimiento, y corresponde al ingeniero de mantenimiento confrontar las necesidades técnicas con los elementos de optimización empleados, durante la planificación generalmente expresados, a través de la definición de niveles de acción.

6.4 Identificación de los daños

La identificación de daños, cuando éstos se están iniciando, se considera muy importante, ya que permite su control, facilita la restauración y reduce los costos de inversión en trabajos de mantenimiento a largo plazo.

Es recomendable que la inspección de campo, para detectar estos daños, se realice periódicamente y a pie, considerando que las inspecciones que se realizan en vehículo no son suficientemente efectivas. La inspección no debe limitarse al pavimento; es preciso inspeccionar los canales de drenaje, la señalización, la condición del derecho de vía, y asegurarse de que estos elementos también se encuentren desempeñando su función satisfactoriamente.

6.5 Determinación de las causas de las fallas antes de su desarrollo y reparación

Difícilmente puede efectuarse una reparación efectiva, si no se conocen las causas que han originado el daño o deficiencia del pavimento.

Las reparaciones que no dan solución a las causas que originan el deterioro de un pavimento, resultan ineficaces a corto plazo y constituye un error técnico y económico, razón por la cual se considera prerequisite un diagnóstico correcto de las causas. Lo ideal es que la persona encargada del mantenimiento sea capaz de determinar visualmente las posibles causas de los daños, sin llegar a lentas investigaciones de laboratorio, cuando éstas sean innecesarias. Esta experiencia se va desarrollando, mediante el conocimiento del catálogo de daños, el control de calidad de los trabajos y el control en el comportamiento de las reparaciones. También existen actualmente métodos modernos y prácticos de investigación, que permiten conocer rápidamente problemas en las capas inferiores de los pavimentos, sin recurrir a perforaciones.

6.6 Definición de alternativas de mantenimiento de los pavimentos, en relación con los daños encontrados

La elección de una alternativa de mantenimiento, para restaurar un daño, depende de varios factores por considerar, ya que para determinado daño es posible efectuar distintas opciones, según el criterio de la persona encargada del mismo.

Entre los aspectos más importantes para la selección de la estrategia de mantenimiento más efectiva, se pueden considerar:

1. Conveniencia práctica y efectividad en el diseño de las reparaciones.

Para el caso de una sección reducida del pavimento con un número considerable de distintos tipos de daños, se hace más práctico y seguro efectuar una reparación global.

2. Análisis de alternativas de trabajos de durabilidad temporal.

En el caso de que el deterioro de un pavimento dificulte su transitabilidad, aunque la época sea desfavorable o porque se han previsto trabajos de rehabilitación mayor a corto plazo, se hace necesario evaluar la conveniencia de efectuar trabajos temporales.

3. Selección de alternativa de mantenimiento de menor costo efectivo.

Existen diversas opciones de tratamientos, para reparar una misma falla, sin embargo, en lo posible debe seleccionarse aquella de menor costo efectivo.

La mejor alternativa, cuando no existen restricciones de otra índole, será aquella de menor *costo anual equivalente*, que se entiende como el costo de la reparación, distribuido en los años de vida útil que se estima que funcionará el pavimento, hasta que deba ser realizada de nuevo.

$$\text{Costo anual equivalente} = \frac{\text{Costo unitario}}{\text{Vida útil esperada (años)}}$$

La elección de las alternativas de mantenimiento más convenientes, depende básicamente de :

- El tipo de pavimento
- El tipo de daño
- El nivel de severidad del daño
- La vida efectiva deseada de la reparación
- La disponibilidad presupuestaria

En los trabajos de mantenimiento, el equipo debe ser el apropiado y estar dimensionado, según las exigencias de las reparaciones que se van a efectuar, con el fin de garantizar su eficiencia. Así también para los trabajos de mantenimiento, se requiere de personal calificado en las distintas fases, desde la evaluación, planificación, organización y finalmente la ejecución. Estos son dos aspectos que deben ser controlados, para evitar en lo posible deficiencias de tipo constructivo.

6.7. Estrategias de mantenimiento en función del tipo de fallas y de sus respectivas severidades

Actualmente hay una gran cantidad de métodos de evaluación de fallas en los pavimentos; sin embargo, existen limitaciones en cómo transformar los resultados de las evaluaciones, sobre los tipos de fallas, su extensión y severidad, en las mejores opciones de estrategias de mantenimiento .

A continuación, se presenta un listado de estrategias de mantenimiento recomendadas para las fallas más frecuentes, que se localizan en los pavimentos flexibles de aeropuertos.

