

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA
AEROPISTAS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :

GABRIELA GARCÍA SALDIVAR

DIRECTOR DE TESIS:
DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ

MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2014



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/122/14

Señorita
GABRIELA GARCÍA SALDIVAR
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. ALEXANDRA OSSA LÓPEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS"

- INTRODUCCIÓN
- I. HISTORIA DEL ARTE
 - II. MARCO TEÓRICO
 - III. DISEÑO DE PAVIMENTO UTILIZANDO FAARFIELD
 - IV. NÚMERO DE CLASIFICACIÓN DE AERONAVES Y NÚMERO DE CLASIFICACIÓN DE PAVIMENTOS
 - V. CONCLUSIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 9 de septiembre del 2014.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.



AGRADECIMIENTOS

A lo largo de mi vida he conocido personas que siempre han creído en mí, que me han apoyado en todos los proyectos que he comenzado y que han visto mis metas cumplidas, pero existen dos personas muy importantes en mi vida a las que siempre les agradeceré por todos mis logros: mi mamá y mi abuelito.

A mi papá Toño por ser mi mayor ejemplo a seguir, por todos los consejos que me ha dado, por las enseñanzas, por su apoyo, pero sobre todo por el inmenso cariño que me tiene y que le tengo, le agradezco haberme consentido tanto pero haciéndome ver que las cosas siempre se logran trabajando y luchado por ellas; porque gracias a él hoy veo realizada una de mis más grandes metas, seguramente sin sus enseñanzas, todo hubiera sido más difícil.

A mi mamá, Aurora, por haberme dado la vida, porque desde el momento en el que llegué a la suya luchó como nadie para sacarme adelante, porque siempre ha apoyado mis sueños y me ha motivado a seguir adelante pese a los obstáculos que se presenten, mi mamá, que aún en la distancia siempre estuvo a mi lado compartiendo mis alegrías, por esto y muchas cosas más le agradezco y agradeceré toda la vida.

A mi mamá Pera, quien siempre ha estado presente consintiéndome como nadie, alegrando siempre mi vida con sus ocurrencias, dándome su cariño y la oportunidad de tener dos mamás que siempre están viendo por mi bienestar; a mi papá, Arnulfo, por su cariño y apoyo en este y todos los proyectos que he emprendido, porque siempre ha creído en mí y en mis capacidades para lograr lo que me propongo.

A mi Familia por estar a mi lado cuando más los he necesitado, porque cada uno de ellos ha logrado que yo sea tal como soy ahora, su cariño y apoyo me ayudó a lo largo de los cuatro años que estuve en la Facultad de Ingeniería y cuando estuve lejos, gracias tíos Lalo, Adrián, Toño y Alejandro porque desde niña he tomado lo mejor de ustedes y eso ha hecho de mí lo que ahora soy.

A mis amigos y compañeros de la Facultad de Ingeniería quienes mejor que nadie saben que este logro significa tanto para mí, pues juntos fuimos creciendo a lo largo de estos cuatro años y medio en los que hubo de todo, pero sobre todo apoyo incondicional y amistad.



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



A Alejandra Campos quien ha sido mi compañera en esta aventura, por ayudarme a ser cada día mejor, por darme aliento cuando las cosas no resultaban como yo quería y motivarme a mejorar; también a Adrián Aguilar quien siempre está para darme consejos, para ayudarme a crecer, pero sobre todo para darme su cariño y amistad, regalándome siempre confianza, sonrisas y diversión.

A José González, Jonathan Tornero, Daniel Ángeles, Eduardo Hernández, Jhonatan Osorio, Sergio Villar, Matías Llanes, Alejandro Hernández por todas las experiencias y momentos compartidos en nuestro paso por la Facultad de Ingeniería, pero sobre todo por ser mis amigos y estar a mi lado cuando más los he necesitado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de estudiar una Licenciatura, por brindarme conocimientos de primer nivel, pero sobre todo por ayudar a desarrollarme como Ingeniera y como persona. También por poner en mi camino profesores como el M.I. Gabriel Moreno Pecero, M.I. Ricardo Padilla Velázquez, M.I. Nikté N. Ocampo Guerrero, M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, M.I. Marcos Trejo Hernández, M.I. Rodrigo Takashi Sepulveda Hirose tan preparados que con su entusiasmo y conocimientos me han abierto las puertas hacia la Ingeniería Civil.

Al Instituto de Ingeniería por abrirme las puertas a conocimientos adicionales a los que adquirí durante mi estancia en la Facultad de Ingeniería, pero sobre todo a la Dra. Alexandra Ossa López quien me brindó la oportunidad de desarrollar este trabajo y ha sido mi guía a lo largo del mismo dotándome de conocimientos nuevos y enseñándome que las investigaciones y proyectos deben ser de gran calidad.

Finalmente a todos aquellos a quienes conozco desde hace apenas unos meses, unos años o que conozco de toda la vida y que no he podido mencionar de manera puntual les agradezco por cada consejo, por cada experiencia y/o momento compartido, por las risas, por el apoyo, pero sobre todo por la confianza y el inmenso cariño que me han demostrado, algunos incluso a pesar de la distancia, pues cada uno de esos detalles me han permitido llegar hasta el día de hoy en que veo realizada una más de mis metas: convertirme en Ingeniera Civil.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVO.....	16
ALCANCES.....	16
1. HISTORIA DEL ARTE.....	17
1.1 HISTORIA DE LA AVIACIÓN.....	17
1.2 EVOLUCIÓN DE LAS PISTAS DE ATERRIZAJE.....	20
1.3 PAVIMENTOS.....	21
1.3.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	23
1.3.1.1 CAPA SUB-BASE.....	23
1.3.1.2 CAPA BASE.....	24
1.3.1.3 CARPETA ASFÁLTICA.....	24
1.3.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	24
1.3.2.1 FALLAS TÍPICAS DE PAVIMENTO RÍGIDO.....	25
1.3.2.2 TIPOS DE JUNTAS.....	26
1.3.2.3 CAPA BASE.....	32
1.3.2.4 SUBRASANTE.....	33
1.3.3 PAVIMENTOS PERPETUOS.....	34
1.3.3.1 CAPA BASE DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.....	37
1.3.3.2 CAPA INTERMEDIA.....	39
1.3.3.3 SUPERFICIE.....	39
1.3.3.4 CUIDADOS REQUERIDOS PARA LOS PAVIMENTOS PERPETUOS.....	40
2. MARCO TEÓRICO.....	41
2.1 INFRAESTRUCTURA AEROPORTUARIA.....	41
2.1.1 AERÓDROMO.....	41
2.1.2 ZONA DE MANIOBRAS.....	43
2.2 CONCEPTOS BÁSICOS PARA DISEÑO.....	49
2.2.1 SOFTWARE FAARFIELD.....	50
2.2.1.1 RELACIÓN PASO-COBERTURA.....	52
2.2.1.2 FACTOR DE DAÑOS ACUMULATIVOS.....	55



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



2.2.1.3	ÍNDICE DE LA CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA	57
2.2.1.4	CAPAS PRECARGADAS EN FAARFIELD	59
2.2.2	CONSIDERACIONES DEL AVIÓN	60
2.2.2.1	PESO DE AERONAVES	60
2.2.2.2	CLASIFICACIÓN DE LOS GRUPOS DE AVIONES SEGÚN LA FAA	61
2.2.2.3	TIPO Y GEOMETRÍA DEL TREN DE ATERRIZAJE	62
2.2.2.4	COMBINACIÓN DE TRÁFICO	64
2.2.3	DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	64
2.2.3.1	VALOR DE SOPORTE CALIFORNIA	64
2.2.3.2	TERRENO DE FUNDACIÓN	66
2.2.3.3	CAPA SUB-BASE	67
2.2.3.4	CAPA BASE	68
2.2.3.5	CARPETA ASFÁLTICA	70
2.2.3.6	FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	71
2.2.4	DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO	71
2.2.4.1	MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (k)	71
2.2.4.2	CAPA SUBRASANTE	73
2.2.4.3	CAPA SUB-BASE	74
2.2.4.4	LOSA DE CONCRETO	75
2.2.5	DISEÑO DE PAVIMENTOS PERPETUOS	76
2.2.5.1	DISPOSICIÓN DE CAPAS EN FAARFIELD	77
2.2.6	DISEÑO DE MÁRGENES U HOMBROS	78
3.	DISEÑO DE PAVIMENTO UTILIZANDO FAARFIELD	81
3.1	EJEMPLOS DE APLICACIÓN	82
3.1.1	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE CONVENCIONAL	99
3.1.2	EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CBR EN LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	107
3.1.3	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO PERPETUO	116
3.1.4	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO CONVENCIONAL	123
3.1.5	VARIACIÓN DE CBR EN ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO	128



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



4. NÚMERO DE CLASIFICACIÓN DE AERONAVES Y NÚMERO DE CLASIFICACIÓN DE PAVIMENTOS.....	136
4.1 OBTENCIÓN DE ACN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	138
4.2 OBTENCIÓN DE ACN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS	139
4.3 USO DE COMFAA	140
4.3.1 MÉTODO DE USO DE AERONAVE	141
4.3.2 MÉTODO DE EVALUACIÓN TÉCNICA	141
4.4 OBTENCIÓN ACN-PCN MEDIANTE METODO DE USO DE AERONAVES	147
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	150
BIBLIOGRAFÍA.....	154



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Deformaciones en el pavimento.....	21
Figura 2.2 Estructura de pavimento flexible	23
Figura 1.3 Juntas intermedias longitudinales	27
Figura 1.4 Juntas de construcción longitudinales.....	28
Figura 1.5 Juntas de dilatación	29
Figura 1.6 Juntas transversales.....	31
Figura 1.7 Intersecciones típicas de aeropistas, calles de rodaje y plataformas y acomodo de juntas	32
Figura 1.8 Estructura típica de pavimentos perpetuos	35
Figura 1.9 Comparación entre fallas en pavimento flexible convencional y perpetuo.36	
Figura 1.10 Ventajas del alto contenido de asfalto en la base HMA.....	38
Figura 2.1 Aeródromo.....	42
Figura 2.2 Calles de rodaje.....	44
Figura 2.3 Aeropista	45
Figura 2.4 Esquema de la pista (OACI)	47
Figura 2.5 Esquema de la pista (FAA)	48
Figura 2.6 Ruedas pertenecientes a un grupo tándem	53
Figura 2.7 Anchura equivalente de ruedas	54
Figura 2.8 Engranajes simples con nomenclatura	63
Figura 2.9 Curva normalizada para obtención de CBR	65
Figura 2.10 Ensayo de placa de carga.....	72
Figura3.1 Tren de aterrizaje A318-100 std.....	89
Figura 3.2 Tren de aterrizaje A319-100	89
Figura 3.3 Tren de aterrizaje A320-100	90
Figura 3.4 Tren de aterrizaje A321-100 std.....	90
Figura 3.5 Tren de aterrizaje B737-100	91
Figura 3.6 Tren de aterrizaje B727-100 C.....	91
Figura 3.7 Tren de aterrizaje Fokker F100.....	92
Figura 3.8 Tren de aterrizaje B757-200	92
Figura 3.9 Tren de aterrizaje B767-200	93
Figura 3.10 Tren de aterrizaje A300-B2 std	93
Figura 3.11 Tren de aterrizaje B767-300	94



Figura 3.12 Tren de aterrizaje B777-200 Baseline	94
Figura 3.13 Tren de aterrizaje B747-100 SF	95
Figura 3.14 Tren de aterrizaje B787-8 Preliminary.....	96
Figura 3.15 Tren de aterrizaje A330-200 std.....	96
Figura 3.16 Tren de aterrizaje A380-800	97
Figura 3.17 Tren de aterrizaje A340-200 opt.....	98
Figura 3.18 Tren de aterrizaje A340-200 opt Belly	98
Figura 3.19 Espesor de las capas del pavimento flexible diseñado	100
Figura 3.20 Distribución espacial del CDF de cada aeronave.....	101
Figura 3.21 Estructura de pavimento para una vida útil de 5 años.....	105
Figura 3.22 Estructura de pavimento con vida útil de 50 años y CBR de 5% a 20% 108	
Figura 3.23 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 5%.....	110
Figura 3.24 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 10%.....	110
Figura 3.25 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 15%.....	111
Figura 3.26 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 20%.....	111
Figura 3.27 Estructura de pavimento con vida útil de 20 años y CBR de 5% a 20% 112	
Figura 3.28 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 5%.....	113
Figura 3.29 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 10%.....	113
Figura 3.30 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 15%.....	114
Figura 3.31 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 20%.....	114
Figura 3.32 Diseño de pavimentos perpetuos para una vida útil de 20 años.....	118
Figura 3.33 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 5%	119
Figura 3.34 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 10%	120
Figura 3.35 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 15%	120
Figura 3.36 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 20%	120



Figura 3.37 Diseño de pavimentos perpetuos para una vida útil de 50 años.....	121
Figura 3.38 Estructura convencional de pavimento rígido para una vida útil de 20 años	124
Figura 3.39 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido convencional para una vida útil de 20 años.....	126
Figura 3.40 Estructura convencional de pavimento rígido para una vida útil de 50 años	127
Figura 3.41 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido convencional de vida útil de 50 años	128
Figura 3.42 Estructura de Pavimento con vida útil de 20 años y k de 22.4 MN/m ³ a 65.8 MN/m ³	130
Figura 3.43 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando k = 22.4 MN/m ³	131
Figura 3.44 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando k = 38.4 MN/m ³	131
Figura 3.45 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando k = 52.6 MN/m ³	131
Figura 3.46 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando k = 65.8 MN/m ³	132
Figura 3.47 Estructura de pavimento para una vida útil de 50 años y k de 22.4 MN/m ³ a 65.8 MN/m ³	133
Figura 3.48 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando k = 22.4 MN/m ³	134
Figura 3.49 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando k = 38.4 MN/m ³	134
Figura 3.50 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando k = 52.6 MN/m ³	134
Figura 3.51 CDF en Pavimento Rígido cuando k = 65.8	135
Figura 4.1 Obtención de ACN en pavimentos flexibles de manera gráfica.....	139
Figura 4.2 Obtención de ACN en pavimentos rígidos de manera gráfica	140
Figura 4.3 Configuración de la pista de aterrizaje respecto a las calles de rodaje ..	144



LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 3.1 Tasas de crecimiento del avión tipo C	84
Gráfica 3.2 Tasas de crecimiento del avión tipo D	85
Gráfica 3.3 Tasas de crecimiento del avión tipo E	85
Gráfica 3.4 Tasas de crecimiento del avión tipo F.....	86
Gráfico 3.5 Variación del espesor de la capa de subrasante respecto a la vida útil	107
Gráfico 3.6 Variación del espesor de la subrasante en función del CBR para una vida útil de 50 años.....	109
Gráfico 3.7 Variación del espesor de la subrasante en función del CBR, para una vida útil de 20 años.....	115
Gráfico 3.8 Comparativo de espesores de la subrasante.....	115
Gráfico 3.9 Espesores de capas en pavimento perpetuo para una vida útil de 20 años.	119
Gráfico 3.10 Espesores de capas en pavimento perpetuo	122
Gráfico 3.11 Vida útil calculada.....	123
Gráfico 3.12 Espesores de capas en pavimento rígido para una vida útil de 20 años....	130
Gráfico 3.13 Espesores de capas en pavimento rígido para una vida útil de 50 años....	133
Gráfico 3.14 Comparación de espesores de losa de concreto	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de aeropuertos	42
Tabla 2.2 Elección de aeropuertos.....	43
Tabla 2.3 Ancho de pistas	48
Tabla 2.4 Módulo de las capas en FAARfield.....	59
Tabla 2.5 Trenes de aterrizaje típicos	62
Tabla 2.6 Categoría de resistencia del terreno de fundación de acuerdo al valor CBR....	65
Tabla 2.7 Espesor mínimo para la capa base de agregado	70
Tabla 2.8 Categoría de resistencia del terreno de fundación de acuerdo al módulo k.....	73
Tabla 2.9 Compactación de capa subrasante	74
Tabla 2.10 Grupo de aeronaves	79



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



Tabla 3.1 Movimientos diarios	82
Tabla 3.2 Clasificación de aeronaves	83
Tabla 3.3 Movimientos anuales	83
Tabla 3.4 Salidas anuales promedio por clase de aeronave	87
Tabla 3.5 Salidas anuales promedio por aeronave	87
Tabla 3.6 Combinación de tráfico.....	88
Tabla 3.7 Espesores de las capas de pavimento flexible	99
Tabla 3.8 Información adicional de la aeronave	101
Tabla 3.9 Salidas promedio con vida útil de 5 años	102
Tabla 3.10 Salidas promedio con vida útil de 10 años	103
Tabla 3.11 Salidas promedio con vida útil de 15 años	103
Tabla 3.12 Salidas promedio con vida útil de 20 años	103
Tabla 3.13 Salidas promedio con vida útil de 25 años	103
Tabla 3.14 Salidas promedio con vida útil de 30 años	104
Tabla 3.15 Salidas promedio con vida útil de 35 años	104
Tabla 3.16 Salidas promedio con vida útil de 40 años	104
Tabla 3.17 Salidas promedio con vida útil de 45 años	104
Tabla 3.18 Salidas promedio con vida útil de 50 años	105
Tabla 3.19 Espesores de capas de pavimento.....	106
Tabla 3.20 Espesor de capa sub-base a partir del valor CBR en pavimento de 50 años de vida útil	108
Tabla 3.21 Espesores de la estructura de pavimento rígido convencional para una vida útil de 20 años.....	125
Tabla 3.22 Contribución CDF de la combinación de tráfico.....	125
Tabla 3.23 Espesores de la estructura de pavimento rígido convencional para una vida útil de 50 años.....	127
Tabla 3.24 Valores de k obtenidos a partir del valor CBR	129
Tabla 4.1 Factores de conversión para pavimento convencional	143
Tabla 4.2 Niveles estándar de resistencia de la subrasante para pavimentos flexibles ..	146
Tabla 4.3 Niveles estándar de resistencia de la subrasante para pavimentos rígidos	146
Tabla 4.4 Categorías de presión de las ruedas de la aeronave	146
Tabla 4.5 ACN de la combinación de tráfico	148
Tabla 4.6 PCN de las estructuras flexibles con el método de uso de aeronave	149
Tabla 4.7 PCN de las estructuras rígidas con el método de uso de aeronave	149



INTRODUCCIÓN

Durante la segunda mitad del siglo XX, el transporte aéreo fue logrando, de manera paulatina, ser competitivo frente a los transportes terrestres y marítimos debido a que ofreció trasladar mercancías y personas en un tiempo bastante menor que los demás medios y con mayor seguridad, esto le dio una posición destacada en la economía de los países a nivel mundial, pese a su gran costo de operación.

La infraestructura aeroportuaria de un país es signo inequívoco de su nivel de desarrollo e interrelación con el resto del mundo debido a que brinda un enlace permanente entre centros de comunicación y consumo, hablando de mercancías; o entre países y regiones si nos referimos a movilidad de personas, en ambos casos siendo un factor determinante para el desarrollo económico.

Infraestructura aeroportuaria se refiere al conjunto de instalaciones complejas necesarias para el desarrollo del transporte aéreo en las que se requieren los conocimientos de diversas ramas de la ingeniería como son la aeronáutica, que se encarga del conjunto de técnicas que permiten el control de las aeronaves; la ingeniería civil que es la encargada del diseño geométrico de las calles de rodaje, aeropistas, pavimentos, drenajes, etc.; la ingeniería ambiental encargada de vigilar las emisiones de gases, los niveles de ruido, impactos ambientales de la zona, etc.

Los aeropuertos deben cumplir satisfactoriamente con la misión que tienen encomendada de una manera sencilla, estética, funcional y económica pues se han convertido en parte importante del sistema total de transporte y desde el planteamiento de la ciudad debemos considerar el tráfico aéreo que podría llegar a tener y el crecimiento poblacional y económico que ésta pudiera experimentar ya que repercute en las modificaciones futuras que pudiera tener el aeródromo en el futuro.

Parte medular de la infraestructura de un aeropuerto es la pista de aterrizaje pues se debe constatar su seguridad ante todo. La construcción de dichas pistas es pieza primordial de la seguridad de los usuarios, del desgaste que sufren los neumáticos de las aeronaves, pero principalmente de la operación y mantenimiento del aeropuerto, lo cual repercute en la economía del mismo.



Pese a las similitudes que existen entre las pistas de aterrizaje, calles de rodaje y carreteras, no deben confundirse éstas últimas con las primeras ya que, además de suponer una infraestructura vital de la industria del transporte, éstas están sometidas a cargas realmente importantes que exigen un diseño específico y, del mismo modo, precisan problemas específicos que se deben tomar en cuenta y tratar de evitar para garantizar la seguridad que los usuarios demandan.

A principios del siglo XX surgen los primeros aeropuertos, los cuales eran utilizados con fines militares y bélicos, sin embargo, con el paso de los años, éste uso se fue extendiendo a la aviación civil y comercial. En un principio las pistas de aterrizaje que se ofrecían eran simples espacios abiertos sin pavimentar con carpas improvisadas a sus lados, actualmente, éstas son más sofisticadas por lo que se llevan a cabo estudios climatológicos, de suelo, de tráfico, etc. para poder orientar las pistas de aterrizaje, llevar a cabo el diseño geométrico y del pavimento de las mismas.

Las modificaciones que han sufrido las pistas de aterrizaje no son por mero capricho, ellas se deben a la evolución de las aeronaves. Las aeropistas fueron en un principio de hierba, después de tierra, incluso, se optó por los acuatizajes, sin embargo, con el paso de los años se descubrió que el concreto era un material que combinado con el acero podía dar buenos resultados ante las exigencias requeridas.

El asfalto es un material que también tiene un buen comportamiento ante las grandes cargas y velocidades de las aeronaves, por lo que algunos aeropuertos lo implementaron en sus pistas. Cualquiera que sea el material para la construcción de este elemento, no se está exento de sufrir desperfectos ni de necesitar un buen mantenimiento, por lo que se requiere que el diseño del pavimento sea el adecuado, es decir, debe ser un pavimento funcional, duradero y que cumpla con las condiciones de servicio necesarias.

La finalidad de la presente tesis es mostrar el procedimiento para lograr diseños de pavimentos que cumplan con las exigencias de las aeropistas, garantizando que la repartición de la carga de las ruedas de las aeronaves sea tal que las presiones en el terreno se reduzcan hasta una intensidad tolerable. Por ello, los factores principales de estudio serán la carga de las ruedas y las características del suelo sobre el que se colocará el pavimento.



La primera sección del presente trabajo sirve de introducción al tema de la aviación, la importancia que ha cobrado el transporte aéreo y las necesidades que tiene éste, así mismo, se explica el objetivo y los alcances del presente trabajo.

En seguida se da paso al capítulo primero, en el cual se explica cómo surge la aviación en el mundo y la evolución que esta ha tenido con el paso de los años, se realiza un recorrido desde la época de Leonardo Da Vinci hasta la época actual. Se da a conocer lo que es un pavimento y los dos tipos que existen: flexible y rígido, mencionando características generales de ellos, tales como su origen, fallas típicas, etc.

El segundo capítulo contiene los conceptos básicos para la comprensión del diseño de pavimentos, se definen los elementos indispensables para la infraestructura aeroportuaria, especialmente la aeropista que es el elemento central de este trabajo, se definen la prueba CBR, la importancia del tipo y disposición de los trenes de aterrizaje, se da una introducción al software que se usará para obtener los espesores necesarios de las capas: FAARfield., se mencionarán las particularidades de dicho programa y la forma en la que éste realiza los cálculos.

En el tercer capítulo, se llevarán a cabo ciertos ejemplos de aplicación utilizando el software de diseño ya mencionado, en esta sección se modelarán estructuras de pavimento, tanto flexibles como rígidos, así como una variable de los flexibles que son los pavimentos perpetuos. En cada una de las modelaciones se darán a conocer los espesores totales de cada una de las estructuras así como el daño que cada aeronave ocasiona sobre las mismas.

El cuarto capítulo introduce otro software llamado COMFAA, el cual se utiliza para determinar la resistencia que presenta una aeropista, ya sea existente o nueva, a partir del método ACN-PCN desarrollado por la Organización de Aeronáutica Civil Internacional. Se obtendrán los valores de ACN pertenecientes a las aeronaves de la combinación de tráfico y finalmente los valores de PCN correspondientes a cada una de las estructuras diseñadas en esta tesis.

Finalmente se dan a conocer las conclusiones del trabajo y las propuestas para el tema, sin perder de vista que la finalidad del presente trabajo es dotar al lector de los conocimientos



y la metodología necesarios para poder llevar a cabo el diseño de un pavimento que cubra las necesidades de una aeropista, a fin de evitar las posibles pérdidas económicas debidas a la interrupción del servicio para dar mantenimiento a los pavimentos o para reforzarlos.

OBJETIVO

Realizar el diseño de distintas estructuras de pavimento capaces de resistir las cargas presentes en una aeropista perteneciente a un aeropuerto en el que se llevan a cabo un número importante de movimientos al año, así como obtener la resistencia relativa (el valor ACN-PCN) de cada uno de estos diseños.

ALCANCES

Para cumplir el objetivo planteado se realizarán las siguientes actividades:

- ✚ Búsqueda de información necesaria para la comprensión de los conceptos básicos utilizados en el diseño de pavimentos.
- ✚ Recopilación de normativa internacional emitida por la Organización de Aeronáutica Civil Internacional (OACI) y la normativa estadounidense a cargo de la Administración Federal de Aviación (FAA).
- ✚ Aprendizaje y uso del Software FAArfield, con el cual se realizará el diseño antes mencionado.
- ✚ Aprendizaje y uso del Software COMFAA a partir del cual se obtendrá la clasificación ACN-PCN de las estructuras diseñadas.



1. HISTORIA DEL ARTE

1.1 HISTORIA DE LA AVIACIÓN

Desde tiempos inmemoriales el ser humano ha deseado conquistar el aire, esta inquietud surge en el momento en que decide levantar la vista y observar el vuelo de las aves para imitarlas. En un principio se atribuía el vuelo a los seres superiores, ejemplo claro de ello está plasmado en la mitología griega con Ícaro y Dédalo, sin embargo, con el paso de los años el deseo de volar comienza a tomar forma con el estudio racional de Leonardo Da Vinci.

Ingeniero, inventor, científico, músico, pintor, botánico, arquitecto, probablemente la persona con más talento para desarrollar disciplinas tan dispares que haya existido, así fue Leonardo da Vinci. Tal vez uno de los aspectos que más cautivan en la posteridad es su faceta como inventor en muchas de las disciplinas a las que se dedicó.

Cuando se habla de los grandes personajes del pasado se suele seguir un proceso lineal y predecible, el cual comienza con el periodo de formación seguido por los trabajos menores de la juventud, que por lo general son los más alocados, para así dar paso a los trabajos de un hombre ya maduro y formado que ha dejado atrás los sueños de infancia.

Con Leonardo da Vinci no ocurre así, él convierte su trabajo en el medio para obtener los recursos económicos necesarios para así dedicar sus últimos años de vida a los proyectos más utópicos, los cuales corresponden a uno de los más grandes anhelos de la humanidad: el sueño de volar.

Así es como, a partir de 1470, aplica a este sueño la prospectiva metódica del método empírico. Partiendo de la observación del vuelo de los pájaros, la anatomía de sus alas y la disposición de las plumas de un sin número de aves es como comienza con los diseños de sus máquinas voladoras, esto se puede observar claramente en el Codice Sul Volo Digli Uccelli (Códice sobre el vuelo de los pájaros) que data de 1505 y contiene dibujos sobre los artefactos voladores, planeadores y paracaídas.

El ornitóptero fue uno de los aparatos que diseñó, éste debería ser propulsado por su conductor quien se introducía en el armazón y, de modo similar al uso de remos en las embarcaciones, accionaba las alas del aparato.



Da Vinci reconoce pronto que la musculatura humana era incapaz de imitar el vuelo de las aves, aunado a esto, la observación de las aves grandes lo hacen decidir que la mejor manera de volar sería sin agitar las alas, es decir, planeando.

Así es como surge un artefacto muy similar al ala delta que conocemos actualmente, este invento tiene su origen en las observaciones de las grandes aves que aprovechan el viento para volar planeando. Así mismo diseña un paracaídas de estructura cónica que, ofreciendo resistencia al aire, seguramente hubiera logrado volar.

Otra de las máquinas que diseñó fue el tornillo helicoidal que usando un rotor accionado por la fuerza de cuatro hombres lograría tal velocidad e inercia que lograrían elevarlo, este invento se considera como el primer intento de un helicóptero, sin embargo, al igual que los demás diseños de Leonardo, no se sabe si se llevó a la práctica .

Siglos más tarde, el hombre logra su sueño y es capaz de navegar en el aire con ayuda de los globos aerostáticos, sin embargo, estos tenían un inconveniente, no eran capaces de elegir la ruta que seguirían pues ésta estaba definida por la dirección en la que soplaba el viento, a pesar de ello, esto marca el inicio de la conquista aérea.

Era el año de 1733 y en el Castillo de La Muette ubicado en las afueras de París se preparaba el primer vuelo tripulado en globo, fueron los hermanos Montgolfier quienes confeccionaron dicho vehículo y Pilatre de Rozier y D'Arlandes los encargados de realizar el viaje que duró veinticinco minutos alcanzando así una altura de 900 metros y recorriendo casi quince kilómetros de distancia.

Para que el hombre fuera capaz de decidir la ruta de su vuelo, a mediados del siglo XIX, surge el primer dirigible, el francés Henri Giffard coloca un motor de vapor conectado a una hélice de tres paletas en un globo de forma alargada, de esa manera logró recorrer 27 kilómetros con una velocidad de 8 km/h. Dicho artefacto fue mejorándose usando motores de gasolina, sin embargo, fue hasta comienzos del siglo XX cuando aparece el conde de origen alemán Ferdinand Von Zeppelin quien crea un dirigible con estructura de aluminio cubierta de tela e inflado por hidrógeno capaz de desplazarse a 72 km/h, este fue un gran adelanto, por lo que los zeppelins incluso fueron utilizados durante la Primer Guerra Mundial.



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS

Gabriela García Saldivar



Hasta entonces, todos los vuelos realizados habían sido con artefactos más ligeros que el aire, sin embargo, en 1871, el francés Alphonse Pénaud consigue el vuelo de un instrumento más pesado; pero no fue sino hasta 1896 que Samuel Pierpont Langley logró volar su invento, que funcionaba con un motor de vapor, unos 900 metros haciéndolo reposar después en el agua, con lo que inicia la era del vuelo mecánico.

Entre 1890 y 1896 el alemán Lilienthal realizó vuelos en monoplanos contruidos con cañas de bambú cubiertas de tela y lanzados desde una colina de arena que hizo a las afueras de Berlín. Lilienthal aseguraba que, independientemente de la aplicación de un motor, para poder volar era indispensable que los aeronautas recibieran un largo entrenamiento,

Las enseñanzas de Lilienthal tuvieron seguidores: los hermanos Orville y Wilbur Wright quienes insistían en la importancia del entrenamiento para el vuelo, Wilbur decía que maniobrar una máquina volante tendría que convertirse en una operación tan instintiva como mantenerse en equilibrio cuando se camina.

En 1903, los hermanos Wright deciden volar en la playa de Kitty Hawks, Carolina del Norte, Orville realiza el primer vuelo y logra recorrer 36 metros. Sin darse por vencidos, los hermanos realizan 3 vuelos más ese mismo día, siendo el último de ellos el más provechoso pues lograron estar en el aire durante casi un minuto y recorrieron 260 metros. Cabe mencionar que dichos vuelos necesitaban de una catapulta para realizar el despegue.

Los hermanos Wright siguieron realizando vuelos y mejorando sus aviones, entre los años de 1904 y 1905, muchos de sus vuelos fueron realizados en presencia de amigos, vecinos e incluso periodistas. A finales de 1905, realizaron un vuelo importante, el primero en circuito cerrado y rompiendo un nuevo récord de distancia pues volaron aproximadamente 38 km durante casi 40 minutos.

A partir del año 1908, los aviones que creaban Orville y Wilbur Wright ya no necesitaban ser impulsados mediante catapultas si no que eran capaces de despegar por sí solos, lo que significaba un gran logro para la aviación.

Existió un personaje que trabajó durante la misma época que los hermanos Wright en París, era el Brasileño Alberto Santos Dumont quien tras realizar vuelos en globo se interesó mucho en la aviación, construyendo así sus propios globos y dirigibles que le darían fama



en París. Pero su trabajo no terminó ahí, se dedicó a construir aviones y en 1906 realizó un vuelo público en dicha ciudad considerado como el primer vuelo realizado con éxito ya que la prensa internacional no había dado a conocer a los hermanos Orville y Wilbur.

Así es como el siglo XX se convirtió en la época de oro de la aviación, se realizaron diversas mejoras a los aviones creados a principios del siglo, los cuales pasaron a ser usados en servicios militares durante la Guerra de los Balcanes y la Primera y Segunda Guerra Mundial. La aviación tuvo avances realmente importantes debido a sus usos bélicos, las aeronaves dejaron de transportar únicamente al piloto y comenzaron a incluir un pasajero más, se desarrollaron motores de mayor potencia y el diseño de las naves pasó a ser aerodinámico.

Con el paso de los años los aviones y dirigibles comenzaron a ser tripulados por pasajeros y a recorrer rutas trasatlánticas, se tuvieron que hacer mejoras para que los aviones pudieran ser más grandes, recorrieran distancias mayores, tuvieran mayor velocidad y fueran capaces de alcanzar mayor altitud. Las radiocomunicaciones tuvieron que implementarse en los aviones para poder recibir indicaciones de vuelo desde tierra.

1.2 EVOLUCIÓN DE LAS PISTAS DE ATERRIZAJE

Con el paso de los años los aviones se convirtieron en un medio de transporte y como tal requerían infraestructura, por lo que en la década de los 30's, surgen los primeros aeropuertos, necesarios para que las aeronaves pudieran realizar despegues, aterrizajes, maniobras, recibir mantenimiento, cargar combustible, etc.

En un principio los aviones eran tan ligeros que podían aterrizar sobre una granja o pradera, sin embargo, con el tiempo se descubrió que la hierba ocasionaba daño a los neumáticos, por ello comenzaron a utilizarse las pistas de tierra, dando mejores resultados que las anteriores pero tenían un inconveniente, cuando llovía, aterrizar sobre ellas era muy peligroso. El agua también fue utilizada como pista de acuatizaje, sin embargo, la presencia inesperada de las olas cobró algunas víctimas, provocando que la idea fuera desechada.

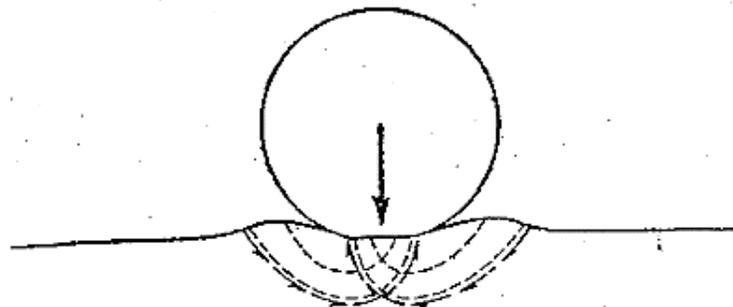
Con el paso de los años los ingenieros se han encargado del desarrollo del transporte y la infraestructura que cada uno requiere, en el caso del transporte terrestre, los vehículos requieren de ruedas para poder desplazarse, mientras que en el aéreo, se requieren para



comenzar el ascenso de la aeronave y en el momento del aterrizaje y frenado. Cuando las ruedas giran sobre tierra no mejorada, la resistencia en ellas es excesiva, por eso surge la necesidad de crear superficies de rodadura de mejor calidad.

La carga de una rueda crea una depresión en la superficie que la soporta, porque tensión y deformación son inseparables. La figura 1.1 puede servir para representar cómo la deformación de la superficie de la tierra encuentra una resistencia ocasionada por los esfuerzos cortantes en el interior de su masa y al mismo tiempo sugiere la idea de que se realizó un trabajo al desplazar las partículas del suelo contra la resistencia del rozamiento interno.¹

Figura 1.1 Deformaciones en el pavimento



Fuente: Fundamentos de Ingeniería del Transporte. Robert G. Hennes, Martin I. Erse, p. 7

La solución adoptada en la construcción de aeropistas fue el uso de un pavimento, ya fuera rígido o flexible, con ello las ventajas fueron considerables, sin embargo, la evolución de las aeronaves es constante, el peso de éstas se va aumentando, en ocasiones ya no cuentan con un solo tren de aterrizaje, la expulsión de gases a grandes velocidades, en fin, todas las modificaciones en los aviones provocan buscar mejoras en los pavimentos, lo cual resulta en nuevos retos para la ingeniería.

1.3 PAVIMENTOS

En la actualidad todos los aeropuertos requieren aeropistas pavimentadas, ya sea que utilicen un pavimento a base de materiales bituminosos o con cemento, lo importante es

¹ Hennes, R. G., & Ekse, M. I. (1963). Fundamentos de Ingeniería del Transporte. Reverte, p.7.



cumplir con las exigencias de la construcción tomando en cuenta aspectos como el clima, las cargas, tipo de suelo, etc.

Se define como pavimento a la construcción que tiene la finalidad de repartir las cargas producidas por las ruedas de los vehículos para así reducir las presiones sobre el terreno hasta que tengan una intensidad tolerable.

De los dos tipos generales de pavimento, rígido y flexible, el que ofrece mayor resistencia a la compresión es el rígido, el cual utiliza el concreto a base de cemento tipo Portland. Mientras que el pavimento flexible se compone, generalmente, de capas de superficie bituminosas sobre capas de base granulares. También pueden utilizarse en la capa base materiales bituminosos.

Un aspecto que debe tomarse en cuenta durante el diseño del pavimento es la existencia de un buen drenaje, esto es, que no haya acumulaciones de agua sobre el pavimento que provoquen la inestabilidad del terreno, lo cual implica eliminar el agua superficial, controlar el agua que exista en la capa subterránea, el nivel de aguas freáticas y la capilaridad.

A diferencia de los pavimentos utilizados para carreteras, en las aeropistas la repetición de las cargas no es tan importante ya que la distribución de las cargas es mucho mejor, sin embargo, habrá repetición de las cargas en movimiento lento y estáticas en zonas como calles de rodaje, plataformas y extremos de pistas, por tal motivo se consideran zonas peligrosas desde el punto de vista del proyecto, debe recordarse que el desgaste de un pavimento es mucho mayor cuando la velocidad a la que van los vehículos es pequeña.

Con la aparición de los aviones de reacción surge un nuevo problema para los pavimentos, pues los materiales con los que estos se construyen deben cumplir con ciertos requisitos, esto es, ser resistentes al calor, al chorro de los reactores, a los combustibles vertidos y a los residuos ácidos de los aceites quemados. Se han buscado materiales especiales para los pavimentos, pero también se ha comprobado que una solución efectiva está en la etapa de operación.

Para reducir el desgaste de los pavimentos debido a los aviones de reacción se puede reducir el tiempo que los aviones emplean para calentamiento y realizándolo en secciones



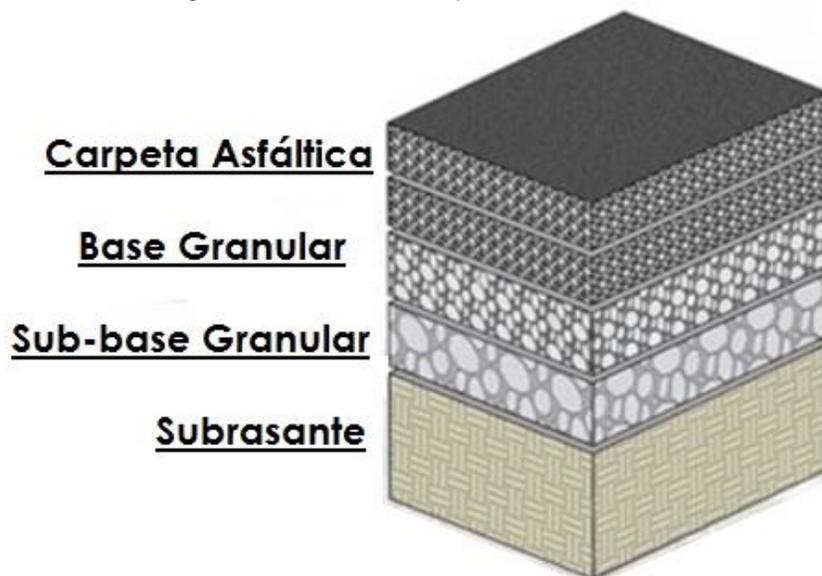
específicas construidas con cemento Portland o ladrillo, que son materiales que responden bien al calor.

1.3.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Son estructuras de pavimento que contienen al menos una capa construida de concreto asfáltico, es decir, una mezcla de agregado pétreo y un material aglutinante denominado cemento asfáltico.

La estructura convencional de los pavimentos flexibles se muestra en la figura 2.2, en ella se observa que bajo la carpeta bituminosa (aquella formada de concreto asfáltico) se disponen, por lo menos, dos capas bien diferenciadas: base y sub-base, ambas formadas por material granular, sin embargo, la primera siempre posee una granulometría y una calidad de materiales mejor que la segunda.

Figura 2.2 Estructura de pavimento flexible



Fuente: Productos Repsol. Consulta: 05 de Noviembre de 2014
(<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=605146&page=105>)

1.3.1.1 CAPA SUB-BASE

Su principal función en una estructura de tipo flexible consiste en resistir las cargas de tránsito y transmitir las de manera adecuada al terreno de cimentación fungiendo como una capa de transición entre la capa base y la de terracería, pues la primera es de material grueso y la segunda, de materiales finos.



Otra función de esta capa es absorber deformaciones perjudiciales en la subrasante tales como cambios volumétricos debidos a la humedad, impidiendo que estos se reflejen en la parte superficial del pavimento y produzcan daños estructurales o de servicio.

Como bien se sabe el agua es uno de los factores dañinos para la estructura es por ello que se debe contar con una capa que evite o disminuya los problemas que esta ocasiona, la capa sub-base evita la ascensión capilar del agua procedente del terreno de cimentación hacia la capa base y también funciona como un dren que desaloja el agua que logra infiltrarse de las capas superiores de la estructura.

En cuanto al aspecto económico, la construcción de esta capa ayuda a disminuir costos, pues a pesar de ser una capa gruesa, por ser de un material con pocos requisitos de calidad su costo es considerablemente menor que el de las capas suprayacentes.

1.3.1.2 CAPA BASE

Su función principal consiste en transmitir las cargas de tránsito con una intensidad apropiada para que sean resistidas por la capa sub-base, además, gracias a la existencia de la capa base se puede tener un espesor relativamente pequeño de la carpeta asfáltica, lo cual se ve reflejado de manera importante en el costo de construcción.

La capa base también drena el agua que se introduce por la carpeta asfáltica y/o los acotamientos o márgenes y en ocasiones, al igual que la capa sub-base, evita la ascensión capilar para evitar daños en la carpeta asfáltica.

1.3.1.3 CARPETA ASFÁLTICA

Esta capa debe proporcionar una superficie de rodamiento adecuada con textura y colores adecuados, así como resistir los efectos que produce el paso de los vehículos que estarán en contacto directo con ella, además de impedir, en medida de lo posible, el paso del agua a las capas inferiores.

1.3.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS

Son aquellos constituidos por una losa de concreto hidráulico, generalmente apoyada sobre capas de materiales bien seleccionados, llamadas sub-base y base. Estos se construyen



con cemento tipo Portland, resisten muy bien los esfuerzos de compresión y, gracias a su alta rigidez, los esfuerzos transmitidos al suelo de cimentación se distribuyen en una zona muy amplia. Para realizar el diseño estructural del pavimento en aeropuertos, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- ✚ Las propiedades que posee el concreto
- ✚ La capacidad de carga que tiene la capa subrasante o, en caso de tener capa sub-base, la capacidad de carga resultante de la combinación de ambas.
- ✚ El tipo de aviones que recibirá el aeropuerto, las cargas que estos aplicarán sobre el pavimento y la frecuencia con la que las aeronaves utilizarán dicha superficie.
- ✚ Uso que se le dará al pavimento, pues cada una de las zonas tiene necesidades diferentes, es decir, se requiere diseño distinto para calles de rodaje, aeropista, plataformas, etc.

Se utiliza concreto simple para la construcción de este tipo de pavimentos debido a que el uso del acero resulta ser muy costoso e innecesario pues no reduce sustancialmente el espesor de la capa de concreto.

1.3.2.1 FALLAS TÍPICAS DE PAVIMENTO RÍGIDO

Los pavimentos construidos por losas de concreto deben asegurar una superficie lisa y resistencia, por lo que su falla principal consiste, precisamente, en el incumplimiento de dichas características. La aparición de grietas es la falla estructural más común, sin embargo, en ocasiones éstas llegan a aumentar la resistencia del pavimento.

Una de las precauciones que se deben tomar durante el diseño y la construcción es, precisamente, evitar la aparición de estas grietas, pues aunque sean mínimas y no impidan que el pavimento cumpla con su objetivo, éstas pueden ser el inicio de un problema grave, es decir, en esas pequeñas grietas puede penetrar el agua y afectar las capas subyacentes, en especial la sub-base, también pueden favorecer la entrada de agentes extraños que eviten la movilidad que necesitan las losas.

Existe cierta similitud entre las grietas y las juntas, pues estas dividen las losas de concreto en elementos que trabajan de manera independiente, lo cual favorece al funcionamiento del pavimento, sin embargo, la diferencia de éstas radica en que las primeras siguen una



trayectoria irregular y no contienen sello mientras que las primeras tienen dimensiones definidas desde proyecto y los materiales de sello son especiales para evitar la permeabilidad y la entrada de agentes que pongan en peligro la estructura del pavimento.

Existen dos razones principales por las que las grietas aparecen en los pavimentos rígidos: los cambios ambientales de temperatura y humedad provocan la deformación volumétrica de las losas, la segunda es debida al paso de cargas sobre las losas ya afectadas produciendo esfuerzos adicionales en el pavimento.

1.3.2.2 TIPOS DE JUNTAS

Como se ha mencionado, los agrietamientos longitudinales y transversales son comunes en este tipo de pavimentos, es por ello que se construyen juntas, buscando que cumplan con los siguientes objetivos:

- ✚ Controlar el agrietamiento provocado por contracciones reprimidas y por los efectos combinados del alabeo restringido y las cargas de los aviones.
- ✚ Proporcionar la transferencia adecuada de las cargas.
- ✚ Impedir que materias extrañas se infiltren.
- ✚ Dividir el pavimento en proporciones adecuadas para su construcción

JUNTAS LONGITUDINALES

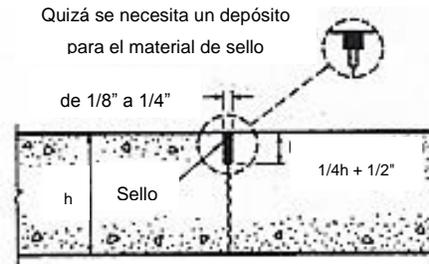
Son aquellas paralelas a los carriles de construcción, estas pueden ser juntas de construcción o juntas intermedias. La separación existente entre las juntas longitudinales depende principalmente del equipo de construcción que se utiliza, de la anchura que tendrá la pista y del espesor de la losa.

La necesidad de juntas longitudinales está relacionada con el espesor de las losas, esto es, en losas delgadas se requiere de juntas longitudinales intermedias para evitar la aparición de grietas longitudinales, mientras que las losas gruesas pueden ser prescindibles. .

Las juntas longitudinales intermedias son aquellas que se colocan en la zona central de la pista, pueden ser del tipo ranura superficial (hechas con sierra) o rellenas.

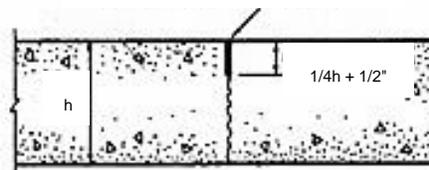


Figura 1.3 Juntas intermedias longitudinales



Junta aserrada

Tira de plástico (de 20 milipulgadas mínimo; 0.020") o moldeada colocada al ras con la superficie



Sólo deben usarse cuando la separación entre juntas sea de 15' o menos

Tira de plástico moldeada

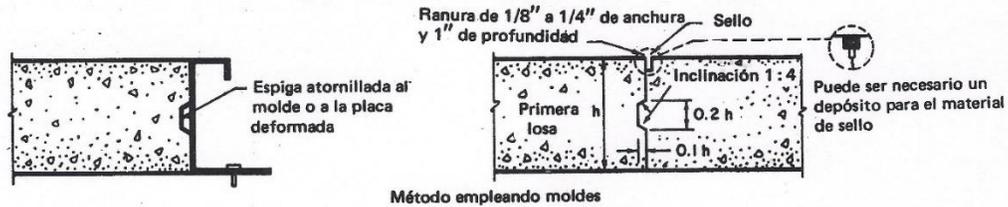
Nota: Deberán usarse varillas corrugadas a la profundidad $/2$ a través de las juntas cuando así se indiquen en el texto

Fuente: Portland Cement Association, Diseño de Pavimentos de Concreto para Aeropuertos, Ed. Limusa S.A. 1977, p.32

Las juntas longitudinales pueden ser por construcción en el borde de cada carril, estas pueden ser del tipo de caja y espiga, son necesarias para que se pueda obtener una buena transferencia de carga en ese lugar.

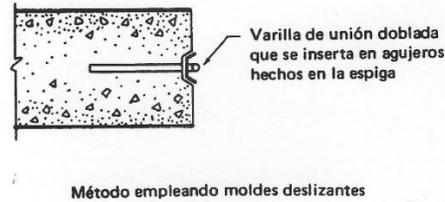
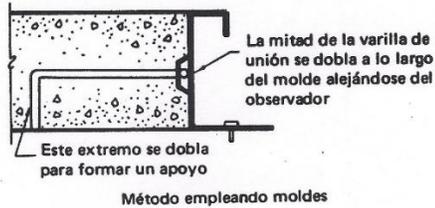


Figura 1.4 Juntas de construcción longitudinales



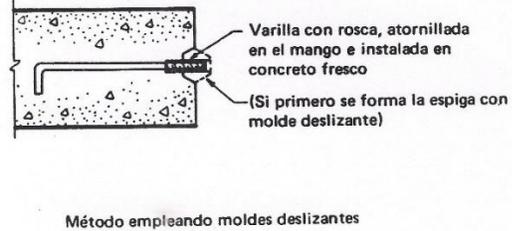
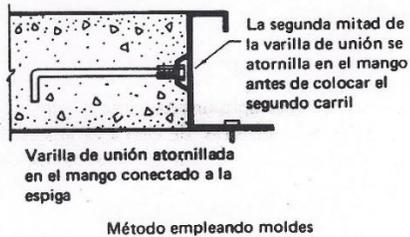
JUNTAS SIN VARILLAS DE AMARRE

(Todas las dimensiones, sello y depósito para el mismo son las que se dan arriba a la derecha)



JUNTAS DE CAJA Y ESPIGA CON VARILLAS DE UNION

(Todas las dimensiones del sello y depósito son las que se dan arriba a la derecha)



JUNTAS DE CAJA Y ESPIGA CON PASADORES

(Todas las dimensiones del sello y depósito son las que se dan arriba a la derecha)

NOTAS: Sólo se usan barras o pasadores en determinados lugares — véase el texto.
La espiga y las varillas de unión a la profundidad $h/2$

Fuente: Portland Cement Association, Diseño de Pavimentos de Concreto para Aeropuertos, Ed. Limusa S.A. 1977, p.33

En el diseño de los pavimentos se deben tomar en cuenta futuras ampliaciones, por lo que a lo largo del borde exterior de todos los pavimentos se deben construir juntas de caja y



espiga para disponer de un medio de transferencia. Para lograr el mismo fin también se pueden engrosar los bordes.