Tabla XIX. Estrategias de mantenimiento en función del tipo de fallas y de sus respectivas severidades

TIPO DE FALLA	TRABAJOS A REALIZAR
Grieta piel de cocodrilo Severidad baja	Nada que hacer.
Grieta piel de cocodrilo Severidad media	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 20 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Grieta piel de cocodrilo Severidad alta	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 40 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Exudación	Aplicar agregado fino en el área afectada. El agregado debe ser calentado a 150°C. Pasar rodillo neumático Cuando el agregado se enfríe, hay que barrer las partículas. Si es necesario, repetir el proceso.
Grietas en bloque Severidad baja	Nada que hacer
Grietas en bloque < 3 mm	Limpiar las grietas con aire comprimido, para retirar las partículas sueltas.

Severidad media	Sellar las grietas con asfalto diluido (o emulsión asfáltica).
Grietas en bloque > 3 mm Severidad alta	Limpiar las grietas con aire comprimido, para retirar las partículas sueltas. Sellar las grietas con asfalto diluido (o emulsión asfáltico) y arena.
Corrugación Severidad baja	Nada que hacer.
Corrugación Severidad media	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 20 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Corrugación Severidad alta	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 40 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Depresión Severidad baja	Nada que hacer.
Depresión Severidad media	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 20 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Depresión	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus

Severidad alta	límites. Limpiar y recompactar 40 cm de base. Imprimir la base . Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Erosión por carbonización	Aplicar lechada asfáltica con granulometría adecuada.
Grietas por reflexión de juntas / grietas longitudinales/transversales Severidad baja y media (apertura < 3 mm)	Limpiar las grietas con aire comprimido para retirar las partículas sueltas. Sellar las grietas con asfalto diluido (o emulsión asfáltica).
Grietas por reflexión de juntas / grietas longitudinales/transversales Severidad alta (apertura > 3 mm)	Limpiar las grietas con aire comprimido para retirar las partículas sueltas. Sellar las grietas con asfalto diluido (o emulsión asfáltica) y arena.
Contaminación por aceite	Aplicar niebla asfáltica sobre la superficie del pavimento, previamente limpiada.
Bache Severidad baja	Nada que hacer.
Bache Severidad media	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 20 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Bache	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus

Severidad alta	límites. Limpiar y recompactar 40 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Agregado pulido	Aplicar lechada asfáltica con granulometría adecuada.
Desagregación/envejecimiento Severidad baja	Aplicar niebla asfáltica sobre la superficie del pavimento previamente limpiada.
Desagregación/envejecimiento Severidad media	Aplicar lechada asfáltica con granulometría adecuada.
Desagregación/envejecimiento Severidad alta	Retirar la carpeta asfáltica, efectuando cortes rectangulares. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Hundimiento de sendas de rodaje Severidad baja	Nada que hacer.
Hundimiento de sendas de rodaje Severidad media	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 20 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Hundimiento de sendas de	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus

rodaje Severidad alta	límites. Limpiar y recompactar 40 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Elevación en encuentro de losas	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 20 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Grietas por deslizamiento	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar la superficie con aire comprimido o escoba. Aplicar una camada liviana de riego de liga. Dejar que cure el riego de liga. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Expansión o hinchamiento Severidad baja	Nada que hacer.
Expansión o hinchamiento Severidad media	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus límites. Limpiar y recompactar 20 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
Expansión o hinchamiento	Retirar la carpeta asfáltica en el área afectada, hasta 30 cm después de sus

Severidad alta	límites. Limpiar y recompactar 40 cm de base. Imprimir la base. Aplicar riego de liga en la base. Aplicar y compactar carpeta asfáltica de 10 cm.
-----------------------	---

Fuente: **Mantenimiento de pavimentos flexibles de aeropuertos, mediante árboles de decisión para la indicación de estrategias de mantenimiento.** Organización de Aviación Civil Internacional. Santa Cruz Bolivia, 2002.

CONCLUSIONES

1. Según la evaluación superficial realizada a la pista principal del aeropuerto “La Aurora”, ésta presenta señales visibles de fatiga, que se traducen en fallas, las cuales en su mayoría corresponden al grupo de fisuras y grietas en la carpeta asfáltica, cuya evolución más frecuente son los baches o huecos en la calzada.
2. Habiendo obtenido los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras extraídas de la carpeta de rodadura de la pista del aeropuerto, se determinó que el diseño de mezcla aplicado se encuentra dentro de las normas establecidas por el Instituto del Asfalto, sin embargo, dicha carpeta asfáltica ha estado bajo servicio hace aproximadamente 7 años, lo cual sobrepasa el tiempo de servicio en óptimas condiciones de una carpeta asfáltica, que es de 5 años, por lo que las fallas que presenta la carpeta son una muestra de fatiga, que requieren su pronta reparación.
3. Según la investigación realizada sobre la técnica de tratamiento superficial con micro-pavimentos, utilizada principalmente en la conservación de pavimentos asfálticos, éstos proveen una nueva superficie de desgaste, que protege las capas inferiores del pavimento, retardan el deterioro de la carpeta de rodadura, sella grietas superficiales mayores, rejuvenece e impermeabiliza la superficie, y según la experiencia de algunos profesionales que han trabajado con esta técnica de tratamiento superficial, es posible reducir los costos de aplicación, hasta en un 50%, en comparación con los tratamientos asfálticos convencionales. Entre otras de sus