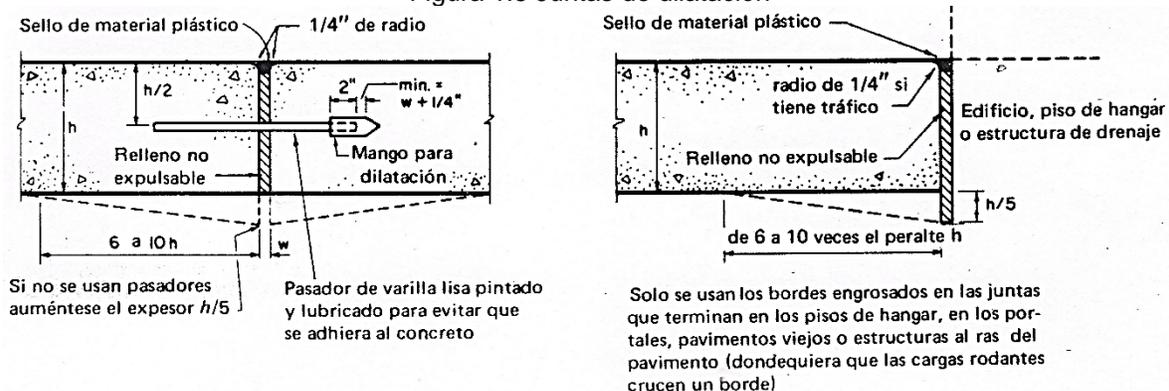
JUNTAS LONGITUDINALES EN PAVIMENTOS DE SERVICIO PESADO

En el caso de pavimentos que soportan cargas importantes como las de los aviones es necesario que las juntas longitudinales tengan refuerzo en la zona donde se canaliza el tránsito, esto es, en la zona central, aunque no es la única manera de obtener una resistencia mayor, existen otras medidas, como las que menciono a continuación:

- ✚ Engrosar los bordes en todas aquellas juntas con la configuración de caja y espiga que no contienen amarres.
- ✚ En las juntas a tope engrosar los bordes.
- ✚ Colocar varillas atravesadas en las juntas para que el engrosamiento de los bordes no sea necesario.
- ✚ Colocar las losas de concreto sobre una base estabilizada con un valor k mínimo de 400 lb/pulg^3 .

El uso de varillas de acero en las juntas no sirve para aumentar la resistencia del pavimento, como ya lo he mencionado, sin embargo éstas producen una transferencia de cargas mejor, lo cual se traduce en un buen trabajo del pavimento.

Figura 1.5 Juntas de dilatación



Fuente: Portland Cement Association, Diseño de Pavimentos de Concreto para Aeropuertos, Ed. Limusa S.A. 1977, p.35



JUNTAS DE CONTRACCIÓN

Controlan la formación de grietas transversales con forma irregular debidas a la contracción que sufren las losas, también ayudan a disminuir los esfuerzos producidos por las restricciones a los cambios de volumen en el concreto.

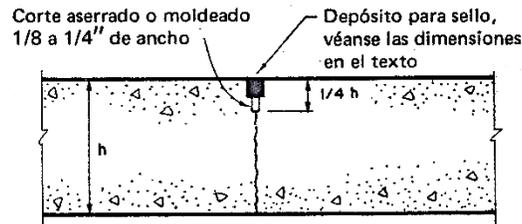
Este tipo de juntas suelen ser de ranura superficial, las cuales pueden ser aserradas o vaciadas. Un aspecto importante al construir las pistas es la previsión de ampliaciones, por ello se recomienda dejar elementos que ayuden a la transferencia de cargas en la posible adición de losas.

JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN TRANSVERSALES

Este tipo de juntas son necesarias cuando los turnos diarios finalizan o cuando se interrumpen las operaciones en la construcción durante un periodo de tiempo mayor o igual a 30 minutos. Cuando se tiene que parar la construcción de la losa en su tercio medio, es necesario preparar una junta del tipo caja y espiga con varillas para evitar que se abra la junta; por otra parte, cuando se debe hacer una junta de construcción cerca de una junta de contracción se recomienda realizar una junta del tipo a tope utilizando varillas. Todas las juntas de este tipo deben estar señaladas en proyecto como se muestra en la figura 1.6.



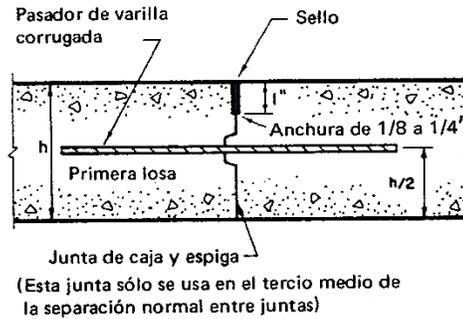
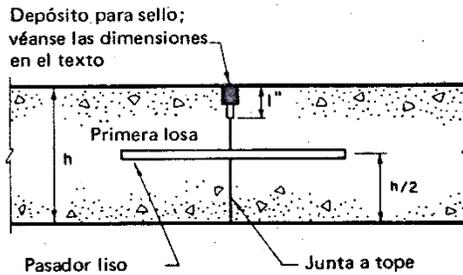
Figura 1.6 Juntas transversales



Junta aserrada o moldeada

En los pavimentos reforzados, instálense varillas lisas a la profundidad $h/2$.
Véase en el texto el uso de pasadores en ciertos lugares en los pavimentos sin refuerzo

JUNTA DE CONTRACCION



Juntas coladas (no aserradas)

JUNTAS DE CONSTRUCCION

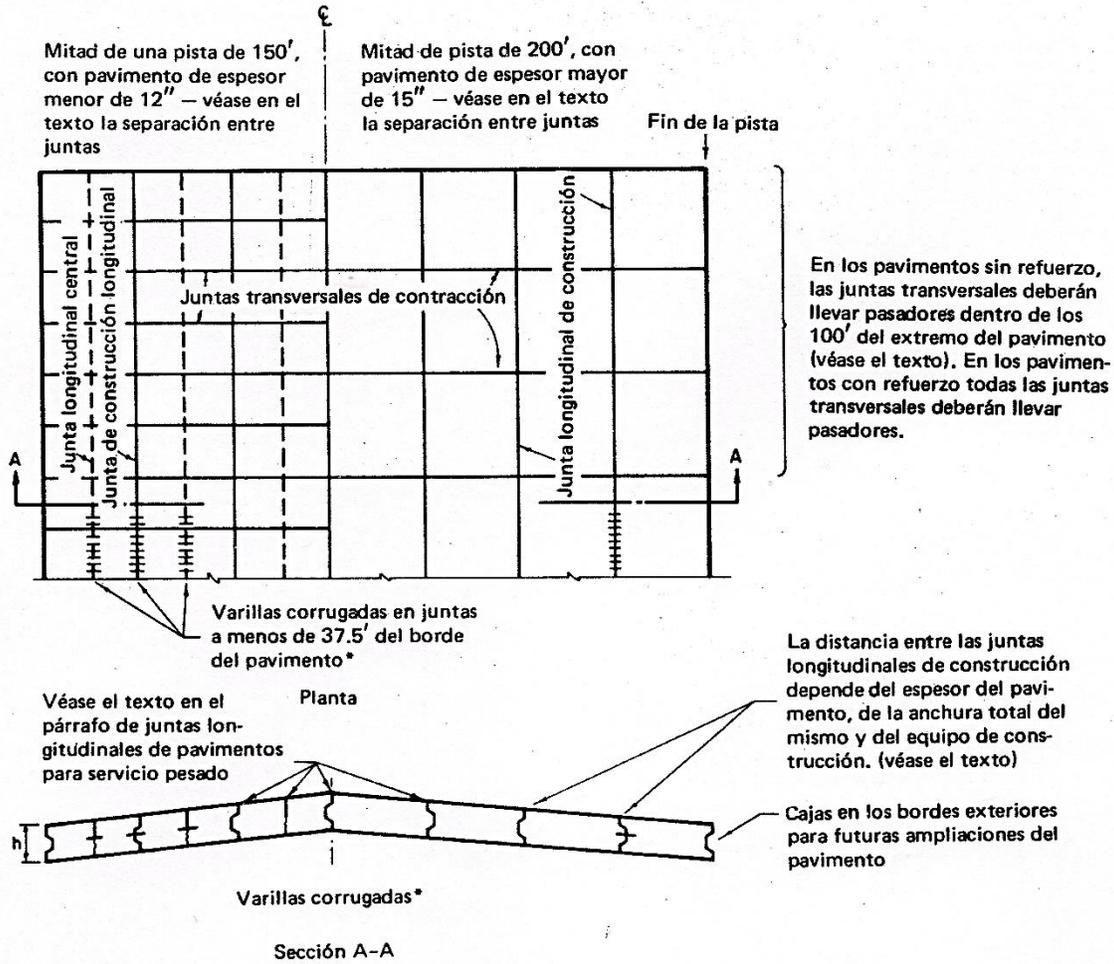
Fuente: Portland Cement Association, Diseño de Pavimentos de Concreto para Aeropuertos, Ed. Limusa S.A. 1977, p.35

DISTRIBUCIÓN DE LAS JUNTAS EN LAS INTERSECCIONES DE LAS PISTAS

Un gran problema se presenta cuando hay intersecciones de los pavimentos pues éstas poseen formas irregulares por los diferentes ángulos que existen entre ellas pues no se puede establecer un patrón universal para el acomodo de las juntas, sin embargo, en la figura 1.4 se muestran las distribuciones típicas.



Figura 1.7 Intersecciones típicas de aeropistas, calles de rodaje y plataformas y acomodo de juntas



*En las pistas con anchura menor de 75', todas las juntas longitudinales llevarán varillas de unión corrugadas

Fuente: Portland Cement Association, Diseño de Pavimentos de Concreto para Aeropuertos, Ed. Limusa S.A. 1977, p.35

1.3.2.3 CAPA BASE

Se le llama base a la capa de materiales integrada por suelos seleccionados que se construye previo a la capa de rodadura o a la carpeta estructural. Su construcción depende



del aspecto económico; algunas de las funciones de la base son transmitir las cargas de tránsito vehicular a la capa donde se apoya, drenar el agua y evitar la ascensión capilar.²

Cuando la capa no cumple con la normativa o la resistencia del material utilizado no es suficiente para el buen funcionamiento del pavimento ante las cargas que genera la rodadura de las llantas, se deben construir las llamadas bases estabilizadas, las cuales se obtienen a partir de la adición de algún producto químico que modifica la calidad y, por tanto, la resistencia del material.

Algunos de los productos químicos que se adicionan a las bases son:

- ✚ Cemento hidráulico (ocupado para modificar y también estabilizar el material)
- ✚ Asfalto
- ✚ Concreto hidráulico magro (concreto pobre) o de baja resistencia.

1.3.2.4 SUBRASANTE

Como ya se ha mencionado, la rigidez que posee el pavimento de concreto lo dota de una resistencia a la flexión considerable por lo que logra distribuir las cargas que generan las ruedas en áreas muy grandes, por ello no se requiere una subrasante muy resistente.

Sin embargo, la capa subrasante debe cumplir con una característica muy importante, debe ser uniforme. En caso de encontrarse con irregularidades en el terreno que servirá para fundar el pavimento, se debe excavar el material y reemplazar por otro que posea características similares al de las capas adyacentes y compactar para conseguir la misma densidad.

Teniendo una capa subrasante con una uniformidad aceptable y previniendo los cambios volumétricos excesivos que provocan los suelos expansivos, se logra una superficie adecuada para la colocación de un pavimento rígido. El soporte que esta capa le

² (s.f.). Obtenido de

http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Catalogo_Pavimentos/Catalogo.pdf
Consulta hecha el 23 de Abril de 2014.



proporciona al pavimento se expresa con el módulo de reacción denominado “k”, el cual puede ser determinado mediante ensayos de carga o por medio de métodos matemáticos utilizando valores de otros ensayos.

1.3.3 PAVIMENTOS PERPETUOS

El concepto de pavimento perpetuo o de larga duración se refiere a aquel pavimento cuyas características estructurales le permiten una vida útil mayor a 50 años con el mínimo de mantenimiento en su superficie de rodamiento y ningún mantenimiento en las capas inferiores

Los pavimentos perpetuos poseen una capa asfáltica de espesor importante, la cual se coloca directamente sobre la capa subrasante que puede ser mejorada o no, sin embargo, cuando hay una zona donde las cargas sean importantes, el pavimento se construye sobre una capa de base granular. Esta disposición de capas da como resultado una estructura más delgada que la de un pavimento flexible convencional, en la cual, se economiza al colocar una capa asfáltica delgada, pero se invierte en gruesas capas de agregados.

Al tener una capa con productos asfálticos más gruesa, los problemas generados por la aparición de grietas de fatiga pueden quedar descartados, en consecuencia, la estructura no se deteriora con gran facilidad, lo único que sufre daños es la capa superficial que está en contacto directo con las cargas, sin embargo, ésta puede remplazarse con la misma profundidad de diseño e incluso puede reciclarse.

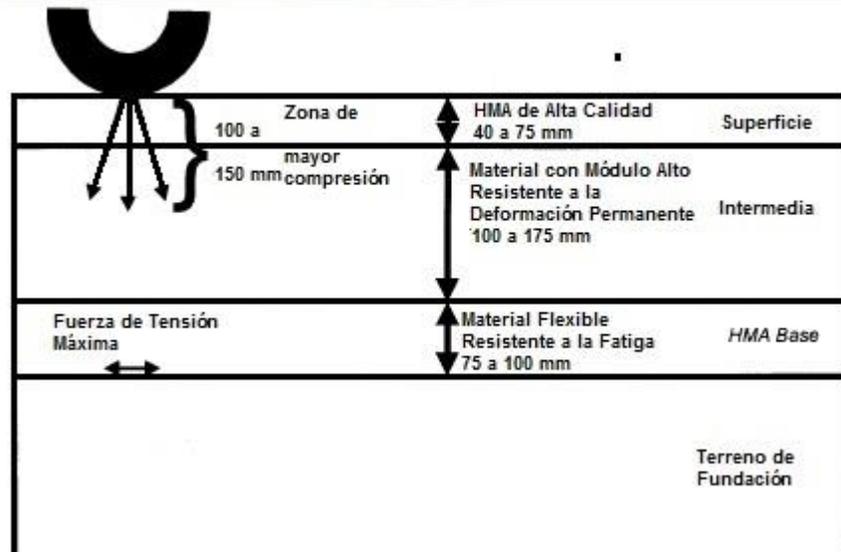
El hecho de que un pavimento pueda tener una vida útil aún mayor a los 50 años se debe a la correcta selección de los materiales a utilizar, al diseño de la mezcla asfáltica y a las diversas pruebas de rendimiento que han provisto de una metodología de diseño que únicamente exige la sustitución periódica de la capa superficial de la estructura.

La durabilidad del pavimento requiere de la combinación de capas asfálticas, una resistente a la deformación permanente y al desgaste en la parte superior de la estructura, con una capa intermedia resistente a la deformación permanente y una capa base resistente a la fatiga, esta disposición de capas se muestra en la figura 1.8, además se pueden observar los espesores que la Asphalt Pavement Alliance (APA) recomienda para dichas capas.



Figura 1.8 Estructura típica de pavimentos perpetuos

Estructura de Pavimento Perpetuo



Fuente: APA, Perpetual Pavemente Synthesis, Order Number APA 101, 2002

Los espesores mínimos que la FAA³ recomienda utilizar en estructuras de pavimentos perpetuos son los siguientes:

- ✚ Mezcla asfáltica en caliente (HMA) de Alta Calidad: 38 a 75 mm (1.5 a 3 pulgadas)
- ✚ Material con Módulo Alto Resistente a la Deformación Permanente: 75 a 100 mm (3 a 4 pulgadas)
- ✚ Material Flexible Resistente a la Fatiga: 100 a 250 mm (4 a 10 pulgadas)

Los pavimentos perpetuos son recomendables cuando se tienen caminos con volúmenes de tráfico importantes y en aquellos aeropuertos importantes donde los costos por usuario-retardo estén prácticamente prohibidos, sin embargo, su uso puede extenderse a carreteras con volúmenes de tráfico bajos y a cualquier aeropuerto en los que se prevea recorte de fondos y los costos de mantenimiento requieran ser bajos.

Más allá de la necesidad de estabilidad a un largo plazo, la pieza clave de los pavimentos perpetuos es el terreno de fundación pues éste debe proveer una plataforma de trabajo

³ Navneet Garg, P. F.-E. (Julio de 2014). Obtenido de <http://www.airporttech.tc.faa.gov/conference/2013APWG/20130416/09Garg.pdf>



adecuada para la colocación y la compactación de las capas de asfalto. Otro aspecto importante para los pavimentos de larga duración es la etapa de construcción ya que si esta no se realiza de manera adecuada, el proceso de diseño de la estructura y de selección de materiales estaría incompleto.

Hasta el momento, con base en el comportamiento de los primeros pavimentos perpetuos construidos hace varias décadas, se considera que el fallo de los pavimentos de larga duración o perpetuos se debe únicamente a los problemas de la capa superficial y que los problemas estructurales en el fondo de la estructura han sido eliminados o, al menos, minimizados.

En la figura 1.9 se muestra, del lado izquierdo una sección transversal de pavimento flexible convencional que ha fallado debido a la fatiga y del lado derecho, la sección transversal de un pavimento perpetuo, donde se observa que la capa superficial es la única que presenta problemas de roderas, mientras el resto de la estructura se encuentra en perfectas condiciones.

Estructuralmente, es importante que el pavimento cuente con espesor y rigidez adecuados a fin de resistir la deformación en el material sobre el cual se fundamenta, así mismo, las capas con material asfáltico deben ser lo suficientemente gruesas para que el agrietamiento ocasionado por fatiga no llegue a producirse en la parte inferior de la estructura ya que con el paso del tiempo, las grietas llegarían a la superficie de la estructura y la resistencia del pavimento se vería afectada.

Figura 1.9 Comparación entre fallas en pavimento flexible convencional y perpetuo.



Fuente: FAA Airport Pavement Working Group, Construction Cycle-7 Plans, 16 Abril 2013.



Los procedimientos que actualmente se utilizan para el diseño de pavimentos no consideran por separado la contribución de las distintas capas del pavimento para resistir fatiga, roderas o agrietamiento por temperatura; los métodos basados en el California Bearing Ratio (CBR) o el procedimiento de coeficiente estructural de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) no consideran las contribuciones de las diferentes capas de HMA que tiene el pavimento, sin embargo, el enfoque mecánico empírico si lo hace.

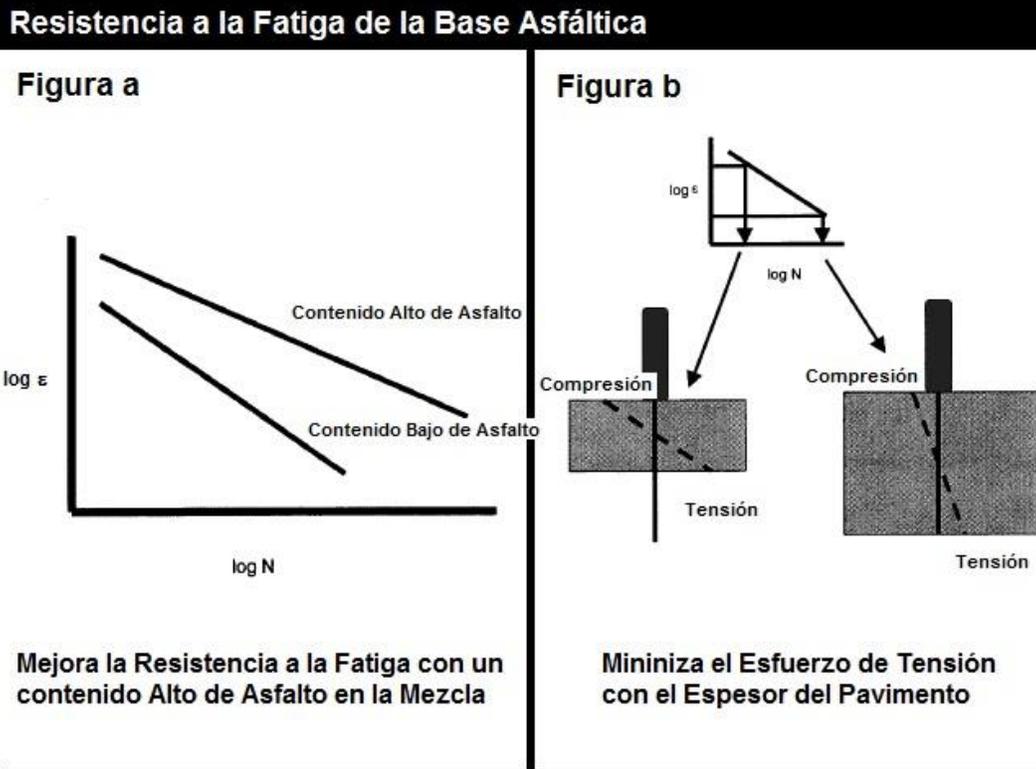
El terreno de fundación o subrasante es muy importante en el diseño y construcción de los pavimentos perpetuos, al igual que en otro tipo de pavimentos, esta capa debe ser una plataforma de trabajo adecuada, pues sobre esta pasarán los camiones de volteo y los rodillos que se requieran para la etapa de construcción. Debe ser resistente a la deflexión con el fin de que las capas superiores puedan ser compactadas de manera adecuada.

1.3.3.1 CAPA BASE DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

El objetivo principal de esta capa es resistir la fatiga que provoca el paso repetido del tráfico que soportará la estructura, a fin de evitar la aparición de grietas en el fondo de la capa. Una característica importante del diseño de la mezcla que puede ayudar a evitar este agrietamiento es un contenido alto de asfalto. La figura 1.10 muestra las ventajas de utilizar un alto contenido de asfalto en el diseño de mezcla de la base HMA a utilizar, en la figura “a” se observa que la pendiente de la recta es menor que cuando el contenido es bajo, por tanto, la deformación es más pequeña; en la figura “b” se observa que los esfuerzos de tensión y compresión, gracias a que el espesor aumenta, son menores, con lo que la aparición de grietas se reduce.



Figura 1.10 Ventajas del alto contenido de asfalto en la base HMA



Fuente: FAA Airport Pavement Working Group, Construction Cycle-7 Plans, 16 Abril 2013.

Otro enfoque que asegura la resistencia a la fatiga de un pavimento es diseñar el espesor para una estructura rígida tal que la tensión en la parte inferior de las capas asfálticas sea minimizada hasta que el daño acumulativo no pueda ocurrir. De esta forma se puede hacer más sencillo el diseño pues la mezcla asfáltica en la base y capas intermedias puede ser el mismo y la necesidad de crear un diseño de mezcla distinto para las capas inferiores de la estructura desaparecería.

El contenido de asfalto en la base debe ser aquel que produzca pocos vacíos de aire en el lugar, esto asegura que haya mayor volumen de aglutinante (cemento asfáltico) ya que éste se introduce en los vacíos que hay en el agregado mineral, esto es importante para asegurar la durabilidad y la flexibilidad. En caso de tener un contenido de vacíos alto, la resistencia a la fatiga puede verse disminuida.



Debido a que esta capa está expuesta a la humedad, es aconsejable llevar a cabo pruebas de susceptibilidad a ésta, el contenido de asfalto puede ayudar a mejorar la resistencia a la humedad logrando que la capa lleve a cabo su función de manera adecuada.

1.3.3.2 CAPA INTERMEDIA

A esta capa también se le puede nombrar capa aglutinante, los objetivos de ésta son dotar de estabilidad a la estructura así como de durabilidad. Para que esta capa pueda ser estable es necesario lograr un contacto importante entre los agregados gruesos y utilizar un cemento asfáltico duro o apto para temperaturas altas. Esto es importante en los 15 cm superiores de la estructura de pavimento (capa superficial y parte de la capa intermedia), que son los que se enfrentan a esfuerzos cortantes importantes producidos por las llantas de las aeronaves.

La capa debe tener una fricción interna suficiente la cual se puede obtener mediante el uso de agregados triturados o gravas, se pueden utilizar agregados de tamaño nominal máximo, este tipo de mezclas requieren un diseño específico que debe seguirse de manera correcta para lograr los resultados deseados.

El estudio de rendimiento para esta prueba debe incluir como mínimo una prueba de deformación permanente y una de susceptibilidad a la humedad, de acuerdo a la metodología SUPERPAVE para el diseño de mezclas asfálticas del Instituto del Asfalto.

1.3.3.3 SUPERFICIE

Se trata de la capa que estará en contacto directo con las aeronaves, por ello, los requisitos a cumplir dependen de las condiciones de tráfico, del medio ambiente, de la economía, la experiencia del diseñador, etc. En cuanto al rendimiento de la capa, se debe evitar la formación de roderas, el agrietamiento de la superficie, además se debe asegurar una fricción adecuada entre el pavimento y las ruedas de la aeronave, se debe minimizar el ruido del neumático, etc.

Estos requisitos pueden lograrse mediante el uso de mezclas tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) las cuales son mezclas densas que proporciona resistencia a la deformación, material de revestimiento duradero y adecuado para pavimentos con mucho tráfico o el uso



de Open Graded Friction Course (OGFC, que son mezclas de granulometría gruesas o abiertas cuyas principales características son el alto porcentaje de aire (15% aproximadamente) y la permeabilidad al agua.

Cuando se desea utilizar una mezcla HMA convencional o SMA será necesario diseñarla contra la formación de roderas, permeabilidad, intemperismo y desgaste de la superficie. Por otro lado una mezcla tipo open graded se utilizará cuando la zona donde se construya el pavimento tenga presencia importante de lluvias, pues la presencia de vacíos que tiene permite que el agua drene de la superficie, se ha demostrado que un 18 a 22% de vacíos es bueno a largo plazo.

1.3.3.4 CUIDADOS REQUERIDOS PARA LOS PAVIMENTOS PERPETUOS

Para asegurar que el pavimento perpetuo que se ha construido funcione de manera adecuada durante un periodo de vida considerable es necesario monitorear de manera periódica el comportamiento de la estructura con el fin de mantener todas las formas de desgaste en la capa superficial del pavimento.

Cuando la fatiga se presente desde la parte superior y haya grietas que vayan descendiendo, cuando la temperatura genera grietas, cuando aparezcan las roderas o se desgaste la superficie se debe tener cuidado de que estos problemas no se propaguen de la capa superficial a las inferiores ya que de esta manera el pavimento perpetuo dejaría de cumplir con sus objetivos. Cuando estos daños aparezcan será necesario programar una restitución de dicha capa, así se asegurará que la estructura pueda seguir funcionando de manera deseada evitando la colocación de sobre-espesores adicionales.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 INFRAESTRUCTURA AEROPORTUARIA

El desarrollo que ha experimentado el transporte aéreo, aunado a su incremento considerable, ha provocado que las terminales aéreas se conviertan en lugares cada vez más frecuentados por los pasajeros, por ello es necesario dotarlos de instalaciones adecuadas para satisfacer sus necesidades y evitar que su servicio colapse.

Desde el punto de vista de las operaciones aeroportuarias, podemos distinguir dos zonas en un aeropuerto, ambas zonas se distinguen por las funciones que se realizan en cada una de ellas:

- ✚ Lado tierra: Cuyos servicios se concentran en los pasajeros y la satisfacción de sus necesidades; el elemento principal, para el caso de aeropuertos comerciales de pasajeros, es la terminal, mientras que para los aeropuertos de carga, es la terminal de carga o bodegas.
- ✚ Lado aire: Concentra su atención en las aeronaves y lo que éstas requieren; el elemento principal es la pista de aterrizaje, sin embargo, también forman parte de esta zona las calles de rodajes, plataformas, hangares, etc.

2.1.1 AERÓDROMO

Área definida de tierra o de agua (que incluye todas sus edificaciones, instalaciones y equipos) destinada total o parcialmente a la llegada, salida y movimiento en superficie de aeronaves.⁴

⁴ OACI. (Julio 2004). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Cuarta ed.), p. 1-1.



Figura 2.1 Aeródromo



Consulta: 08 de Abril de 2014 (<http://www.aeropuertos.net/aeropuerto-internacional-de-la-ciudad-de-mexico/>)

De acuerdo a la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), que es el organismo encargado de proponer las normas y recomendaciones de carácter internacional sobre los distintos aspectos de aeronáutica civil, los aeropuertos pueden clasificarse según la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de aeropuertos

Tipo	Nombre del aeropuerto	Peso total de las aeronaves que pueden alojar
A	Transoceánico	Hasta 135 Ton
B	Transcontinental	Hasta 90 Ton
C	Internacional	Hasta 60 Ton
D	Nacional	Hasta 40 Ton
E	Local	Hasta 27 Ton
F	Local	Hasta 18 Ton, pero que no necesitan balizamiento nocturno ni medios de radionavegación
G	Local	Hasta 11 Ton
H	Local	Hasta 7 Ton

Fuente: Vías de Comunicación: Caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos. Carlos Crespo Villalaz



También podemos definir el tipo de aeropuerto de acuerdo al número de habitantes que hay en la zona según la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Elección de aeropuertos

Número de habitantes	Tipo de aeropuerto recomendable
Más de 250.000	A, B o C
De 250.000 a 100.000	D
De 100.000 a 25.000	E, F o G
De 25.000 a 5.000	H

Fuente: Vías de Comunicación: Caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos. Carlos Crespo Villalaz

2.1.2 ZONA DE MANIOBRAS

Sea cual sea el tipo de aeropuerto que se deseé construir, existen zonas que son indispensables, entre ellas encontramos el área de maniobras, la cual podemos definir como la zona donde se realizan los despegues, aterrizajes y rodaje de las aeronaves, con excepción de la plataforma, es decir, el área de maniobras se divide en calles de rodaje y pista.

Calle de rodaje: Vía definida en un aeródromo terrestre, establecida para el rodaje de aeronaves y destinada a proporcionar enlace entre una y otra parte del aeródromo, incluyendo:

- a) Calle de acceso al puesto de estacionamiento de aeronave. La parte de una plataforma designada como calle de rodaje y destinada a proporcionar acceso a los puestos de estacionamiento de aeronaves solamente.
- b) Calle de rodaje en la plataforma. La parte de un sistema de calles de rodaje situada en una plataforma y destinada a proporcionar una vía para el rodaje a través de la plataforma.
- c) Calle de salida rápida. Calle de rodaje que se une a una pista en un ángulo agudo y está proyectada de modo que permita a los aviones que aterrizan virar a velocidades



mayores que las que se logran en otras calles de rodaje de salida y logrando así que la pista esté ocupada el mínimo tiempo posible.⁵

Franja de calle de rodaje: Zona que incluye una calle de rodaje destinada a proteger a una aeronave que esté operando en ella y a reducir el riesgo de daño en caso de que accidentalmente se salga de ésta.⁶

Punto de espera de la pista: Es el punto en el que las aeronaves y vehículos se detienen y mantienen en espera hasta que la torre de control autoriza continuar. Se emplazan en las intersecciones de las calles de rodaje con la pista y en una calle de rodaje, cuando -debido a su emplazamiento o alineación- las aeronaves y vehículos en rodaje puedan invadir las superficies limitadoras de obstáculos o interferir con el funcionamiento de las radioayudas.⁷

Figura 2.2 Calles de rodaje



Consulta: 08 de Abril de 2014 (<http://www.foroxerbar.com/viewtopic.php?t=8445>)

⁵ OACI. (Julio 2004). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Cuarta ed.), p. 1-2.

⁶ OACI. (Julio 2004). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Cuarta ed.), p. 1-3.

⁷ Truyois Mateu, S., & Alcubilla de la Fuente, F. (s.f.). Transporte Aéreo e Ingeniería Aeroportuaria. Madrid, p. 245-246.



Pista. Área rectangular definida en un aeródromo terrestre preparada para el aterrizaje y el despegue de las aeronaves.⁸ La pista es el elemento de mayor importancia, por lo que su emplazamiento y el trazado de los demás elementos que lo componen deben ajustarse lo más posible a la ubicación de la misma. La figura 2.3 muestra una pista o aeropista típica.

Pista de despegue. Pista destinada exclusivamente a los despegues.¹⁰

Figura 2.3 Aeropista



Consulta: 08 de Abril de 2014. (<http://www.obrasweb.mx/construccion/2013/07/12/5-aeropuertos-que-aterizaron-antes-de-tiempo>)

Las características generales de las pistas son:

- ✚ **Longitud y Anchura:** Se determinan a partir de la aeronave crítica, es decir, aquella que tiene las mayores exigencias que se haya previsto que operará en el aeropuerto. La longitud de la pista será la mayor de las longitudes de carrera de despegue y aterrizaje.

⁸ OACI. (Julio 2004). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Cuarta ed.), p. 1-4.



- ✚ **Pavimento:** Debe garantizar un coeficiente de rozamiento adecuado cuando la pista esté mojada, además debe tener la resistencia necesaria para soportar el tránsito de todas las aeronaves que albergará el aeropuerto.
- ✚ **Pendientes:** Se consideran las longitudinales y las transversales, las primeras deben ser tales que permitan tener una línea de visión, al menos en la mitad de la longitud de la pista; las segundas deben ayudar a desalojar el agua y conducirla al drenaje.

Margen: Banda de terreno que bordea un pavimento, tratada de forma que sirva de transición entre ese pavimento y el terreno adyacente.⁹ Debe soportar el peso de las aeronaves que recibe el aeropuerto.

Haciendo un análisis más profundo, podemos decir que las pistas se caracterizan por:

- ✚ La resistencia de su **pavimento**
- ✚ Los **márgenes** en el borde del pavimento que deben resistir el chorro de los reactores y la circulación de los vehículos de servicio.
- ✚ La **franja de pista** que es una superficie definida que comprende la pista y la zona de parada, si la hubiese, destinada a:
 - a) reducir el riesgo de daños a las aeronaves que se salgan de la pista; y
 - b) proteger a las aeronaves que la sobrevuelan durante las operaciones de despegue o aterrizaje.¹¹
- ✚ El **área antichorro** que está en el extremo de la pista para evitar el daño de la superficie debido a la erosión.
- ✚ El **área de seguridad de extremo de pista (RESA)** es el área simétrica respecto a la prolongación del eje de la pista y adyacente al extremo de la franja, cuyo objeto principal consiste en reducir el riesgo de daños a un avión que efectúe un aterrizaje demasiado corto o un aterrizaje demasiado largo.⁷
- ✚ La **zona de parada (SWY)** que se define como el área rectangular definida en el terreno situado a continuación del recorrido de despegue disponible, preparada como zona adecuada para que puedan pararse las aeronaves en caso de despegue interrumpido.¹⁰

⁹ OACI. (Julio 2004). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Cuarta ed.), p. 1-3.

¹⁰ OACI. (Julio 2004). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Cuarta ed.), p. 1-5.



- ✚ La **zona libre de obstáculos (CWY)**, esto es, el área rectangular definida en el terreno o en el agua y bajo control de la autoridad competente, designada o preparada como área adecuada sobre la cual un avión puede efectuar una parte del ascenso inicial hasta una altura especificada.¹¹

Figura 2.4 Esquema de la pista (OACI)



Fuente: OACI. Curso rápido sobre el anexo 14 y Documentos Afines. Consulta: 5 de Abril de 2014
(<http://www.icao.int/SAM/Documents/2005/AIRPORTPAVEMENT/04%20Cap.%203%20-%20Pistas.pdf>)

La FAA y la OACI asignan nombres diferentes a ciertas zonas de la pista de un aeropuerto, sin embargo, coinciden con el uso y significado de las mismas; al margen o zona pavimentada utilizada para el tránsito de vehículos de emergencia y para las salidas accidentales de las aeronaves, la FAA la conoce como hombro, ya sea de pista o de calle de rodaje; así mismo, la franja de pista que es la parte que rodea la pista, es nombrada Área de Seguridad de la Pista. La figura 2.5 muestra un diagrama de las zonas de la aeropista de acuerdo a la FAA.

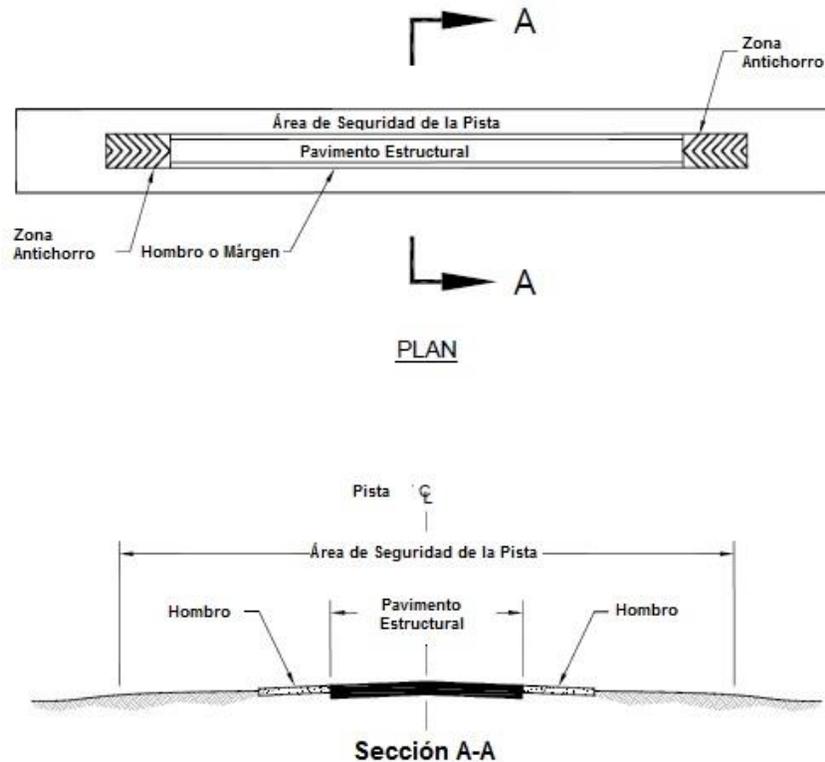
¹¹ OACI. (Julio 2004). Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Cuarta ed.), p. 1-6.



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS Gabriela García Saldivar



Figura 2.5 Esquema de la pista (FAA)



Fuente: FAA, Advisory Circular 150/5300-13A, Airport Design, p. 55

La anchura de la pista no puede definirse libremente, ésta debe diseñarse de acuerdo al tipo de aviones que va a recibir es por ello que, la Organización de Aviación Civil Internacional recomienda las medidas de la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Ancho de pistas

Número de Clave	Letras Clave					
	A	B	C	D	E	F
1°	18 m	18 m	23 m	-	-	-
2°	23 m	23 m	30 m	-	-	-
3°	30 m	30 m	30 m	45 m	-	-
4°	-	-	45 m	45 m	45 m	60 m

Fuente: OACI, Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Cuarta edición. Julio 2004, p. 3-2



2.2 CONCEPTOS BÁSICOS PARA DISEÑO

Como se ha mencionado anteriormente, la finalidad de construir una aeropista con pavimento es proporcionar el apoyo requerido para el soporte de las cargas de los aviones y para proveer a estos de una superficie adecuada en cualquier época del año, por lo que el diseño y la construcción son las etapas en las que más cuidado se debe tener para que el espesor y la calidad sean los adecuados.

El diseño de la aeropista debe seguir cierta normativa, la cual depende del lugar dónde se construya, en el caso de México, el diseño estará regido por las normas establecidas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la Administración Federal de Aviación (FAA), en la presente tesis, se utiliza principalmente la normativa de ésta última, pues FAAfield y COMFAA, los softwares que se utilizarán para el diseño y clasificación ACN-PCN, han sido desarrollado por dicha entidad.

La FAA establece los lineamientos para el diseño de ambos tipos de pavimentos, es decir, indica el procedimiento que se debe seguir cuando se desea que la aeropista se construya de pavimento flexible y cuando la construcción es de pavimento rígido, además menciona los procedimientos para mejorar pavimentos ya existentes utilizando materiales bituminosos o cemento Portland.

Ya sean flexibles o rígidos, en general, los pavimentos pueden constar de las siguientes capas:

- ✚ **Capa de Rodadura:** Es la capa que está en contacto directo con las ruedas de los aviones, puede ser de concreto hidráulico o concreto asfáltico.
- ✚ **Base:** Es la capa que se encuentra bajo la capa de rodadura, puede estar construida de una variedad de materiales, pero siempre se habla de una base estabilizada o no estabilizada; la segunda está hecha de agregados que pueden ser triturados o no, mientras que la primera, también puede tener agregados triturados o no que son mezclados con algún material que ayude a dar mayor resistencia tal como el cemento, asfalto u otros.



- + **Sub-base:** Esta capa puede llegar a ser prescindible en algunos casos, se compone de material granular e igual que la capa superior, puede ser estabilizada o no.
- + **Geosintéticos:** Son materiales comúnmente utilizados para solucionar problemas geotécnicos, pues su durabilidad los hace adecuados para la construcción de carreteras, estabilización de taludes, etc., en el caso de las aeropistas se pueden utilizar para controlar el agua subterránea, evitar la mezcla de las capas del pavimento, etc.; las características de la capa subrasante definen la necesidad de uso de estos materiales.

Las diferencias existentes en el comportamiento de los pavimentos hechos con cemento portland (rígidos) y asfalto (flexibles) como materiales cementantes, provocan que los espesores de la capa de rodadura y de las demás capas sea diferente, pues los esfuerzos que recibe el suelo de fundación son de diferentes magnitudes y los coeficientes que toma en cuenta cada diseño son distintos.

2.2.1 SOFTWARE FAARFIELD

Es un programa desarrollado por la FAA para el diseño de pavimentos de pistas, plataformas y calles de rodaje cuyas características se definen en la circular AC150/5320-6E.

El procedimiento de diseño que realiza este programa está basado en un análisis elástico y tridimensional de capa finita desarrollado para el cálculo de los espesores requeridos para un buen diseño de pavimentos para aeródromos. Este análisis fue necesario para abordar de una manera más apropiada las nuevas disposiciones de trenes de aterrizaje y ruedas que poseen las aeronaves.

El programa considera que las capas del pavimento analizado tienen un comportamiento elástico para poder calcular los esfuerzos y deformaciones que sufre la estructura a lo largo de su vida útil debido al paso de aeronaves. La manera de determinar el fallo de la estructura resulta ser diferente dependiendo del tipo de pavimento que se desee analizar.

La forma en que FAARfield determina si una estructura de tipo flexible ha fallado es mediante la deformación vertical que se produce en la parte superior de la subrasante y la



deformación horizontal producida en la parte inferior de las capas asfálticas, cuando estas deformaciones alcanzan cierta magnitud la estructura colapsa. Mientras que en el caso de pavimentos rígidos, lo que se toma en cuenta es la deformación horizontal que se produce en la parte inferior de la losa de concreto.

Adicionalmente a estas deformaciones, el software calcula el daño acumulado que los aviones provocan sobre la estructura a través del factor de daño acumulativo, cuando dicho factor alcanza el valor de uno, indica que la estructura ha alcanzado el número de coberturas permisibles del pavimento analizado.

El software considera que el tren de aterrizaje principal de cada avión estará colocado en una línea imaginaria al centro del pavimento, además nos dará el daño que ocasiona cada tipo de avión en el pavimento para que podamos comparar los daños provocados entre los aviones pertenecientes a la combinación de tráfico. Con estos dos aspectos, el programa genera gráficos que nos muestran los factores de daño acumulativo a cierta distancia de la pista, medida desde el centro de la misma.

Existen ciertos aspectos que deben tomarse en cuenta al utilizar el software FAARfield, tal como la recomendación de utilizar una vida útil de 20 años en todos los diseños, esto se debe a ciertos conceptos empíricos que utiliza el programa, a pesar de ello, no se debe perder de vista que solo se trata de una recomendación, en caso de desear realizar un proyecto con una vida útil mayor se puede hacer pues el programa resulta ser conservador.

Otro aspecto importante es que el programa toma en cuenta únicamente el número de salidas previstas para el aeródromo y las llegadas son despreciadas, esto se debe a que al momento de despegar se asume que el avión está lleno de combustible y que transporta un peso importante de pasajeros y mercancías que resulta ser mucho mayor que el peso con el que aterriza, además en el momento del aterrizaje, el peso de la aeronave es soportado en gran medida por las alas.

Una de las limitaciones que tiene este software es que no puede ser utilizado para comparar los espesores de la estructura de pavimento requeridos por el paso de aviones individuales que se realizaban con la metodología de aeronave de diseño.



2.2.1.1 RELACIÓN PASO-COBERTURA

Cuando las aeronaves se desplazan sobre la pista de aterrizaje o sobre cualquier estructura de pavimento es difícil que sigan siempre la misma trayectoria, lo que comúnmente ocurre es que se desplazan realizando cierto movimiento lateral que se conoce como fluctuación lenta del avión, esta sigue el comportamiento de una distribución normal.

En ocasiones puede tomar una gran cantidad de viajes o pases a lo largo de la superficie pavimentada para que se aplique una carga completa sobre una unidad de superficie, es por ello que se calcula la relación paso-cobertura

La relación paso-cobertura (P/C) es calculada por el programa FAARfield en determinadas zonas del pavimento. Dicho parámetro depende del tipo de pavimento que se esté diseñando, tal como se describe a continuación:

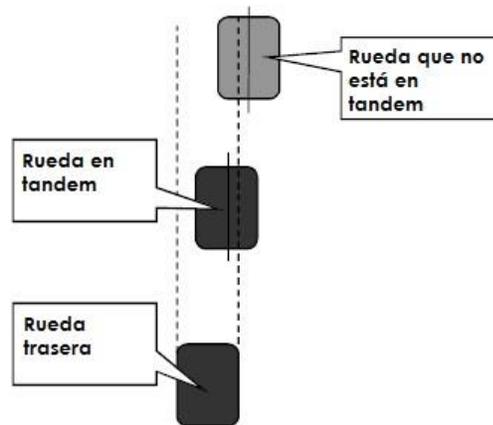
- ✚ Pavimento rígido: cuando se analiza un pavimento de este tipo, la relación P/C se calcula en la superficie de la estructura.
- ✚ Pavimento flexible (subrasante): Cuando se realiza una estructura de este tipo y se calcula el factor de daño en la subrasante, la relación P/C se calcula en la parte superior de la misma.
- ✚ Pavimento flexible (HMA): Cuando se realiza una estructura de este tipo y se calcula el factor de daño en la capa asfáltica, la relación P/C se calcula en la parte inferior de dicha capa.

Adicionalmente, en pavimentos flexibles, cuando se tienen aeronaves cuyos trenes de aterrizaje contienen ruedas dispuestas en un arreglo tándem, la relación P/C es ajustada por el programa mediante un factor cuyo valor oscila entre 1 y el número de ruedas en tándem. A continuación se resume el procedimiento a seguir para obtener la relación P/C:

- ✚ Determinar cuáles son las ruedas pertenecientes a cada tándem, en especial, las traseras. Una rueda se considera perteneciente a un grupo tándem cuando el centro de la misma se encuentre dentro de la anchura de la rueda trasera en la columna del tándem, tal como se observa en la figura 2.6.



Figura 2.6 Ruedas pertenecientes a un grupo tándem



Fuente: FAA, Pass-to-Coverage Computation for Arbitrary Gear Configurations in the FAARFIELD Program, 2012, p. 3

- ✚ Se determina para cada una de las ruedas traseras el número de ruedas asociadas a ellas.
- ✚ Se calcula el factor tándem (F_{tnd}) para cada rueda trasera (este es el factor mencionado con anterioridad que depende del número de ruedas en tándem).
- ✚ Calcular el índice de cobertura al paso C/P del área bajo la curva de distribución normal de tráfico entre los límites de la anchura efectiva del neumático.
- ✚ Aplicar el factor F_{tnd} a la relación C/P y obtener su inverso, el cual será el valor asignado a la relación P/C.

$$(C/P)_{final} = C/P \times F_{tnd} \dots(2.1)$$

$$P/C = \frac{1}{(C/P)_{final}} \dots(2.2)$$

El factor tándem F_{tnd} se obtiene de manera diferente de acuerdo al tipo de pavimento, es decir, si es rígido o flexible. Cuando se trata de un pavimento rígido, la forma en la que se obtiene el factor es la siguiente:

- ✚ $F_{tnd} = 1$ cuando la distancia del tándem es igual o menor a 72 pulgadas (183 cm)
- ✚ $F_{tnd} = 2$ cuando la distancia del tándem es mayor a 72 pulgadas
- ✚ $F_{tnd} = N$ cuando el número de ruedas en tándem son 3 o más, donde N es el número de ruedas dispuestas en tándem



- ✚ $F_{tnd} = N - n$ cuando se tiene un número n de pares de ruedas por cada tándem con distancias menores o iguales a 72 pulgadas.

En el caso de los pavimentos flexibles el factor tándem depende, además de la distancia (t), del espesor total del pavimento (h) medido a partir de la parte superior de la subrasante, tal como se observa en las siguientes expresiones:

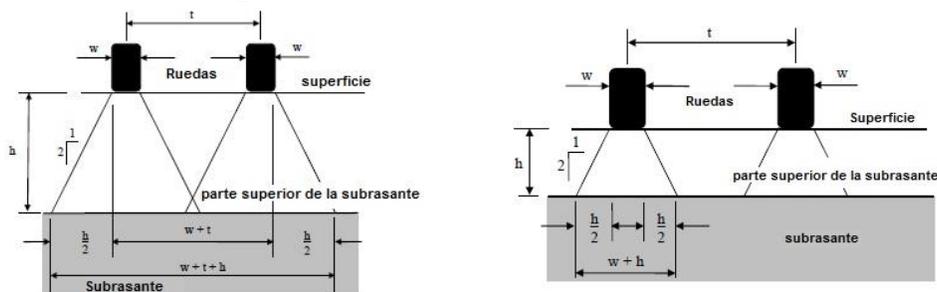
$$F_{tnd} = 1 \text{ cuando } \frac{h}{t} \geq 2 \dots(2.3)$$

$$F_{tnd} = N - (N - 1) \times \left(\left(\frac{h}{t} \right) - 1 \right) \text{ cuando } 1 < \frac{h}{t} < 2 \dots(2.4)$$

$$F_{tnd} = N \text{ cuando } \frac{h}{t} \leq 1 \dots(2.5)$$

Cuando se cumple que $h/2 < b < h$, entonces el factor para cuando el tándem es de dos ruedas se define por medio de interpolación con un valor entre 1 y 2. Cuando el tándem tiene un número de ruedas N , entonces el factor se interpola entre 1 y N . Para que esta interpolación se pueda utilizar, la distancia del tándem es constante, en caso de tener una distancia variable, entonces el factor se calcula para cada par de ruedas por separado.

Figura 2.7 Anchura equivalente de ruedas



Anchura Equivalente de Rueda con Traslape (Una rueda equivalente)

Anchura Equivalente de Rueda sin Traslape (Dos ruedas equivalentes)

Fuente: FAA, Technical Note: Pass-to-Coverage Computation for Arbitrary Gear Configurations in the FAArfield Program, 2012, p. 5.

El cálculo de C/P utiliza el concepto de ancho efectivo de rueda, en el cual se presentan los dos casos de la figura 2.7, además este concepto también varía de acuerdo al tipo de pavimento, es decir, en los rígidos mide el espesor de rueda efectiva en la superficie del pavimento, mientras que en los flexibles en ocasiones puede medirlo en la parte superior de la subrasante (criterio de esfuerzo vertical en la subrasante) o en la parte inferior de la capa asfáltica (criterio de esfuerzo horizontal) aunque por simplicidad el que se utiliza es el



de la subrasante. Para pavimentos rígidos se divide la superficie de la estructura en 82 franjas y en cada una se obtiene la relación cobertura al paso con la siguiente expresión:

$$(C/P)_i = \sum_{k=1}^{N_t} P\left[\left(x_i - \frac{w}{2}\right) \leq x_k \leq \left(x_i + \frac{w}{2}\right)\right] \dots(2.6)$$

Donde:

N_t : es el número de ruedas por engranaje

X_i : distancia lateral desde una línea de referencia (línea central de la calle de rodaje o la pista de aterrizaje) al punto medio de la franja i

X_k : distancia lateral desde la misma línea de referencia hasta la línea central de la rueda k .

Para pavimentos flexibles, el procedimiento es similar, la superficie se divide en 82 franjas y en cada una se calcula la relación C/P utilizando la misma ecuación que para rígidos, pero cambiando la anchura w por una anchura equivalente w_{eq} que se obtiene como la suma del espesor de la rueda, la distancia entre ruedas y el espesor del pavimento, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$(C/P)_i = \sum_{k=1}^{N_t} P\left[\left(x_i - \frac{w_{eq}}{2}\right) \leq x_k \leq \left(x_i + \frac{w_{eq}}{2}\right)\right] \dots(2.7)$$

La distribución normal con la que se calcula la relación paso-cobertura tienen una desviación estándar de 30.5 pulgadas (77.47 cm).