características, que es de vital importancia para aeropuertos específicamente, se encuentra su fácil aplicación y rápida apertura al tráfico. Por estas razones, se considera como la mejor opción para restauración de la pista principal del aeropuerto “La Aurora”.

4. Para el mantenimiento y mejoramiento de pavimentos, es necesaria una evaluación que permita conocer el comportamiento estructural del mismo, para proponer, con un criterio verdaderamente racional, la aplicación de obras de conservación rutinaria y opciones de restauración, que garanticen la prolongación de la vida útil del pavimento.

RECOMENDACIONES

1. Se considera que, aun cuando el tipo de fallas localizadas en la pista del aeropuerto están relacionadas a la fatiga de la carpeta de rodadura y no al suelo de fundación, las reparaciones deben ser realizadas con urgencia, ya que la demora en la reparación de las mismas, podría afectar severamente la integridad estructural de la pista, operaciones de los aviones y seguridad de los usuarios.
2. Considerando no solamente las condiciones de la carpeta asfáltica de la pista de aterrizaje y el despegue del aeropuerto internacional “La Aurora” , sino también el conjunto de elementos que conforman el sistema aeropuerto, se hace necesaria la construcción de un nuevo aeropuerto que satisfaga las necesidades de la población actual. Sin embargo, aun para desarrollar un proyecto de esta dimensión, se hace necesaria la restauración de la pista actual, para garantizar seguridad y servicio a los usuarios, mientras se realice la construcción de un nuevo Aeropuerto.
3. Una de las opciones de restauración efectiva de la pista del aeropuerto es la aplicación de un tratamiento superficial con micro-pavimentos, que garantizaría, por lo menos, cinco años más de vida útil en buenas condiciones, a diferencia de las reparaciones menores, que solamente cubren cortos períodos de tiempo y tratan superficialmente las fallas, lo que a largo plazo representa costos mayores.

Sin embargo, como se menciona en la presente investigación la técnica de tratamiento superficial con micro-pavimentos, es relativamente nueva en nuestro país, lo que podría significar una limitante, para optar por su aplicación, por lo que se recomienda a las empresas pavimentadoras de Guatemala, introducirse en este tipo de tratamiento superficial, con el propósito de ofrecer distintas alternativas, para el mantenimiento y reparación de vías de tránsito.

4. Para aliviar los efectos de las fallas e incrementar la serviciabilidad del pavimento, debe adoptarse un programa de mantenimiento rutinario efectivo y a tiempo, así como los procedimientos de reparación adecuados, que garanticen la prolongación de la vida útil de cualquier pavimento, y así evitar daños mayores a la estructura, sobre todo en las capas inferiores, cuya reparación representa un presupuesto mayor.

BIBLIOGRAFÍA

Asphalt Institute. **Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente**. Asphalt Institute. Series de Manuales No. 22 (MS-22). 1,992.

Berditchevsky, Gabriel. **Asistencia técnica en mantenimiento de la red de carreteras primarias especiales**. Publicación Especial. Louis Berger International, INC. El Salvador. 1,995.

Castillo Dávila, Victor Humberto. Diseño de pavimentos para aeropuertos por el Método de la FAA. Tesis Ing. Civil Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989.

Rivera E.,Gustavo. **Mortero asfáltico, slurry seal**. México: Grupo Editor Alfaomega 1997. 128pp.

Sáez Alván, Lucía del Pilar. “Mantenimientos de pavimentos flexibles de aeropuertos mediante árboles de decisión para la indicación de estrategias de mantenimiento” **Seminario de la Organización de Aviación Civil Internacional sobre mantenimiento de pavimentos de aeropuertos y curso rápido sobre la interacción aeronave pavimento**. Santa Cruz-Bolivia. 2002.

SIECA. **Informe final, plan maestro de transporte aéreo y aeropuertos centroamericanos 2001 - 2010**. El Salvador. 2,001.

The asphalt institute. **Introducción to asphalt**. Manual Series (No.5. 5 MS-5). 8a. Edición. 1,986.

Ingenieros consultores de Centroamérica, S.A. **Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes**. Dirección General de Caminos, Ministerio Comunicaciones Infraestructura. Guatemala, diciembre 2,000.