2.2.1.2 FACTOR DE DAÑOS ACUMULATIVOS

Tal como se mencionó anteriormente, la metodología de diseño de pavimentos para aeropistas se basa en el cálculo del factor de daño acumulativo (CDF). Dicho factor se define como la cantidad de vida de fatiga estructural de un pavimento que ha sido utilizado por cierto intervalo de tiempo. Dicho factor se puede expresar como la relación entre el número de repeticiones de cargas aplicadas y el número de repeticiones de carga admisibles hasta llegar al fallo (ley de Miner), las siguientes expresiones matemáticas nos ayudan a obtener el CDF.

$$CDF = \frac{\text{número de repeticiones de carga aplicada}}{\text{numero de repeticiones admisibles hasta el fallo}} \dots(2.8)$$

$$CDF = \frac{(\text{saidas anuales})x(\text{vida en años})}{\left(\frac{\text{pases}}{\text{relación de cobertura}}\right)x(\text{coberturas hasta el fallo})} \dots(2.9)$$

$$CDF = \frac{\text{coberturas aplicadas}}{\text{coberturas hasta el fallo}} \dots(2.10)$$



Cuando $CDF = 1$, el pavimento se habrá agotado toda su vida a la fatiga.

Cuando $CDF < 1$, el pavimento tendrá algo de vida restante, y el valor de CDF dará la fracción de la vida utilizado.

Cuando $CDF > 1$, la totalidad de la vida de fatiga se han utilizado y el pavimento habrá fallado.

Para obtener el valor CDF es importante obtener el número de coberturas al fallo, cuando se trata de un pavimento flexible y el cálculo se realiza en la subrasante, se utiliza la siguiente expresión:

$$C = \left(\frac{0.004}{\varepsilon_v} \right)^{8.1} \quad (C \leq 12,100) \quad \dots(2.11)$$
$$C = \left(\frac{0.002428}{\varepsilon_v} \right)^{14.21} \quad (C > 12,100)$$

Donde:

C = Número de Coberturas a la Falla

ε_v = Esfuerzo vertical en la superficie de la subrasante

Cuando se desea obtener el valor de CDF en la carpeta asfáltica (HMA) se utiliza el modelo de Heukelom y Klomp, este modelo de fallo obtiene el esfuerzo horizontal en el fondo de la superficie asfáltica, de este modo, el número de coberturas a la falla se obtiene con la siguiente expresión:

$$\log C = 2.68 - 5.0 \log(\varepsilon_{HMA}) + 2.665 \log(E_{HMA}) \quad \dots(2.12)$$

Donde:

C = Número de Coberturas a la Falla

E_{HMA} = Es el módulo de la HMA, el cual es asignado por la FAA y equivale a 1379 MPa (200.000 psi).

ε_{HMA} = Esfuerzo horizontal en el fondo de la superficie asfáltica

El fallo significa un daño estructural particular de acuerdo con los supuestos y definiciones en que se basan los procedimientos de diseño, por lo que un valor CDF mayor a 1 no significa que el pavimento ya no pueda soportar el tráfico de aeronaves, sino que tendrá



fallos en los límites de incertidumbre en cuanto a las hipótesis de propiedades de materiales y otros aspectos similares.

Todos los aviones de la combinación de tráfico se toman en cuenta utilizando la ley de Miner, es decir, se obtendrá el CDF de cada una de las aeronaves de tal forma que la suma de todos estos valores particulares de CDF da como resultado el CDF total que se toma en cuenta para el diseño.

$$\text{CDF} = \text{CDF}_1 + \text{CDF}_2 + \text{CDF}_3 + \dots + \text{CDF}_N \dots (2.13)$$

En el diseño de una estructura de pavimento flexible el espesor se ajusta hasta que el CDF de la subrasante es igual a 1 y, por tanto, alcanza la falla. Sin embargo, se puede hacer un cálculo adicional para encontrar el CDF de la carpeta asfáltica, el cual, en caso de ser menor a 1, indica que no habrá agrietamiento de esta capa a lo largo de la vida útil de diseño y que, el diseño de las capas base y sub-base es adecuado, en caso de que dicho CDF sea mayor a 1, se deben ajustar los espesores de las capas base y sub-base para que la carpeta asfáltica no falle por formación de grietas.

Al ejecutar el programa FAArfield, se calcula el CDF por franja de pavimento de 10 pulgadas (25.4 cm) de un total de 82 franjas, es decir, el CDF se calcula en 2,082.8 cm de la superficie de pavimento. El CDF para el diseño se toma como el máximo de las 82 franjas que se mencionó con anterioridad.

2.2.1.3 ÍNDICE DE LA CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA

Cuando se desea realizar el diseño de una estructura nueva de pavimento rígido en FAArfield, el CDF se calcula mediante la tensión horizontal de bordo en la parte inferior de la losa de concreto, esto se lleva a cabo de manera compatible con los procedimientos antiguos de la FAA, es decir, utilizando el 75% de la tensión de borde libre de Westergaard en el diseño, la cual se calcula reduciendo en un 25% la carga del tren de aterrizaje del avión.

El procedimiento que se lleva a cabo consiste en calcular el 75% de la tensión de borde libre con el tren orientado paralelamente al borde de la losa, después dicha tensión se calcula con el tren orientado perpendicularmente al borde, se comparan ambos valores y se elige el mayor que será la tensión crítica. Ocurre que, para la mayor parte de las



configuraciones de trenes de aterrizaje, se puede predecir qué orientación es la que provoca la tensión crítica, en consecuencia, FAArfield no requiere hacer más de un cálculo para cada configuración de tren de aterrizaje.

El diseño de pavimento rígido se calcula utilizando el modelo de elementos finitos tridimensional, por lo que el modelo de fallo difiere al utilizado en pavimentos flexibles, siendo la siguiente expresión la que lo define:

$$\frac{DF}{F_{CAL}} = \left[\frac{F's \ b d}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d-b) + F's \ b} \right] x \log C + \left[\frac{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(ad-bc) + F's \ bc}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d-b) + F's \ b} \right] \dots (2.14)$$

Donde:

SCI: Índice de la condición de la estructura

DF: Factor de diseño que se define como R/σ , donde R es la resistencia a la flexión del concreto y σ es la resistencia a la tensión del concreto

FCAL: Factor de calibración de tensión, FCAL = 1.13

F's: Factor de compensación de base estabilizada

Parámetros empíricos: a = 0.5878, b = 0,2523, c = 0.7409, d = 0.2465.

La falla de un pavimento rígido en FAArfield se define cuando el SCI es igual a 80, es decir, el software de diseño realizará iteraciones modificando el espesor de la losa de concreto hasta que, el Índice de condición de la estructura alcance un valor de 80 al final de la vida útil de la estructura. Por tal motivo, el número de cobertura al fallo (C), mencionado con anterioridad, es el número de cobertura que se requiere para que SCI obtenga dicho valor para cualquier relación de R/σ .

El modelo de fallo asume que el SCI se deteriora bajo el tráfico, como una función lineal del logaritmo de coberturas (después de alcanzar la primera grieta estructural). El factor F's se utiliza para ajustar la pendiente de dicha recta cuando la estructura incluye una capa de calidad importante tal como una base estabilizada. Cuando la losa de concreto hidráulico se coloca sobre una capa de agregado grueso triturado menor o igual a 8 pulgadas (20.32 cm) o cuando se coloca sobre una capa estabilizada de 4 pulgadas (10.16 cm) con un módulo de 500,000 psi (3447 MPa), el valor de F's = 1. Sin embargo, cuando la calidad de la base o sub-base es aún mayor que las dos condiciones anteriores, el valor de F's disminuye y el número de coberturas al fallo aumenta.



2.2.1.4 CAPAS PRECARGADAS EN FAARFIELD

El software de diseño contiene un conjunto de capas para modelar la estructura de pavimento, todas ellas servirán para simular la carpeta asfáltica, la losa de concreto hidráulico, la base o la sub-base, dependiendo de sus características se elige entre una u otra. El valor del módulo de cada capa se muestra en la Tabla 2.4, en ella se observan los valores que son preestablecidos por el programa y que no pueden ser modificados, así mismo, el rango de valores admisibles en algunas capas. Adicionalmente, en dicha tabla se presenta la resistencia a la flexión de las diferentes losas de concreto que pueden utilizarse en el diseño de pavimentos rígidos.

Tabla 2.4 Módulo de las capas en FAARfield

Nombre de la Capa	Módulo	Resistencia a la Flexión
P-401/P-403 HMA Surface	1,378.95	-
P-401/P-403 HMA Overlay	1,378.95	-
P-401/P-403 Stabilized Base Flexible	2,757.90	-
Variable Stabilized Base Flexible	1,034.21 a 2,757.90	-
PCC Surface	27,579.03	3.45 a 5.52
PCC Overlay Unbond	27,579.03	3.45 a 5.52
PCC Overlay on Flexible	27,579.03	3.45 a 5.52
Variable Stabilized Base Rigid	1,723.69 a 4,826.33	-
P-301 Soil Cement Base	1,723.69	-
P-304 Cement Treated Base	3,447.38	-
P-306 Econcrete Subbase	4,826.33	-
Rubblized PCC Base	689.48 a 2,757.90	-
P-208	Ver Nota	-
P-209 Crushed	Ver Nota	-
P-154 Uncrused	Ver Nota	-
Undefined layer	6.89 a 27,579.03	-
Subgrade	6.89 a 344.74	-

Fuente: Propia

Nota: El valor del Módulo de la capa de agregados se calcula automáticamente, esto es, no puede ser ajustada por el usuario del programa.



Cabe mencionar que cuando una capa de agregado no triturado y otra de agregado triturado presentan espesores mayores a 8 pulgadas (20.32 cm) y 10 pulgadas (25.40 cm), respectivamente, el programa de manera automática las subdivide en capas más delgadas.

2.2.2 CONSIDERACIONES DEL AVIÓN

2.2.2.1 PESO DE AERONAVES

Uno de los aspectos importantes a la hora de diseñar la estructura de un pavimento es la combinación de tráfico aéreo, pues el peso de las aeronaves constituye la carga que esta deberá soportar a lo largo de su vida útil además, la geometría que posee el tren de aterrizaje sirve para determinar la distribución de la carga del avión sobre la superficie de la estructura.

La masa a considerar de las aeronaves depende del método de cálculo que se utilice, es decir, el general o el optimizado, para el primero, se considera únicamente la masa de despegue, mientras que para el segundo se considera además la masa de aterrizaje, sin embargo, establecer dichos valores no es una tarea sencilla debido a las variaciones en la carga útil.

La medición del peso de una aeronave es algo complejo, para determinar dicho valor es necesario llevar a cabo diversas mediciones en función del combustible que traerá el avión, la carga útil, el valor de carga máxima permitida, los valores de carga al despegar, al aterrizar, durante el reposo, etc., cada una de estas mediciones son importantes para realizar una planificación y diseño tales que permitan el buen funcionamiento de la estructura a lo largo de su vida útil. Los pesos de las aeronaves varían entre sí a pesar de tratarse de un mismo diseño, sin embargo, para fines prácticos, los fabricantes establecen ciertos pesos típicos, los cuales se explican a continuación:

- ✚ **Peso Operacional Vacío (OEW):** Se trata del peso básico de la aeronave que considera todo lo necesario para realizar un vuelo, pero sin incluir la carga útil ni el combustible, es decir, considera el peso básico del avión, la tripulación y el equipo necesario para el vuelo. Este peso se considera para los hangares de mantenimiento, instalaciones de almacenamiento de aeronaves o similares.



- ✚ **Peso Cero Combustible (ZFW):** Se trata del peso operacional Vacío (OEW) más el peso de la carga útil, la cual se refiere al peso de los pasajeros, sus equipajes, correo, mercancía, etc.
- ✚ **Máxima Carga Estructural de Pago:** Es la cantidad máxima de carga útil que una aeronave está autorizada a transportar ya sea de pasajeros, de carga o una combinación de ambos.
- ✚ **Peso Máximo de Rampa:** Es el peso máximo autorizado para realizar las maniobras en tierra, el cual incluye el peso producido por el combustible, pues al llevarlas a cabo, se pierde parte de éste y, por tanto, peso.
- ✚ **Peso Máximo Estructural de Despegue (MASTOW):** Es el peso máximo que la aeronave soporta para operar a nivel del mar con una temperatura de 15 °C, también es lo máximo que soporta el tren de aterrizaje, este peso es el que se considera para el diseño y la planificación de los pavimentos de aeropistas. Considera ZFW más el peso de combustible de vuelo y reserva.
- ✚ **Peso Máximo Estructural de Aterrizaje (MLW):** Es el peso máximo con el que aterriza una aeronave, este suele ser bastante menor que el MASTOW, especialmente en viajes largos, pues el combustible que se quema durante el trayecto se traduce en una porción de peso importante.

2.2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS GRUPOS DE AVIONES SEGÚN LA FAA

El programa FAARfield tiene precargados 6 grupos de aviones, los cuales se describen a continuación:

- ✚ Grupo de aviones Genéricos: Son nombrados dependiendo del tipo de tren de aterrizaje y de su peso en libras.
- ✚ Grupo Airbus: Su nomenclatura comienza con la letra "A".
- ✚ Grupo Boeing: Su nomenclatura comienza con la letra "B".
- ✚ Grupo de otras aeronaves comerciales: Su nomenclatura no sigue una estructura general pues engloba un gran número de aeronaves.
- ✚ Grupo de aviación general: Su nomenclatura, al igual que en el grupo pasado, no sigue una estructura general pues también engloba un gran número de aeronaves.
- ✚ Grupo militar: Son aquellos cuya nomenclatura comienza con "C", "F", "P", "F/A" o "KC".



2.2.2.3 TIPO Y GEOMETRÍA DEL TREN DE ATERRIZAJE

A cada uno de los conjuntos de ruedas que posee una aeronave se denomina apoyo de tren de aterrizaje. A su vez, el total de apoyos de la aeronave constituyen el tren de aterrizaje propiamente dicho. Existen ciertos apoyos típicos del tren de aterrizaje, los cuales son representativos de cada una de las categorías más utilizadas para designar los trenes de aterrizaje, estas son:

-  Rueda simple
-  Ruedas gemelas
-  Tandem de cuatro ruedas

Las características principales de estas categorías se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Trenes de aterrizaje típicos

Pata típica del tren de aterrizaje	Vía del tren [cm]	Distancia entre ejes [cm]	Presión de los neumáticos
Rueda Simple	-	-	0.6 MPa
Ruedas Gemelas	70	-	0.9 MPa
Tandem de cuatro ruedas	75	140	1.2 MPa

Fuente: OACI, Documento 9157 Parte 3, p 3-80

En cuanto al tren de aterrizaje nos interesa la distribución de la masa sobre los apoyos que lo constituyen, para poder tener en cuenta las diferentes condiciones de esfuerzo que ayuden a considerar las diferencias entre las instalaciones del aeródromo, esto es, a pesar de que la pista de rodaje, la aeropista, calle de salida, plataforma, etc., están sometidas a las mismas cargas, los esfuerzos no suelen ser los mismos, por ejemplo, cuando la aeronave va a una velocidad considerable sobre la aeropista donde el efecto de la carga es transitorio, el esfuerzo al que se enfrenta la estructura es menos crítico que cuando el paso de la aeronave es lento, lo mismo ocurre cuando la aeronave aterriza y posee menos carga que cuando despegar, sin contar que el aire ejerce sobre el avión cierto empuje hacia arriba que provoca que el daño hacia el pavimento sea poco importante.

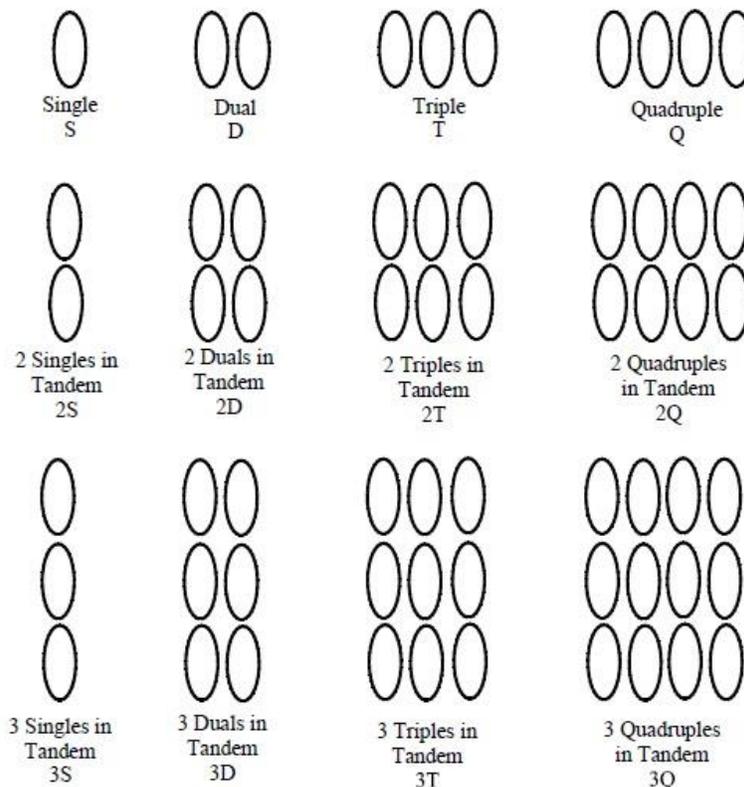
Se consideran distintos tipos de distribución de cargas sobre los trenes de aterrizaje:



- ✚ Distribución estática: la forma en la que las cargas se distribuyen sobre el apoyo de la nariz (tren delantero) y los apoyos del tren de aterrizaje principal dependen del centro de gravedad de la aeronave. En ocasiones no se poseen todos los datos necesarios, por lo cual se puede suponer para trenes de aterrizaje comunes, dependiendo si la distribución de cargas es hacia adelante o hacia atrás, que el 5% de la carga se distribuye sobre la pata de nariz y que el 95% restante se distribuye sobre el tren principal, respectivamente.
- ✚ Eficiencia del frenado: Este aspecto no es considerado para el cálculo de los espesores de la estructura, sin embargo es importante considerarlo para estudios concretos como el de las estructuras que se colocan bajo la aeropista.

El apoyo principal del tren de aterrizaje es el que, por lo general, transmite tensiones mayores en la estructura de pavimento, sin embargo, existen aeronaves en las que el tren principal no es el crítico para el diseño y esto se debe tomar en cuenta para el diseño. En la Figura 2.8 se muestran las configuraciones principales de engranajes simples y sus nomenclaturas.

Figura 2.8 Engranajes simples con nomenclatura



Fuente: Federal Aviation Administration, Doc. AC 150/5320-6E, 2009 p.100



2.2.2.4 COMBINACIÓN DE TRÁFICO

Este término se refiere al conjunto de aeronaves que se utilizarán para realizar el diseño de la estructura, en el programa que se utilizará en la presente tesis para realizar los diseños de pavimentos no se admite realizar cálculos cuando se tiene un solo avión, se requiere indicar el conjunto de aviones que se prevé utilizarán la estructura a lo largo de su vida útil, el programa se encargará, a partir de la lista que tiene precargada, de indicar el tipo de tren de aterrizaje que posee la aeronave, así como el peso de éste.

El peso de las aeronaves que FAAfield contiene son los que los fabricantes recomiendan para diseño, es decir, el MASTOW, como ya se mencionó, el programa realiza los cálculos con el 95% de dicho peso, lo que nos da cierto factor de seguridad, pues se considera que el programa obtiene resultados conservadores.

Es importante que la combinación de tráfico que se tomará en cuenta sea la más aproximada a la realidad, por ello se recomienda consultar los planes maestros de los aeropuertos y demás estudios que indiquen el tipo de crecimiento que se experimentará con el paso de los años pues en caso de considerar un crecimiento menor que el real, la estructura puede presentar problemas en el futuro que se traducirán en pérdidas económicas.

2.2.3 DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.2.3.1 VALOR DE SOPORTE CALIFORNIA

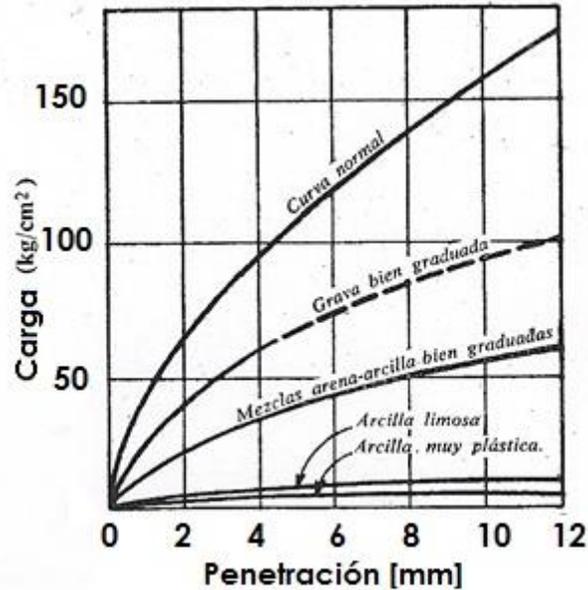
El valor de soporte California CBR es un parámetro de resistencia al esfuerzo cortante aplicado a una muestra de suelo. Para obtenerlo, se aplica carga a la muestra de suelo hasta lograr una penetración en ella de 2.54 y 5.08 mm. Una vez que se conoce el valor de las cargas que producen dichas penetraciones se comparan con los valores estándar de 1360 y 2040 kg. El menor de los dos valores obtenidos será el CBR del suelo siempre que se cumpla lo establecido en la normativa para la curva carga-penetración que se muestra en la Figura 2.9. En caso de que haya una variación en la curva, el valor CBR requerirá un ajuste.

Este parámetro se utiliza en el diseño de los pavimentos flexibles para carreteras y aeropuertos en varias partes del mundo. El ensayo fija una granulometría normalizada de



pedra machacada y compactada bajo condiciones específicas como modelo de referencia para medir el valor portante de cualquier otro suelo.

Figura 2.9 Curva normalizada para obtención de CBR



Fuente: Robert G. Hennes, Martin I. Ekse. Ed. Reverte 1963 Fundamentos de Ingeniería del Transporte, p. 84

La FAA establece un nivel de categoría de resistencia del suelo en el que se fundará el pavimento, en función del su CBR, tal como se indica a continuación:

Tabla 2.6 Categoría de resistencia del terreno de fundación de acuerdo al valor CBR

Categoría de resistencia del terreno de fundación	Valor de CBR
A	Alta Resistencia: El valor tipo es CBR = 15 y comprende todos los valores superiores a 13
B	Resistencia Media: El valor tipo es CBR = 10 y comprende todos los valores CBR entre 8 y 13.
C	Resistencia Baja: El valor tipo es CBR = 6 y comprende todos los valores CBR entre 4 y 8
D	Resistencia Ultra baja: El valor tipo es CBR = 3 y comprende todos los valores CBR inferiores a 4

Fuente: Propia



2.2.3.2 TERRENO DE FUNDACIÓN

El terreno de fundación o capa subrasante es aquella que sufre con menor magnitud los esfuerzos que provocan las aeronaves, esto se debe a que las capas superiores del pavimento se encargan de amortizarlas, pues esta capa es la que menor capacidad posee de toda la estructura.

Es importante que al calcular los esfuerzos existentes en la parte superior de dicha capa, se debe procurar que el suelo posea condiciones similares a las que presentarán una vez que se haya construido sobre él la estructura, de lo contrario se podrían ocasionar problemas futuros.

Es importante que se mantengan las partículas de dicha capa en su lugar, pues en caso de que algunas partículas comiencen a mezclarse con las capas de base y sub-base, se puede generar pérdida de capacidad en la estructura, esto se puede evitar con el uso de geosintéticos de separación entre capas.

Es importante en esta capa identificar las arcillas expansivas, este tipo de suelos puede ocasionar problemas en el pavimento, pues el contenido de agua en este tipo de suelos puede provocar expansiones importantes que generen daños en las capas superiores (sub-base, base y carpeta asfáltica).

El procedimiento de diseño de pavimentos flexibles y rígidos para aeropuertos mediante el programa FAARfield toma en cuenta las características de la subrasante a través del módulo de resiliencia, el cual a su vez puede ser estimado a través de correlaciones formuladas en función del CBR, tal como se indica a continuación:

✚ Pavimentos flexibles:

$$E = 1500 \times CBR \text{ [psi] } \dots(2.15)$$

✚ Pavimentos rígidos:

$$MR = 26 \times k^{1.284} \text{ [psi] } \dots(2.16)$$

$$k = \left[\frac{1500 \times CBR}{26} \right]^{0.7788} \text{ [pci] } \dots(2.17)$$



2.2.3.3 CAPA SUB-BASE

La capa sub-base es parte integral de una estructura de pavimento flexible, excepto en aquellos casos en los que la capa subrasante tiene un valor de CBR igual o mayor a 20, en ese caso, se puede prescindir de dicha capa. Su función es similar a la capa base, sin embargo, debido a que se encuentra más alejada de la aplicación de las cargas, los esfuerzos que resiste son menores y puede utilizar materiales de menor calidad.

De las capas precargadas en FAARfield, las que cumplen con las condiciones de calidad de componentes, gradaciones, manipulación, etc. que requiere una capa sub-base perteneciente a una estructura de pavimento que recibirá aviones de peso mayor a 30,000 libras (13,608 kg), son las siguientes:

- ✚ P-154 – Subbase Course (sub-base)
- ✚ P-210 – Caliche Base Course (Base caliche)
- ✚ P-212 – Shell Base Course (Base tipo cascarón)
- ✚ P-213 – Sand Clay Base Course (Base de arena arcillosa)
- ✚ P-301 – Soil Cement Base Course (Base de suelo cemento)

Es importante indicar que las capas P-213 y P-301 no son recomendables cuando la zona en que se realiza el pavimento hay nevadas y se ha previsto penetración de heladas, pues se pueden ocasionar problemas importantes en la estructura. Cuando la economía y la practicidad en la construcción lo permiten, los materiales que se utilizan en la capa base pueden utilizarse también en la capa sub-base.

La capa sub-base suele ser una capa de conexión entre la capa base y la subrasante, esta puede estar formada de agregados o de materiales estabilizados, se debe respetar el espesor mínimo que corresponde a 4 pulgadas o 10.2 cm, aunque en ocasiones se puede agregar un espesor adicional para facilitar la construcción.

En caso de ser necesario se podrá construir en la estructura del pavimento más de una capa tipo capa sub-base, sin embargo, se debe evitar una estructura sándwich, esto es, la colocación de una capa granular permeable entre dos capas estabilizadas e impermeables, pues el agua que queda atrapada en la capa granular ocasiona pérdida de capacidad en la estructura.



En caso de que la estructura requiera una capa base estabilizada, será necesario que la capa sub-base tenga materiales de mayor calidad que los que poseen las capas mencionadas con anterioridad, por ello se recomienda el uso de las capas precargadas en la base de datos del programa FAARfield que se describen a continuación:

- ✚ P-208 – Aggregate Base Course (Base de agregados)
- ✚ P-209 – Crushed Aggregate Base Course (Base de agregados triturados)
- ✚ Adicionalmente, se puede utilizar cualquier material que sea adecuado para su uso como capa base.

2.2.3.4 CAPA BASE

Existen tres tipos de capas base: la base hidráulica o granular, base estabilizada o tratada con asfalto y base estabilizada con cemento. El programa FAARfield ofrece distintos tipos de capas para cada una de ellas.

Las capas estabilizadas flexibles son llamadas P-401/P-403 en el programa. Se denominan flexibles debido a que ambas poseen una relación de Poisson mayor a 0.35, lo cual les da un comportamiento elástico y evita que sean propensos al agrietamiento.

Además de las capas mencionadas con anterioridad, el software de diseño posee una opción de capa variable, la cual se puede utilizar en caso de querer incluir en el modelado una capa con características diferentes a los materiales preestablecido como P-401/P-403 ya que el que éstas poseen no es modificable.

En el caso de una capa base estabilizada rígida FAARfield tiene como opciones las capas P-304 y P-306, ambas poseen una relación de Poisson de 0.20, estas dos capas se utilizan únicamente para estructuras de pavimento flexible; la capa P-301 también es una capa base estabilizada rígida, sin embargo esta únicamente debe ser utilizada en estructuras de pavimento rígido; se puede utilizar la capa variable en caso de requerir una capa con módulo de rigidez que difiera del que tienen las capas antes mencionadas.

La diferencia que existen entre la capa variable rígida y la flexible es el rango de valores del módulo de rigidez que cada una puede utilizar pues la rígida puede tener un módulo que va



desde 1,720 hasta 4,830 MPa, mientras que el rango para la capa flexible va desde 1,035 hasta 2,760 MPa.

Las bases no estabilizadas pueden ser modeladas con las capas P-209 (triturada) y P-208 (no triturada), sin embargo esta última debe ser utilizada bajo ciertas restricciones, por ejemplo, se limita a recibir cargas brutas de 60 000 libras (27,216kg) o menos, además de que la capa asfáltica que se utilice no debe ser menor a 5 pulgadas o 12.7 cm. El módulo de rigidez de estas capas no está preestablecido, el programa lo calcula en cada diseño y no se puede modificar de manera manual.

Dicho módulo se calcula con el procedimiento de “Módulo” desarrollado por la Estación Experimental del Cuerpo de Ingenieros del Ejército Naval de Estados Unidos, es por este procedimiento que sólo se pueden utilizar dos capas de agregados en la estructura, una capa es triturada y la otra es no triturada, la primera siempre debe ir sobre la segunda.

El cálculo que FAARfield realiza para la capa sub-base da como resultado un espesor que provoque que el CBR de la subrasante alcance un valor de 20, después, se calcula el espesor de la capa base como el requerido para proteger una capa subrasante con CBR de 20.

Cuando se utiliza una capa de base de agregado base, el diseño sigue 2 pasos:

- ✚ El programa calcula el espesor de base requerido para proteger una subrasante con un valor asumido de CBR 20.
- ✚ Compara el espesor de la base obtenido en el paso anterior con el espesor mínimo requerido mostrado en la tabla 2.7 (para determinar el valor es importante saber el tipo de tren de aterrizaje que poseen los aviones de la combinación de tráfico y sus respectivos pesos). FAARfield selecciona el espesor mayor de los dos mencionados anteriormente.

Para combinaciones de tráfico que posean aeronaves de peso mayor a 100,000 libras o 45,400 kg, es necesario colocar una base estabilizada, la cual tiene un espesor mínimo de 5 pulgadas o 12.7 cm. En este caso, se adiciona un paso a los dos mencionados con anterioridad, el espesor que se obtuvo en el primer paso se divide entre 1.6 (factor de equivalencia que representa la relación entre una capa base de agregado estándar P-208



y la capa base con materiales de mayor calidad) y se compara con el espesor mínimo que es de 12.7 cm para seleccionar el mayor de ellos como el espesor requerido.

Tabla 2.7 Espesor mínimo para la capa base de agregado

Tipo de engranaje	Rango de carga de diseño	Espesor mínimo de capa base (P-209)
	kg	mm
S	13,600-22,700	100
	22,700-34,000	150
D	22,700-45,400	150
	45,400-90,700	200
2D	45,400-113,400	150
	113,400-181,000	200
2D (B757,B767)	90,700-181,000	150
2D or 2D/D1 (DC10, L1011)	181,000-272,000	150
2D/2D2 (B747)	181,000-272,000	150
	272,000-385,600	200
2D/D1 or 2D/2D1 (A340)	257,640-381,200	250
2S (C130)	34,000-56,700	100
	56,700-79,400	150
3D (B777)	243,500-352,440	250
3D (A380)	562,000-592,000	230

Fuente: FAA, AC 150/5320-6E

2.2.3.5 CARPETA ASFÁLTICA

Las capas que el software de diseño tiene precargadas y que se pueden utilizar para esta capa son la P-401/P-403, el valor mínimo de espesor que puede tener esta capa es de 4 pulgadas o 10.2 cm. El módulo de estas capas es de 1,380 MPa, dicho valor fue elegido de manera conservadora, pues corresponde a un pavimento de temperatura de 32 °C y no puede ser modificado por el usuario del programa.

Existen dos tipos de capas de mezclas calientes en FAARfield, una que actúa como capa asfáltica superpuesta (Overly) y otra que funciona como superficie asfáltica (Surface), la primer capa se puede colocar sobre la segunda o sobre superficies de PCC, sin embargo, la superficie asfáltica sólo puede colocarse en la parte superior de la estructura de pavimento o bajo una capa asfáltica sobrepuesta, nunca sobre ella.



2.2.3.6 FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

El concepto básico que limita el nivel aceptable de una estructura de pavimento flexible es la fatiga, por ello es que al modelar este tipo de pavimento mediante la teoría de capa elástica, se asocia la respuesta de fatiga crítica con las cargas de diseño. Esta respuesta se refiere a la deformación máxima que se presenta en la parte inferior de la capa de mezcla asfáltica en caliente.

La fatiga se refiere al proceso mediante el cual ocurre la aparición de un conjunto de grietas como consecuencia de la aplicación repetida de las cargas producidas por las ruedas de las aeronaves. Dichas cargas inducen deformaciones horizontales y verticales en todas las capas del pavimento.

Debido a que los daños provocados por fatiga se generan en la parte inferior de la capa, no es fácil determinar el momento en el que comienza el fallo, nos percatamos del daño cuando la grieta logra llegar a la superficie de la capa, lo cual significa una pérdida de capacidad estructural en el pavimento. Una vez que este daño comienza, puede progresar de manera muy rápida provocando que el pavimento quede pronto fuera de funcionamiento y requiera rehabilitación.

2.2.4 DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO

2.2.4.1 MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (k)

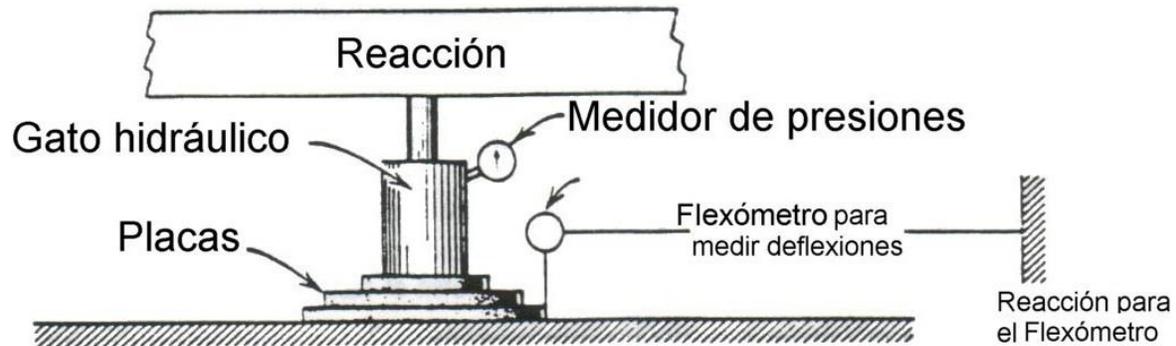
El módulo de reacción de la subrasante (k) de una estructura de pavimento representa la relación existente entre la presión que se aplica mediante una placa circular de sección ya establecida y la penetración o deflexión que resulta de ello, el procedimiento de dicha prueba se establece en la norma AASHTO T-222 y ASTM D-1195 y es llamado prueba o ensayo de placa de carga.

Para el diseño de pavimentos rígidos es indispensable conocer la capacidad portante de la subrasante, es decir, la resistencia que presenta el suelo de cimentación a ser comprimido bajo la acción de cargas, en consecuencia se recurre a la prueba de placa de carga, la cual se lleva a cabo en el lugar donde se construirá la estructura de pavimento cuidando que las condiciones climatológicas, de humedad y acomodo del suelo sean similares a las que existirán cuando se haya construido el pavimento, para simplificar la comprensión de dicho



ensayo, la figura 2.10, que es un croquis en alzado de la prueba, muestra los deflectómetros, la viga de apoyo, las placas normalizadas y el gato hidráulico acomodados para el registro de la prueba.

Figura 2.10 Ensayo de placa de carga



Fuente: <http://libro-pavimentos.blogspot.mx/2011/05/modulo-de-reaccion-de-subrasante-o.html>

Consulta: 11 de Julio de 2014

Para determinar el módulo k se debe aplicar una presión al suelo similar a la que le transmitirá el pavimento ya puesto en operación, esta presión, por lo general, equivale a 0.7 kg/cm^2 o 10 psi . El área de las placas circulares están establecidas en la normativa, siendo la placa de mayor superficie aquella que posee un diámetro de 76.2 cm , sobre ella se van colocando en forma piramidal las demás placas, y con los deflectómetros se van registrando las deformaciones verticales que va presentando el suelo.

Se obtiene un promedio de las deformaciones obtenidas (Δ) y se realiza la siguiente operación para obtener el valor k :

$$k = \frac{p}{\Delta} \dots (2.18)$$

Donde p representa la presión mencionada con anterioridad de 0.7 kg/cm^2 .

Cuando no se puede llevar a cabo el ensayo de placa de carga, el módulo de reacción de la subrasante se puede obtener mediante una expresión matemática que involucra el valor de CBR (ver ecuación 2.17).

El valor de k que se obtiene está dado en libras por pulgadas cúbicas, por ello se debe tener cuidado al utilizar dicho valor, es indispensable definir el tipo de unidades que se utilizarán



en el programa FAARfield, si se utiliza sistema inglés se podrá expresar en pci, si adoptamos el sistema métrico, será necesario hacer la conversión de unidades a N/m^3 .

La tabla 2.8 indica la categoría que se le da al terreno de fundación de acuerdo al rango de valores en el que se encuentra el módulo k, dichas categorías van desde el suelo de alta resistencia hasta el de resistencia ultra baja.

Tabla 2.8 Categoría de resistencia del terreno de fundación de acuerdo al módulo k.

Categoría de resistencia del terreno de fundación	Valor de k
A	Alta Resistencia: El valor tipo es $k = 150 \text{ MN/m}^3$ y comprende todos los valores de k superiores a 120 MN/m^3
B	Resistencia Media: El valor tipo es $k = 80 \text{ MN/m}^3$ y comprende todos los valores k entre 60 y 120 MN/m^3
C	Resistencia Baja: el valor tipo es $k = 40 \text{ MN/m}^3$ y comprende todos los valores k entre 25 y 60 MN/m^3
D	Resistencia Ultra baja: El valor tipo es $k = 20 \text{ MN/m}^3$ y comprende todos los valores k inferiores a 25 MN/m^3

Fuente: Propia

2.2.4.2 CAPA SUBRASANTE

Según la FAA, el terreno de cimentación de la estructura de pavimento rígido debe ser compactado de acuerdo a las indicaciones de la tabla 2.9, además se debe tener presente y corregir los problemas ocasionados por suelos expansivos y contaminación que pudieran ocurrir pues ello provocaría el colapso anticipado del pavimento. No obstante, las especificaciones de compactación de esta capa y de las demás capas granulares deberán estar conciliadas con la normativa local.

Debido al paso de cargas repetidas, puede ocurrir el entre mezclado de material blando de la subrasante y agregados de la base o sub-base, por ello es importante llevar a cabo la estabilización mecánica o química de la subrasante, aunque en caso extremo se puede recurrir al uso de geosintéticos de separación, los cuales no mejorarán la resistencia del pavimento, sólo separarán dos capas para evitar su contaminación.



Tabla 2.9 Compactación de capa subrasante

Tipo de tren de aterrizaje	Peso de la aeronave [lib]	Suelos no cohesivos				Suelos cohesivos			
		Profundidad de compactación en [in]				Profundidad de compactación en [in]			
		100%	95%	90%	85%	100%	95%	90%	85%
S	30,000	8	8-18	18-32	32-44	6	6-9	9-12	12-17
	50,000	10	10-24	24-36	36-48	6	6-9	9-16	16-20
	75,000	12	12-30	30-40	40-52	6	6-12	12-19	19-25
D (incluidos 2S)	50,000	12	12-28	28-38	38-50	6	6-10	10-17	17-22
	100,000	17	17-30	30-42	42-55	6	6-12	12-19	19-25
	150,000	19	19-32	32-46	46-60	7	7-14	14-21	21-28
	200,000	21	21-37	37-53	53-69	9	9-16	16-24	24-32
2D (incluidos B757, B767, A300, DC10-10, L1011)	100,000	14	14-26	26-38	38-49	5	6-10	10-17	17-22
	200,000	17	17-30	30-43	43-56	5	6-12	12-18	18-26
	300,000	20	20-34	34-48	48-63	7	7-14	14-22	22-29
	400,000 a 600,000	23	23-41	41-59	59-76	9	9-18	18-27	27-36
2D/D1, 2D/2D1 (incluidos MD11, A340, DC10-30/40)	500,000 a 800,000	23	23-41	41-59	59-76	9	9-18	18-27	27-36
2D/2D2 (incluidos serie B747)	800,000	23	23-41	41-59	59-76	9	9-18	18-27	27-36
	975,000	24	24-44	44-62	62-78	10	10-20	20-28	28-37
3D (incluidos serie B777)	550,000	20	20-36	36-52	52-67	6	6-14	14-21	21-29
	650,000	22	22-39	39-56	56-70	7	7-16	16-22	22-30
	750,000	24	24-42	42-57	57-71	8	8-17	17-23	23-30
2D/3D2 (incluidos serie A380)	1,250,000	24	24-42	42-61	61-78	9	9-18	18-27	27-36
	1,350,000	25	25-44	44-64	64-81	10	10-20	20-29	29-38

Fuente: FAA, AC 150/5320-6E

2.2.4.3 CAPA SUB-BASE

El propósito de esta capa es proveer a la losa de concreto una superficie estable y uniforme cuyo espesor mínimo en FAARfield corresponde a 4 pulgadas o 10.2 cm, el software recomienda utilizar la capa P-154, sin embargo, si el diseñador considera que la capa requiere mayor calidad de material, se pueden utilizar las siguientes capas:

- 🚧 Item P-208 – Aggregate Base Course (Base de agregados)
- 🚧 Item P-209 – Crushed Aggregate Base Course (Base de agregados triturados)
- 🚧 Item P-211 – Lime Rock Base Course (Base de grava limosa)
- 🚧 Item P-301 – Soil Cement Base (Base de suelo cemento)
- 🚧 Item P-304 – Cement Treated Base Course (Base tratada con cemento)
- 🚧 Item P-306 – Econocrete Subbase Course (Sub-base econocreto)
- 🚧 Item P-401 – Plant Mix Bituminous Pavements (Pavimento de mezcla bituminosa)
- 🚧 Item P-403 – HMA Base Course (Base de mezcla asfáltica en caliente)



Como se mencionó anteriormente, en ocasiones se requiere que los materiales tengan una calidad bastante mayor, es decir, una capa estabilizada, por lo general, dicha capa se recomienda cuando en la combinación de tráfico se encuentran aeronaves de peso igual o superior a 100,000 libras (45,359 kg). En este caso, FAARfield recomienda el uso de las últimas 4 capas mencionadas en el párrafo anterior.

El número de capas sub-base que se puede utilizar en la estructura depende del criterio del diseñador, FAARfield permite el uso de más de una de éstas capas siempre y cuando se evite una estructura sándwich. Otro aspecto importante relacionado con esta capa es que el programa no calcula el espesor adecuado de ésta sino que lo deja al criterio y experiencia del diseñador.

2.2.4.4 LOSA DE CONCRETO

El objetivo de dicha capa es proporcionar a los usuarios de la estructura una textura antideslizante, impedir que haya filtración de las aguas superficiales en el subsuelo y proporcionar soporte estructural a las aeronaves que la utilizarán. Su diseño en FAARfield se lleva a cabo con base en la teoría de Westergaard, por lo que se requieren los siguientes datos:

- ✚ Resistencia a la flexión del concreto o módulo de ruptura
- ✚ Módulo de reacción de la subrasante
- ✚ Información sobre la combinación de tráfico
- ✚ Vida útil de diseño
- ✚ Datos de la capa estructural

La capa que el programa recomienda utilizar es la P-501, Portland Cement Concrete Pavement (Pavimento de concreto de cemento tipo Portland), la cual responde bien a las exigencias del diseño, es decir, la calidad del concreto, los métodos de construcción y manipulación, la calidad de mano de obra, etc. El espesor mínimo de la losa de concreto es de 6 pulgadas o 15.24 cm cuando se soportan cargas mayores a 30,000 libras o 13,608 kg, este valor está íntimamente relacionado con la resistencia que tiene el concreto que se está utilizando, es decir, con la resistencia a la flexión que éste posee, pues es el factor principal de falla.



La normativa que rige la determinación de la resistencia a la flexión de un concreto está establecida por la ASTM C78, en ella se indica el tamaño de la probeta y la distancia a la que se aplicarán las cargas, así mismo, se mencionan las operaciones que se requieren llevar a cabo para obtener dicho valor y los casos en los que los datos obtenidos no son aceptables y se debe repetir la prueba.

La resistencia a la flexión a utilizar en el diseño de pavimentos rígidos recomendada por la Administración Federal de Aviación es de 600 a 700 psi o 4.14 a 4.83 MPa en todos los campos de la aviación. No obstante, se puede utilizar un concreto con resistencia a la flexión mayor, sin embargo, esto podría traducirse en una disminución ligera en el espesor de la losa, por otro lado, las condiciones de agrietamiento, curling y deformación pueden mejorarse.

El módulo de rigidez de la losa de concreto que establece el software de diseño es de 4,000,000 psi o 27,580 MPa, en caso de requerir alguna capa de mayor calidad, se puede modelar la estructura mediante una capa variable o indefinida, sin embargo, la pantalla del programa indicará que se trata de una estructura no estándar lo cual no es sinónimo de estructura incorrecta.

2.2.5 DISEÑO DE PAVIMENTOS PERPETUOS

Para poder modelar pavimentos de larga duración o perpetuos en FAARfield será necesario recurrir a las indicaciones necesarias en pavimentos flexibles, ya que los pavimentos perpetuos utilizan materiales bituminosos para poder diseñarse y construirse.

Los datos de entrada que el programa requiere para modelar la estructura son los siguientes:

- ✚ Valor CBR que posee el terreno de fundación, éste se obtendrá mediante la prueba que se explicó en el capítulo anterior.
- ✚ Módulo de rigidez de cada una de las capas a utilizar en la estructura
- ✚ Espesor de cada una de las capas, excepto de aquella que el programa se encarga de calcular, que dependiendo de la estructura suele ser la capa sub-base o la capa de subrasante modificada.



- ✚ Combinación de tráfico, es decir, tipo de aeronave y salidas anuales promedio de cada una o salidas durante el primer año de vida útil y tasa de crecimiento.

2.2.5.1 DISPOSICIÓN DE CAPAS EN FAARFIELD

Como se menciona en el capítulo anterior, la clave de un pavimento perpetuo consiste en la utilización de capas construidas con materiales asfálticos, se señalan tres capas principales:

- ✚ Capa superficial, la cual recibirá rehabilitaciones periódicas debido a la proximidad que tiene con las cargas, el intemperismo, la variación de temperatura, etc.
- ✚ Capa intermedia, la cual debe poseer el módulo más alto de las tres capas para asegurar la resistencia a la deformación y, por tanto, la durabilidad de la estructura.
- ✚ Capa base, también llamada Asphalt Reach Bottom, la finalidad de esta capa consiste en resistir la tensión máxima que pueda presentarse para que la aparición de grietas de fatiga sea nula o mínima.

Para poder modelar esta estructura en el software de diseño, se han tomado en cuenta las características de las capas precargadas, es decir, el tipo de agregados que contienen, las relaciones de Poisson y módulos de rigidez que poseen y se han elegido las que tienen una calidad importante.

Como se menciona con anterioridad, se pueden englobar las capas base e intermedia para que sólo se realice un solo diseño de mezcla, con tal simplificación, el modelo de pavimentos de larga duración se puede realizar ocupando las siguientes capas:

- ✚ P-401/P-403 HMA Surface se utilizará como la capa superficial, ésta posee un módulo de 1,378.95 MPa y una relación de Poisson de 0.35, lo cual asegura ser un material flexible. Esta capa será la que se deba monitorear y la que reciba mantenimiento para que la estructura de los resultados que deseamos.
- ✚ P401/P-403 St. (flex) tiene un módulo de 2,757.90 MPa, es la capa que posee el valor más grande, por ello se utiliza para modelar las capas base e intermedia, el espesor de ésta deberá ser la suma del espesor de las dos capas que se han englobado. La relación de Poisson de este material es 0.35.



- ✚ P-209 Cr Ag es la capa que se puede utilizar en caso de requerir una base de agregados sobre la capa subrasante modificada o no. En caso de tener zonas del pavimento en las cuales las cargas sean críticas, será necesario colocar esta capa. Se pueden utilizar las capas mencionadas en la sección de sub-base y base para pavimentos flexibles, tomando en cuenta todas las consideraciones que ahí se observan.
- ✚ Capa Undefined se puede utilizar en caso de tener un suelo de cimentación con CBR menor a 6 de acuerdo a la FAA, se debe recordar que en ese caso, la subrasante debe ser mejorada, esta capa fue elegida debido a que su módulo puede ser fijado por el diseñador. Cabe mencionar que de acuerdo a la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para carreteras, un suelo de cimentación de pavimento debe ser mejorado o sustituido cuando presente valores de CBR menores o iguales al 20%.

El procedimiento de diseño es exactamente el mismo que se lleva a cabo en una estructura de pavimento flexible, es decir, FAARfield lleva a cabo los mismos 2 ó 3 pasos de diseño, según sea el caso. Debido a que las capas inferiores no llegan a fallar, en el análisis que el software realiza, el valor de CDF en la subrasante jamás llegará a ser uno, esto es, el terreno de fundación no presentará daños durante toda la vida útil del pavimento.

2.2.6 DISEÑO DE MÁRGENES U HOMBROS

La necesidad de diseñar una estructura de pavimento para los hombros de las pistas de aterrizaje, calles de rodaje y plataformas surge debido a la erosión y los residuos que producen los chorros de los reactores de las aeronaves, los cuales, con el paso del tiempo han ido creciendo y generando mayores daños a los suelos sin protección que se utilizan en los aeródromos. Sin embargo, esta no es la única razón por la que la FAA recomienda que los hombros estén pavimentados, es necesario que los hombros sean estructuras capaces de soportar alguna emergencia u operación no intencional de las aeronaves, así como el paso de los vehículos de emergencia y mantenimiento.

El uso de hombros pavimentados es obligatorio para aeródromos que soportarán aeronaves pertenecientes al Grupo III o mayores, la clasificación de grupos se muestra en la tabla 2.10 que se muestra a continuación.



Tabla 2.10 Grupo de aeronaves

Grupo	Altura [m]	Envergadura [m]
I	< 6 m	< 15 m
II	6 m < 9 m	15 m < 24 m
III	9 m < 13.5 m	24 m < 36 m
IV	13.5 m < 18.5 m	36 m < 52 m
V	18.5 m < 20 m	52 m < 65 m
VI	20 m < 24.5 m	65 m < 80 m

Fuente: FAA, Advisory Circular 150/5300-13A, Airport Design, p. 13

Para el diseño de estas estructuras también se utiliza el software FAARfield, la finalidad del procedimiento que se debe llevar a cabo es encontrar la aeronave más exigente de la combinación de tráfico (MDA) y a partir de ella encontrar el espesor mínimo que requiere para soportar un total de 10 salidas, una por año.

El procedimiento de diseño de hombros se muestra a continuación:

- i. Se crea un archivo de FAARfield en el que se colocan las capas que se deseen utilizar para el diseño de la estructura así como los espesores que se consideren necesarios para cada una de ellas, atendiendo a los requisitos de espesores mínimos.
- ii. Al inicio del análisis, se introduce uno de los aviones de la combinación de tráfico, revisando que los datos de peso sean los adecuados y se indica que el número de salidas anuales es igual a 1.
- iii. Se le asigna a la estructura una vida útil de 10 años con la finalidad de que al final de la vida útil del pavimento se lleven a cabo un total de 10 salidas, las cuales, se mencionan con anterioridad.
- iv. Confirmar el número, tipo y espesor de capas teniendo en cuenta el drenaje del pavimento para evitar la acumulación de agua bajo la estructura pues podría ocasionar daños futuros
- v. Comenzar el diseño de la estructura para obtener el espesor que requiere esa aeronave de forma individual.
- vi. Se repite el procedimiento para cada una de las aeronaves de la combinación de tráfico y se selecciona el pavimento de mayor espesor para la construcción del



hombro o margen. En caso de no querer realizar el procedimiento para cada una de las aeronaves de la combinación de tráfico, lo que se hace es introducir toda la combinación de tráfico con 1200 salidas anuales y en lugar de presionar el botón “Design Structure” se presiona el de “Life” y se observa qué aeronaves poseen los valores de CDF mayores, estas son las que se utilizarán para realizar el procedimiento ya descrito.

A continuación se muestran los valores mínimos de cada una de las posibles capas de la estructura:

- ✚ Capa de asfalto (P-401) debe ser mayor o igual a 3 pulgadas, es decir, 7.6 cm o más. La densidad de compactación debe ser del 93% de la densidad máxima teórica.
- ✚ Losa de concreto (P-501) se recomienda un espesor mínimo de 6 pulgadas o 15.24 cm, además la resistencia a la flexión que debe tener el material debe ser de 600 psi (4.14 MPa) o más.
- ✚ Capa Base (P-208, P-209, P-301 o P-304) de espesor mínimo igual a 6 pulgadas (15.24 cm), aunque el espesor puede reducirse a 4 pulgadas o 10.2 cm si se aumenta 1 pulgada (2.54 cm) de la capa asfáltica. El CBR mínimo del material triturado debe ser 80 o más.
- ✚ Capa Sub-base (P-154) para la cual se recomiendan 4 pulgadas (10.2 cm) o más, además el valor CBR mínimo que debe poseer el material de ésta es de 20.

Es importante, para el diseño de este tipo de estructuras, considerar el paso de los vehículos de emergencia pues estos pueden regir el diseño de la estructura, se debe verificar que la estructura resista de manera adecuada el paso de estos vehículos.



3. DISEÑO DE PAVIMENTO UTILIZANDO FAARFIELD

La Administración Federal de Aviación (FAA), es la responsable de generar normas de ingeniería aeroportuaria para la configuración, el diseño, el equipamiento y los criterios de operación en los aeropuertos civiles de Estados Unidos. También se encarga de la construcción y el mantenimiento de la zona de operaciones de los aeropuertos y las instalaciones terrestres, incluyendo iluminación, ayudas visuales y seguridad del aeródromo.

Para poder llevar a cabo estas acciones la FAA ha publicado un sin número de circulares, en las cuales se pueden consultar las normas y recomendaciones que los ingenieros de diseño pudieran requerir para lograr diseños de calidad. Todas las recomendaciones que esta administración ha publicado, las ha obtenido a base de observación y experimentación, por lo que con el paso de los años va descubriendo mejores métodos de diseño, lo que obliga al ingeniero de diseño a estar en contante actualización.

Hace algunos años, a base de observaciones, experimentación y correlaciones, la FAA obtuvo un conjunto de ábacos de diseño, con las cuales los ingenieros se encargaban de obtener los espesores de cada una de las capas de la estructura de pavimentos rígidos y flexibles, de manera resumida, este diseño se realizaba de la siguiente manera:

- i. Obtención de la aeronave de diseño
- ii. Obtención de salidas anuales equivalentes
- iii. Obtención de espesor total de pavimento
- iv. Obtención del espesor de la carpeta asfáltica y la capa base
- v. Obtención del espesor de capa sub-base
- vi. Obtención de espesores para zona de transición y borde adelgazado.

Hace pocos años la FAA dejó de utilizar este método para comenzar a utilizar el software FAARfield, el cual realiza el diseño de las capas elásticas para pavimentos rígidos y flexibles por medio de iteraciones. El propósito del programa es asesorar a quienes lo utilizan para dotarlos de estándares dimensionales apropiados para el desarrollo de la infraestructura del lado tierra, es decir, de las aeropistas, calles de rodaje, calles de salida rápida, etc.



3.1 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

En esta sección se presentarán ejemplos para diseñar pavimentos flexibles y rígidos, para cada uno de ellos se calculará una estructura convencional para suelos de calidad baja, enseguida se procede a realizar un análisis de sensibilidad en el espesor de una de las capas a partir de la variación del valor de CBR desde un suelo de resistencia ultra baja a uno de alta resistencia, también se llevará a cabo el diseño de pavimentos perpetuos. Para todos los diseños que se llevarán a cabo se utilizarán la misma combinación de tráfico, se utilizarán las mismas aeronaves y las salidas anuales sólo variarán dependiendo de la cantidad de vida útil que se le asigne a la estructura. Los datos requeridos para introducir en FAARfield se muestran en la tabla 3.1 que contienen el número de llegadas y salidas de aviones en el aeropuerto a estudiar.

Tabla 3.1 Movimientos diarios

Movimientos diarios	Años	Número de movimientos / Clave de aviones				
		C	D	E	F	Total
Llegadas	2018	516	5	11	0	532
	2023	648	5	21	4	678
	2028	731	5	26	5	767
	2062	1.246	0	51	10	1.307
Salidas	2018	521	7	12	0	540
	2023	653	7	22	4	686
	2028	736	7	27	5	775
	2062	1.251	0	54	10	1.315

Fuente: Propia

Las salidas y llegadas mostradas en la Tabla 3.1 están organizadas de acuerdo a una clave de avión, la cual hace referencia a determinados tipos de aeronaves, en la tabla 3.2 se observa qué aviones pertenecen a cada clave, es importante señalar que el nombre de estas aeronaves en el programa FAARfield varía un poco, incluso podemos encontrar dos o tres opciones diferentes para cada aeronave, es importante que quien introduzca la combinación de tráfico en el software elija bien de acuerdo a las características que cada avión posea.



Tabla 3.2 Clasificación de aeronaves

Código (Letra)	Aeronaves
C	A-318, A-319, A-320, A-321, B-737, B-727, F-100
D	B- 757, B-767, A-300
E	B-767, B-777, B-747, B-787, A-330, A-380
F	A-340

Fuente: Propia

Como se mencionó anteriormente, es necesario conocer la combinación de tráfico, por ello se requiere que, para cada tipo de aeronave, se definan el número de salidas anuales. A partir de los datos de la Tabla 3.1, que muestra movimientos diarios para cada clave de avión, se obtuvieron las salidas y llegadas anuales del aeropuerto en cuestión, los resultados se encuentran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Movimientos anuales

Movimientos anuales	Años	Número de movimientos / Clave de Aviones				
		C	D	E	F	Total
Llegadas	2018	188.340	1.825	4.015	0	194.180
	2023	236.520	1.825	7.665	1.460	247.470
	2028	266.815	1.825	9.490	1.825	279.955
	2062	454.790	0	18.615	3.650	477.055
Salidas	2018	190.165	2.555	4.380	0	197.100
	2023	238.345	2.555	8.030	1.460	250.390
	2028	268.640	2.555	9.855	1.825	282.875
	2062	456.615	0	19.710	3.650	479.975

Fuente propia

Como se mencionó en el capítulo dos, el peso de las aeronaves al aterrizar en un aeropuerto es mucho menor que el peso de éstas cuando están por despegar, es por ello que en el modelo del programa FAARfield, se toman en cuenta únicamente los datos de salidas anuales. En este ejercicio en particular, a partir de los valores de salidas anuales en el tiempo, se obtuvieron las tasas de crecimiento anual para cada categoría de avión tal como se muestra en las gráficas 3.1 a 3.4. Se consideró para el cálculo de dichas tasas un comportamiento exponencial del tipo:

$$S_b = S_a(1 + i)^n$$



Donde:

S_a - Número de salidas anuales ocurridas en el año "a"

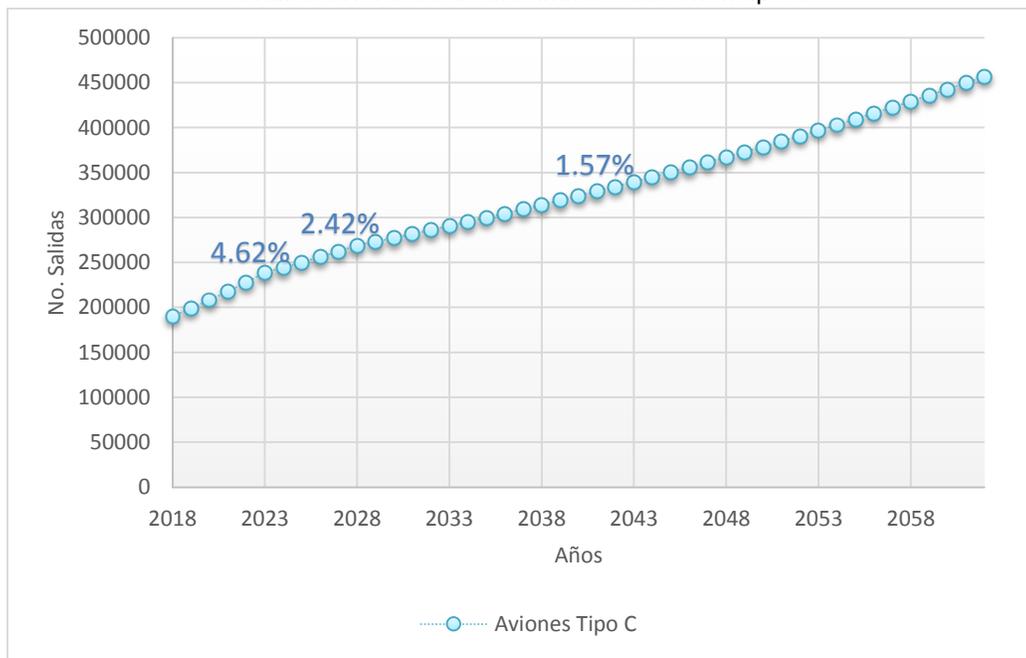
S_b - Número de salidas anuales ocurridas en el año "b"

i - Tasa de crecimiento anual

n - Número de años transcurridos entre los años "a" y "b"

Nota: el año "a" siempre será anterior al año "b"

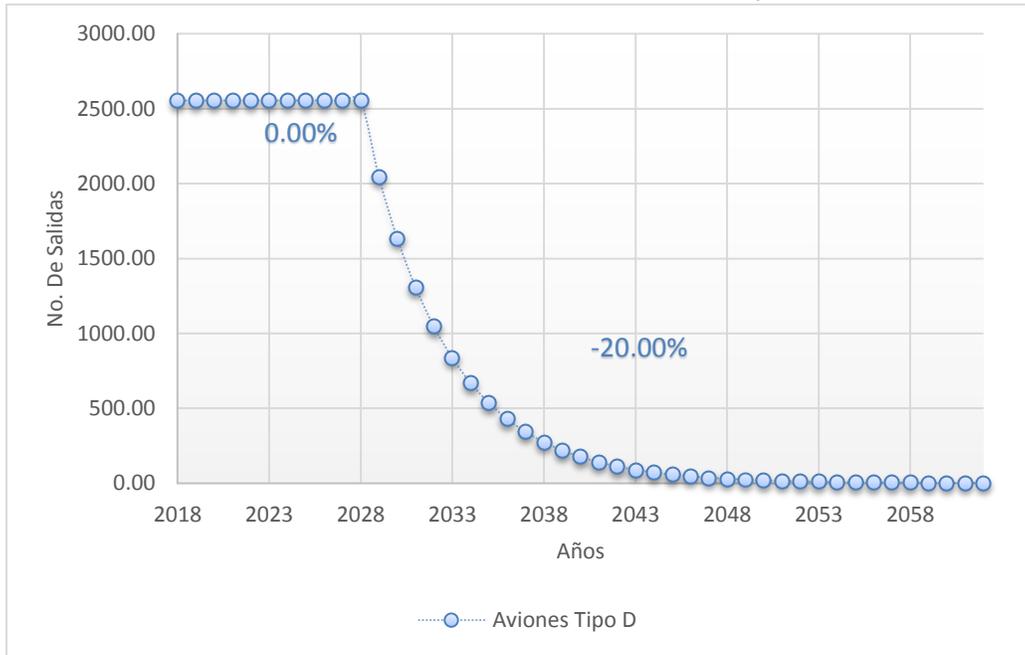
Gráfica 3.1 Tasas de crecimiento del avión tipo C



Fuente Propia

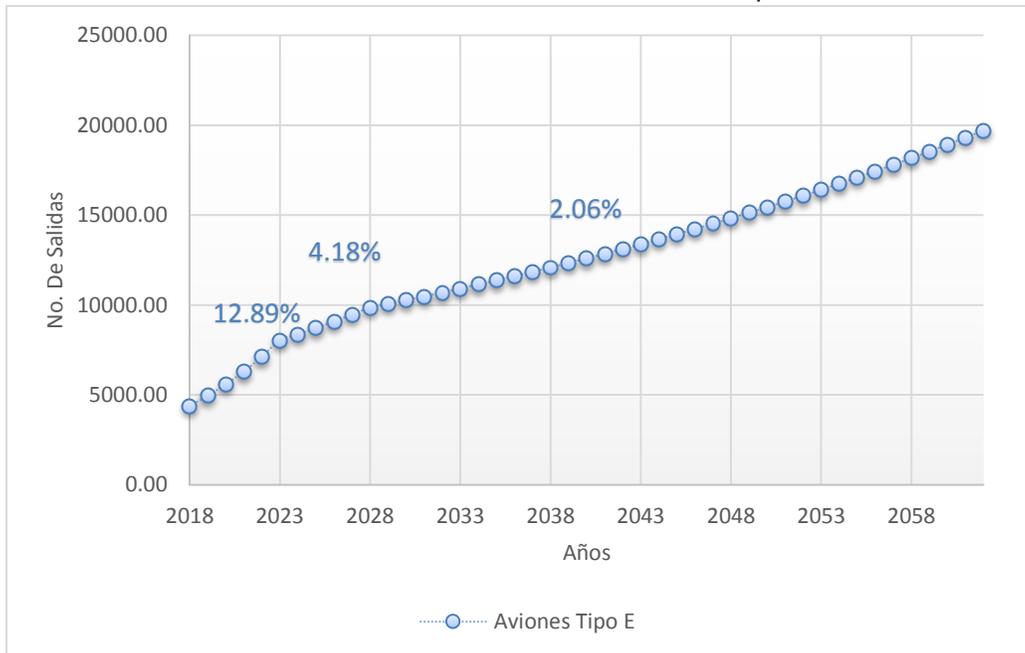


Gráfica 3.2 Tasas de crecimiento del avión tipo D



Fuente Propia

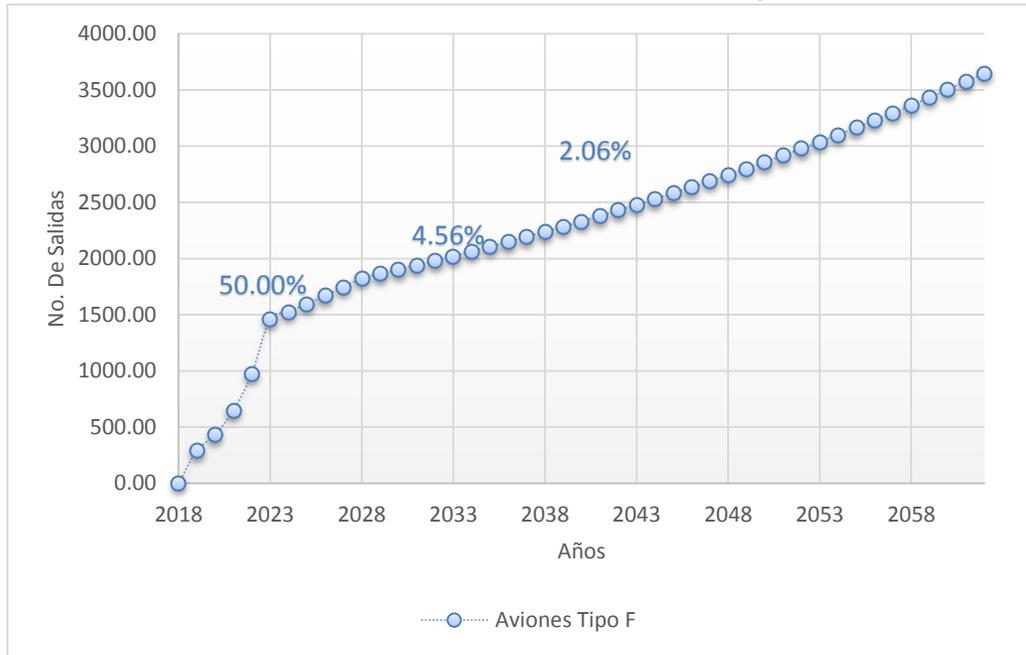
Gráfica 3.3 Tasas de crecimiento del avión tipo E



Fuente Propia



Gráfica 3.4 Tasas de crecimiento del avión tipo F



Fuente Propia

A partir de las tasas de crecimiento obtenidas se puede calcular el número de salidas por clase de avión o por tipo de aeronave que se llevarán a cabo en el aeropuerto de estudio para cualquier año o para cualquier intervalo de tiempo deseado.

FAAfield recomienda utilizar una vida útil para pavimentos de 20 años, se puede señalar una vida útil diferente, sin embargo, el diseño que realiza el programa suele no ser adecuado, por ello, se elige diseñar para 20 años como el programa lo indica.

Existen dos maneras de introducir la combinación de tráfico de aeronaves:

- ✚ Colocar el número de salidas anuales actual y la tasa de crecimiento existente en el periodo de diseño.
- ✚ Colocar un número promedio de salidas anuales, el cual se obtiene tomando en cuenta todas las salidas anuales ocurridas durante la vida útil considerada para el diseño.

En este caso se eligió la segunda opción debido a que en el periodo de análisis se observaron 3 tasas de crecimiento diferentes, condición que no se podía introducir al



programa de cálculo. Limitar el crecimiento observado en las gráficas 3.1 a 3.4 a una sola tasa incurriría en valores alejados a los reales.

Ya que se ha fijado la vida útil y el número de salidas para cada año, se debe obtener el número de salidas anuales promedio para cada clase de avión y, a continuación, para cada tipo de aeronave, esto se realiza obteniendo el número de salidas anuales acumuladas al final de los 20 años de diseño y dividiendo la suma entre los años de vida útil. Los resultados se observan en las tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3.4 Salidas anuales promedio por clase de aeronave

Clase de Avión	Salidas anuales promedio
C	258,919.25
D	1,847.66
E	9,008.76
F	1,518.95

Fuente: Propia

Tabla 3.5 Salidas anuales promedio por aeronave

Aeronave	Salidas anuales
A-318	36,988.46
A-319	36,988.46
A-320	36,988.46
A-321	36,988.46
B-737	36,988.46
B-727	36,988.46
F-100	36,988.46
B-757	615.89
B-767	615.89
A-300	615.89
B-767	1,501.46
B-777	1,501.46
B747	1,501.46
B-787	1,501.46
A-330	1,501.46



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



A-380	1,501.46
A-340	1,501.46

Fuente: Propia

La combinación de cargas que se introdujo en el programa se muestra en la tabla 3.6, como se mencionó anteriormente, existen varias opciones de aeronaves precargadas en FAARfield, por lo que en esta tabla se especifican las aeronaves definitivas elegidas para realizar los diferentes ejercicios; a partir de la combinación de tráfico seleccionada, el programa se encarga de calcular el número total de salidas ocurridas durante toda la vida útil de la estructura tal como se muestra en la última columna de dicha tabla.

Tabla 3.6 Combinación de tráfico

No.	Nombre	Peso de Aeronave [ton]	Salidas Anuales	Total Salidas
1	A318-100 std	56.400	36,988	739,769
2	A319-100 std	64.400	36,988	739,769
3	A320-100	68.400	36,988	739,769
4	A321-100 std	83.400	36,988	739,769
5	B737-100	50.349	36,988	739,769
6	B727-100C Alternate	77.111	36,988	739,769
7	Fokker F100	45.813	36,988	739,769
8	B757-200	116.120	616	12,318
9	B767-200	163.747	616	12,318
10	A300-B2 std	142.900	616	12,318
11	B767-300	163.747	1,501	30,029
12	B777-200 Baseline	248.115	1,501	30,029
13	B747-100 SF	334.751	1,501	30,029
14	B787-8 (Preliminary)	220.446	1,501	30,029
15	A330-200 std	230.900	1,501	30,029
16	A380-800	562.001	1,501	30,029
17	A340-200 opt*	260.895	1,519	30,379
18	A340-200 opt Belly*	260.895	1,519	30,379

Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de mayo de 2014

* La aeronave A340-200 opt y A340-200 opt Belly representan una sola aeronave, sin embargo, se divide en dos debido a la importancia de sus trenes de aterrizaje.

La configuración de trenes de aterrizaje de cada una de las aeronaves pueden observarse en las Figuras 3.1 a 3.18, estas son las configuraciones estándar que la FAA recibe de los fabricantes, también a su costado se muestran las coordenadas de las ruedas de los trenes de aterrizaje, el porcentaje de peso de la aeronave y las presiones que transmiten.



A318-100 std

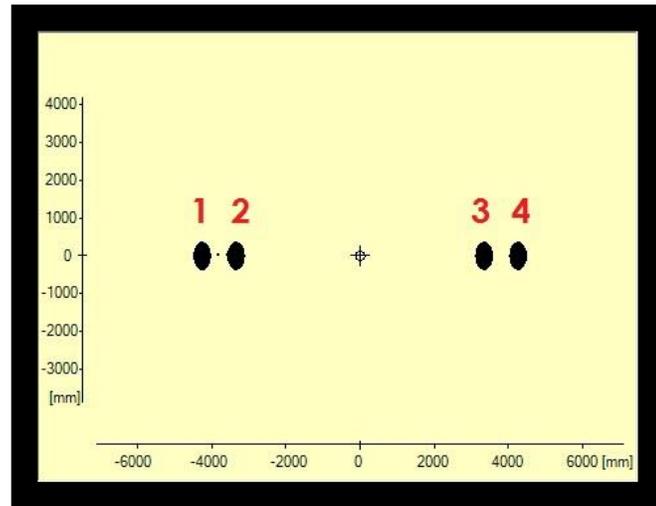
Coordenadas:

1. (-4,258.551, 0)
2. (-3,331.451,0)
3. (3,331.451,0)
4. (4,258.551,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,020 kPa

Figura3.1 Tren de aterrizaje A318-100 std



Fuente: Programa FAArfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

A319-100

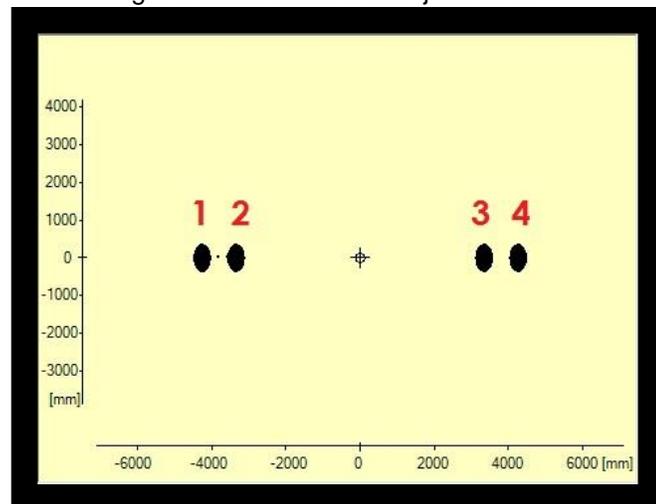
Coordenadas:

1. (-4,258.551, 0)
2. (-3,331.451,0)
3. (3,331.451,0)
4. (4,258.551,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,190 kPa

Figura 3.2 Tren de aterrizaje A319-100



Fuente: Programa FAArfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014



A320-100

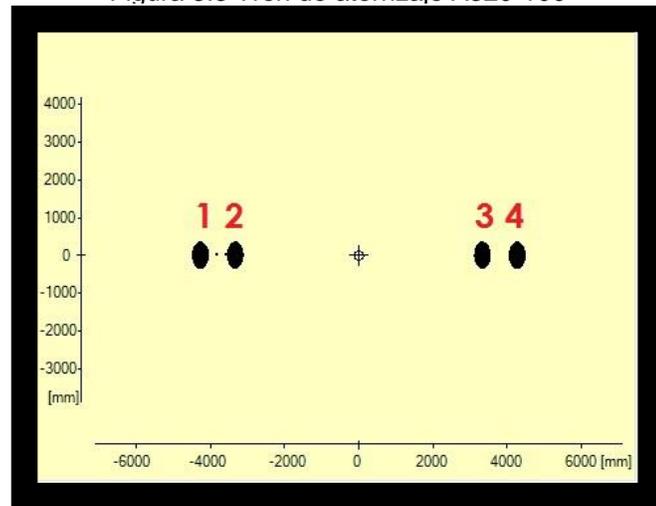
Coordenadas:

1. (-4,258.551, 0)
2. (-3,331.451,0)
3. (3,331.451,0)
4. (4,258.551,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,380 kPa

Figura 3.3 Tren de aterrizaje A320-100



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

A321-100 std

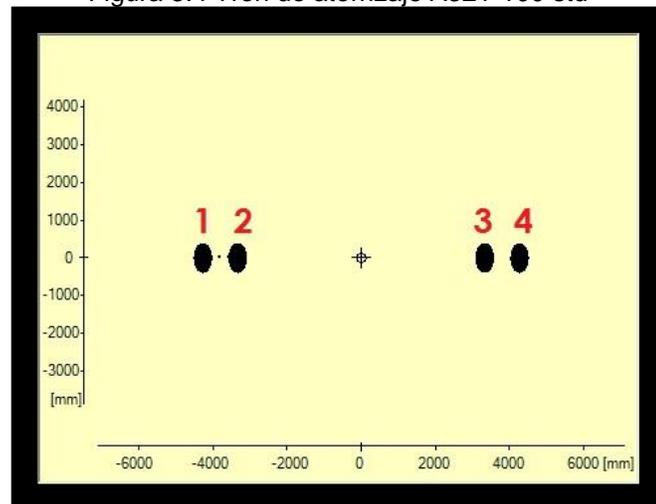
Coordenadas:

1. (-4,258.551, 0)
2. (-3,331.451,0)
3. (3,331.451,0)
4. (4,258.551,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,360 kPa

Figura 3.4 Tren de aterrizaje A321-100 std



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014



 **B737-100**

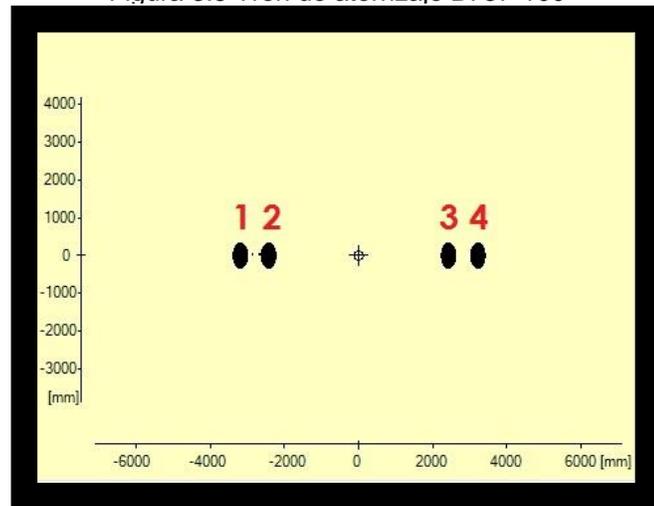
Coordenadas:

1. (-3,197, 0)
2. (-2,423.16,0)
3. (2,423.16,0)
4. (3,197,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,082 kPa

Figura 3.5 Tren de aterrizaje B737-100



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

 **B727-100 C**

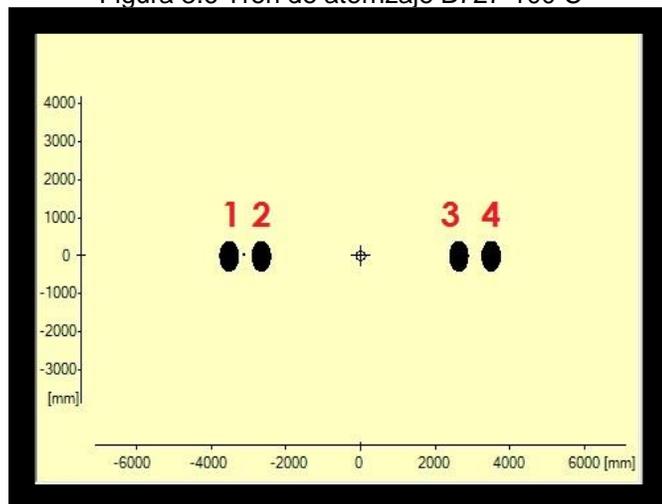
Coordenadas:

1. (-3,505.2, 0)
2. (-2,641.6,0)
3. (2,641.6,0)
4. (3,505.2,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,138 kPa

Figura 3.6 Tren de aterrizaje B727-100 C



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014



Fokker F100

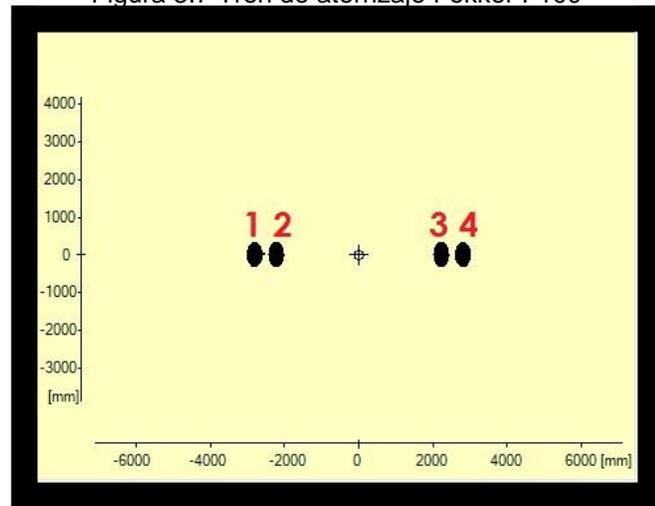
Coordenadas:

1. (-2,813.05, 0)
2. (-2,226.31,0)
3. (2,226.31,0)
4. (2,813.05,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,076 kPa

Figura 3.7 Tren de aterrizaje Fokker F100



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

B757-200

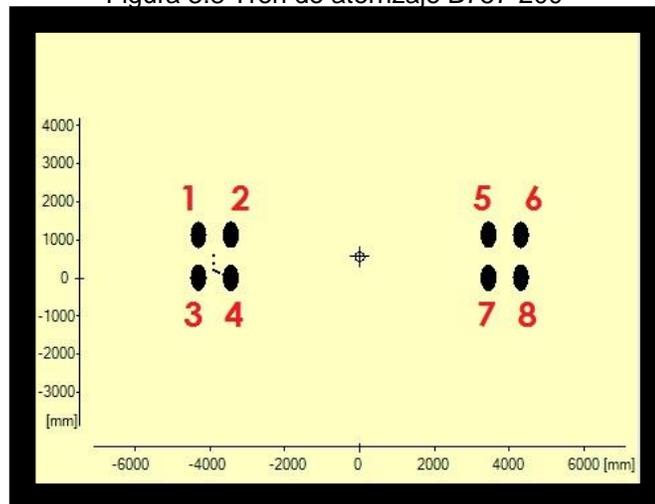
Coordenadas:

1. (-4,305.3,1,143)
2. (-3,441.7,1,143)
3. (-4,305.3,0)
4. (-3,441.7,0)
5. (3,441.7, 1,143)
6. (4,305.3,1,143)
7. (3,441.7,0)
8. (4,305.3,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,262 kPa

Figura 3.8 Tren de aterrizaje B757-200



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

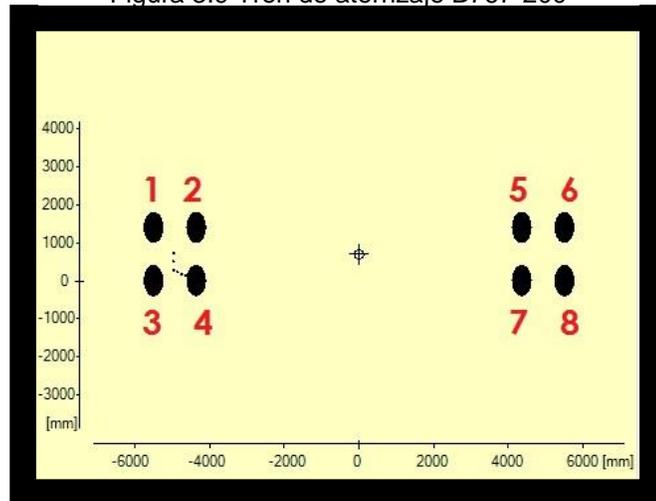


B767-200

Coordenadas:

1. (-5,505.45,1,422.4)
2. (-4,362.45,1,422.4)
3. (-5,505.45,0)
4. (-4,362.45,0)
5. (4,362.45,1,422.4)
6. (5,505.45,1,422.4)
7. (4,362.45,0)
8. (5,505.45,0)

Figura 3.9 Tren de aterrizaje B767-200



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

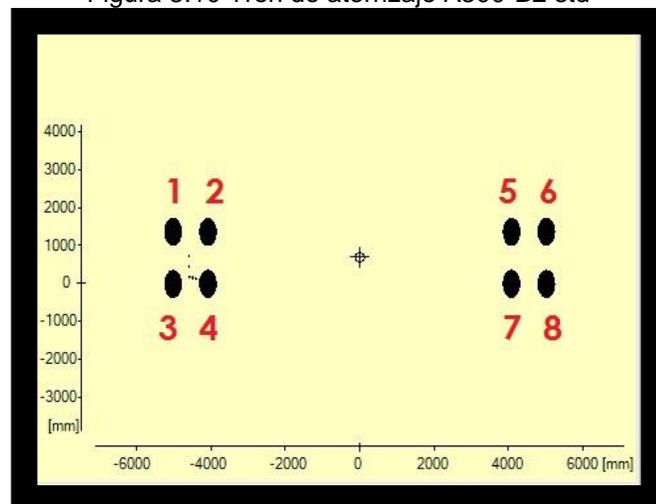
Presión en el neumático: 1,310 kPa

A300-B2 std

Coordenadas:

1. (-5,009.553,1,397)
2. (-4,082.453,1,397)
3. (-5,009.553,0)
4. (-4,082.453,0)
5. (4,082.453,1,397)
6. (5,009.553,1,397)
7. (4,082.453,0)
8. (5,009.553,0)

Figura 3.10 Tren de aterrizaje A300-B2 std



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,280 kPa

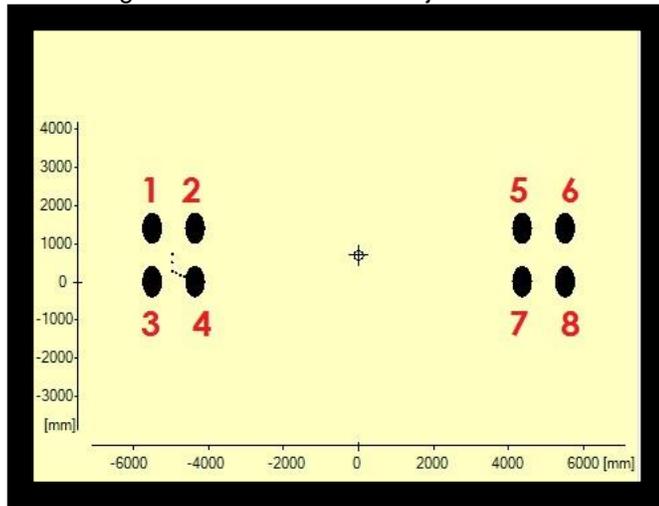


B767-300

Coordenadas:

1. (-5,505.45,1,422.4)
2. (-4,362.45,1,422.4)
3. (-5,505.45,0)
4. (-4,362.45,0)
5. (4,362.45,1,422.4)
6. (5,505.45,1,422.4)
7. (4,362.45,0)
8. (5,505.45,0)

Figura 3.11 Tren de aterrizaje B767-300



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

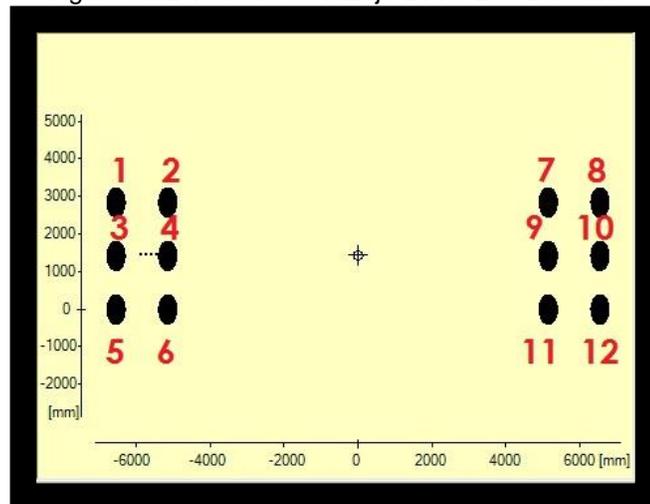
Presión en el neumático: 1,255 kPa

B777-200 Baseline

Coordenadas:

1. (-6,534.15,2,895.6)
2. (-5,137.15,2,895.6)
3. (-6,534.15,1,447.8)
4. (-5,137.15,1,447.8)
5. (-6,534.15,0)
6. (-5,137.15,0)
7. (5,137.15,2,895.6)
8. (6,534.15, 2,895.6)
9. (5,137.15,1,447.8)
10. (6,534.15, 1,447.8)
11. (5,137.15,0)
12. (6,534.15,0)

Figura 3.12 Tren de aterrizaje B777-200 Baseline



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014



Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

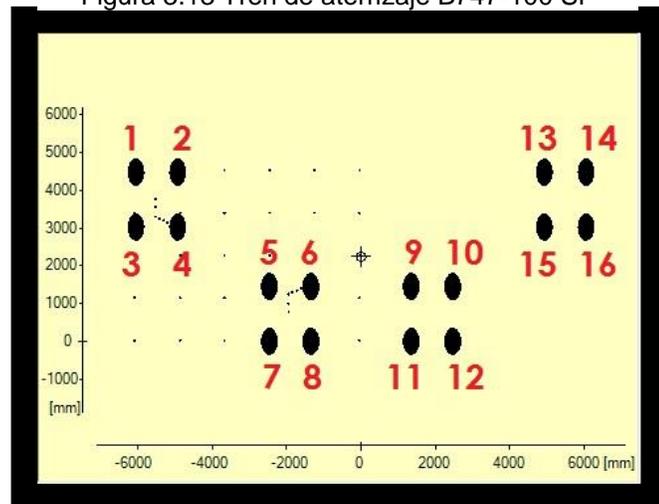
Presión en el neumático: 1,255 kPa

B747-100 SF

Coordenadas:

1. (-6,045.2,4,546.6)
2. (-4,927.6, 4,546.6)
3. (-6,045.2,3,073.4)
4. (-4,927.6, 3,073.4)
5. (-2,463.8,1,473.2)
6. (-1,346.2, 1,473.2)
7. (-2,463.8,0)
8. (-1,346.2,0)
9. (4,927.6,4,546.6)
10. (6,045.2, 4,546.6)
11. (4,927.6,3,073.4)
12. (6,045.2, 3,073.4)
13. (1,346.2,1,473.2)
14. (2,463.8, 1,473.2)
15. (1,346.2,0)
16. (2,463.8,0)

Figura 3.13 Tren de aterrizaje B747-100 SF



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 95%

Presión en el neumático: 1,600 kPa

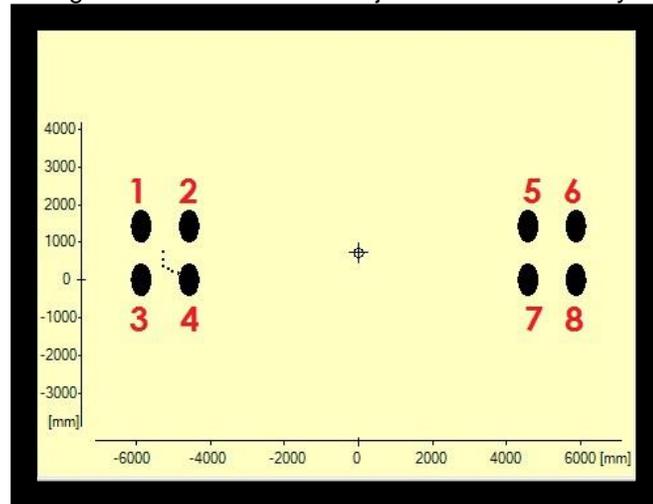


B787-8 Preliminary

Coordenadas:

1. (-5,873.75,1,460.5)
2. (-4,578.35,1,460.5)
3. (-5,873.75,0)
4. (-4,578.35,0)
5. (4,578.35,1,460.5)
6. (5,873.75,460.5)
7. (4,578.35,0)
8. (5,873.75,0)

Figura 3.14 Tren de aterrizaje B787-8 Preliminary



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

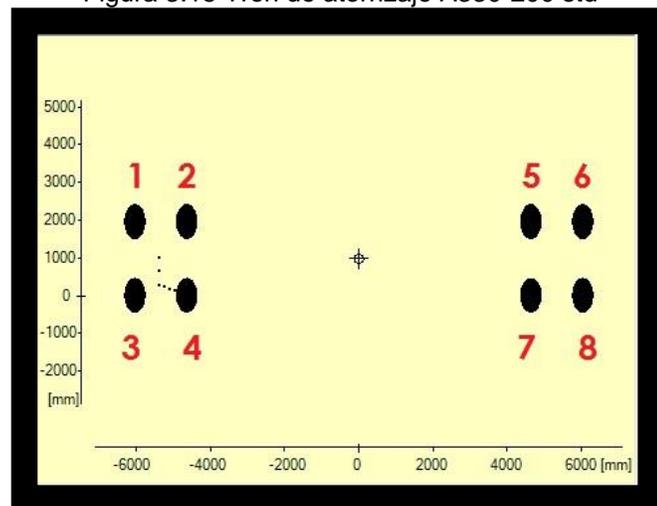
Presión en el neumático: 1,524 kPa

A330-200 std

Coordenadas:

1. (-6,038.85,1,981.2)
2. (-4,641.85,1,981.2)
3. (-6,038.85,0)
4. (-4,641.85,0)
5. (4,641.85,1,981.2)
6. (6,038.85,1,981.2)
7. (4,641.85,0)
8. (6,038.85,0)

Figura 3.15 Tren de aterrizaje A330-200 std



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 47.5%

Presión en el neumático: 1,420 kPa

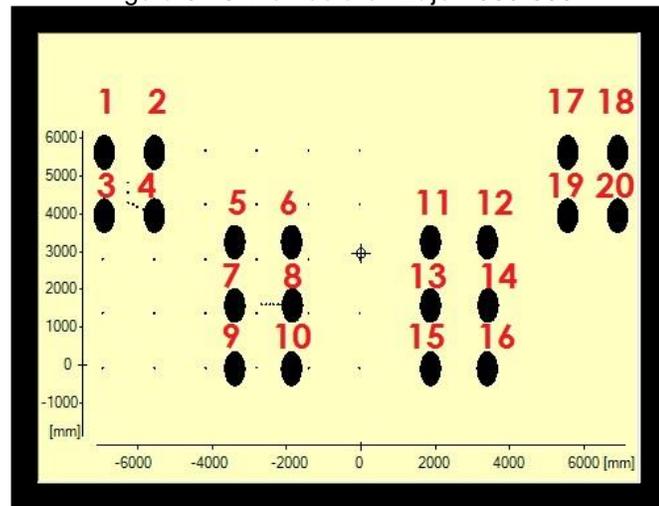


A380-800

Coordenadas:

1. (-6,902.45,5,825.49)
2. (-5,553.71, 5,825.49)
3. (-6,902.45,4,126.23)
4. (-5,553.71, 4,126.23)
5. (-3,395.98,3,398.52)
6. (-1,866.9, 3,398.52)
7. (-3,406.14,1,699.26)
8. (-1,856,1,699.26)
9. (-3,395.98,0)
10. (-1,866.9,0)
11. (-1,866.9,4,546.6)
12. (6,045.2,3,398.52)
13. (3,395.98,3,398.52)
14. (1,856.74,1,699.26)
15. (1866.9,0)
16. (3,395.98,0)
17. (5,553.71,5,825.49)
18. (6.902.45,5,825.49)
19. (5,553.71,4,126.23)
20. (6,902.45,4,126.32)

Figura 3.16 Tren de aterrizaje A380-800



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 95%

Presión en el neumático: 1,338 kPa

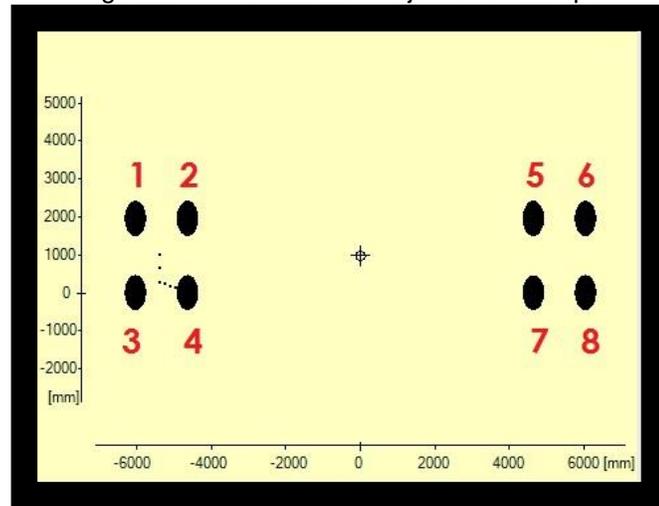


A340-200 opt

Coordenadas:

1. (-6,038.85,1,981.2)
2. (-4,641.85,1,981.2)
3. (-6,038.85,0)
4. (-4,641.85,0)
5. (4,641.85,1,981.2)
6. (6,038.85,1,981.2)
7. (4,641.85,0)
8. (6,038.85,0)

Figura 3.17 Tren de aterrizaje A340-200 opt



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 39%

Presión en el neumático: 1,320 kPa

A340-200 opt Belly

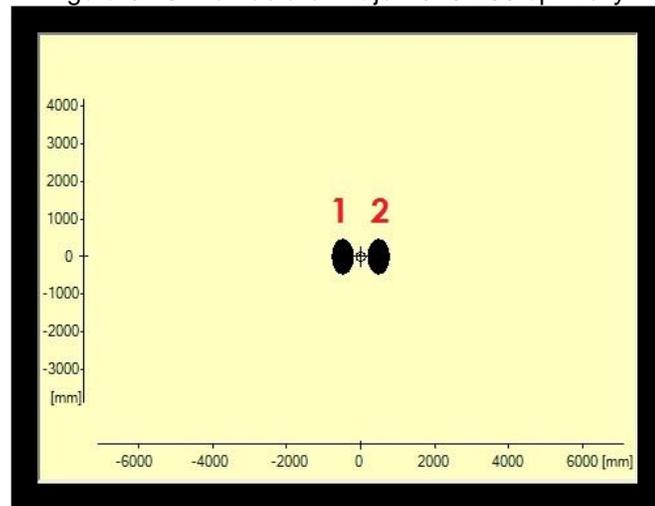
Coordenadas:

1. (-482.6,0)
2. (482.6,0)

Porcentaje de peso en el tren de Aterrizaje: 17%

Presión en el neumático: 1,089 kPa

Figura 3.18 Tren de aterrizaje A340-200 opt Belly



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de julio de 2014



3.1.1 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE CONVENCIONAL

En este primer ejemplo se desea realizar el diseño de una estructura de pavimento flexible convencional nuevo, es decir, un pavimento que contenga una carpeta asfáltica, una capa base, una capa sub-base y una capa subrasante. Una vez que se ha establecido la combinación de tráfico y se han introducido los datos en el software de diseño, se debe indicar el valor de CBR del suelo de cimentación que se utilizará, en este caso se considera un CBR de 5%, bajo la hipótesis de que el suelo sobre el cual se construirá la aeropiستا corresponde a uno de tipo arcilloso de alta plasticidad (CH).

A continuación se hace una breve descripción de las capas precargadas en el programa FAARfield que fueron utilizadas para este primer diseño

- ✚ P-401/P-403 HMA Surface: Es la superficie asfáltica que estará en contacto directo con las ruedas de las aeronaves, esta tiene un Módulo de 1,378.95 MPa
- ✚ P-401/P-403 St (flex): Se trata de una base estabilizada pues las aeronaves que componen la combinación de tráfico tienen un peso mayor a 45 500 kg, el módulo de la capa es de 2.757.90 Mpa
- ✚ P-209 Cr Ag: Se utiliza como capa sub-base, la cual se compone de material triturado, el módulo es calculado por el programa.
- ✚ Subgrade: Corresponde a la capa subrasante, al tratarse de arcilla de alta plasticidad (CH) se le asigna el valor CBR de 5, mientras que el módulo se calcula como se mencionó con anterioridad.

La tabla 3.7 muestra el número de capas que componen la estructura, el tipo de capa que se utilizó, el espesor requerido por cada una y el módulo y relación de Poisson de cada material.

Tabla 3.7 Espesores de las capas de pavimento flexible

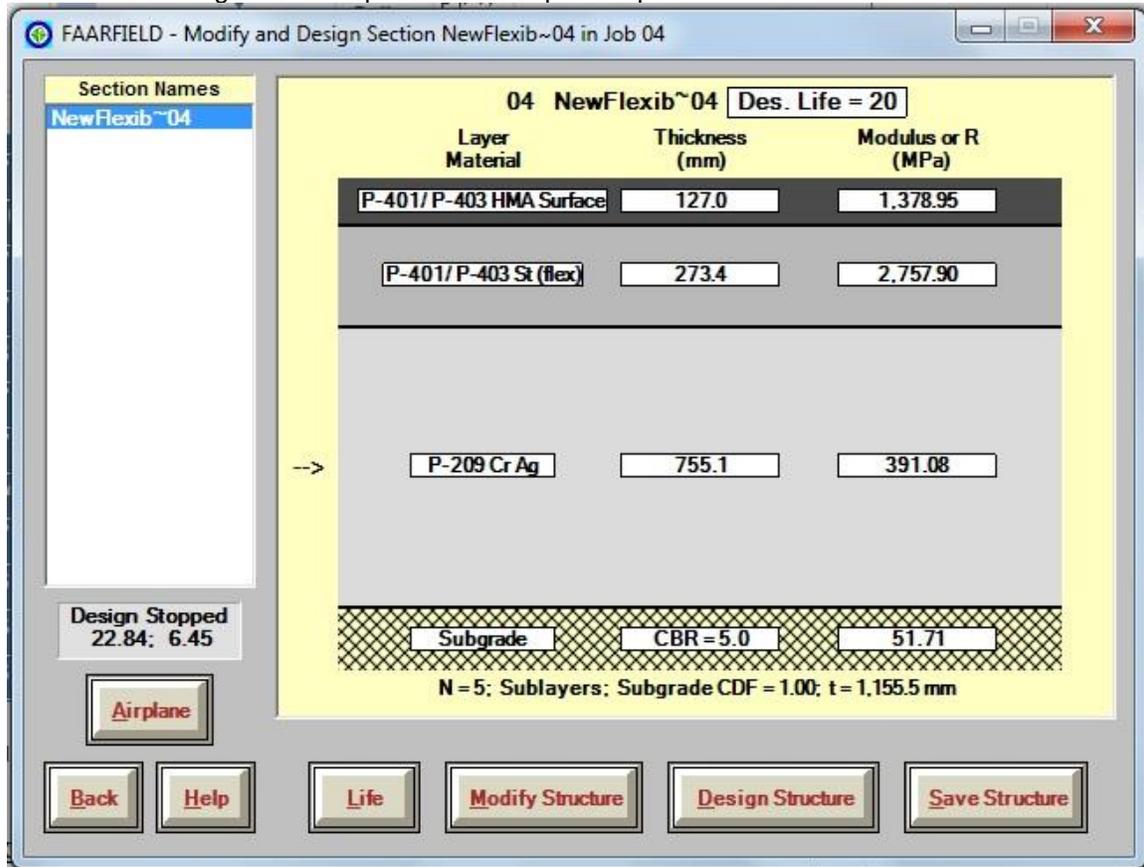
No.	Capa	Espesor mm	Módulo MPa	Relación de Poisson
1	P-401/ P-403 HMA Surface	127.0	1,378.95	0.35
2	P-401/ P-403 St (flex)	273.4	2,757.90	0.35
3	P-209 Cr Ag	755.1	391.08	0.35
4	Subgrade	0.0	51.71	0.35

Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de mayo de 2014



En la figura 3.19 se presentan los resultados de diseño de la estructura de pavimento flexible tomando en cuenta las condiciones de tránsito definidas en la tabla 3.6 y una vida útil de diseño de 20 años.

Figura 3.19 Espesor de las capas del pavimento flexible diseñado



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de mayo de 2014

Cabe mencionar que el espesor total de la estructura de pavimento deberá ser de 1.16 m.

Tal como se mencionó anteriormente el CDF es un valor que nos indica en una escala del 0.0 al 1.0 el daño que cada uno de los aviones ocasiona en el pavimento diseñado, si se realiza la suma de los CDF de toda la combinación de tráfico el resultado debe ser igual a 1.0 o muy próximo a éste. La tabla 3.8 muestra que la aeronave que mayor daño ocasiona al pavimento es la A380-800 con un CDF de 0.91, el cual representa un 89% del coeficiente de daño total.



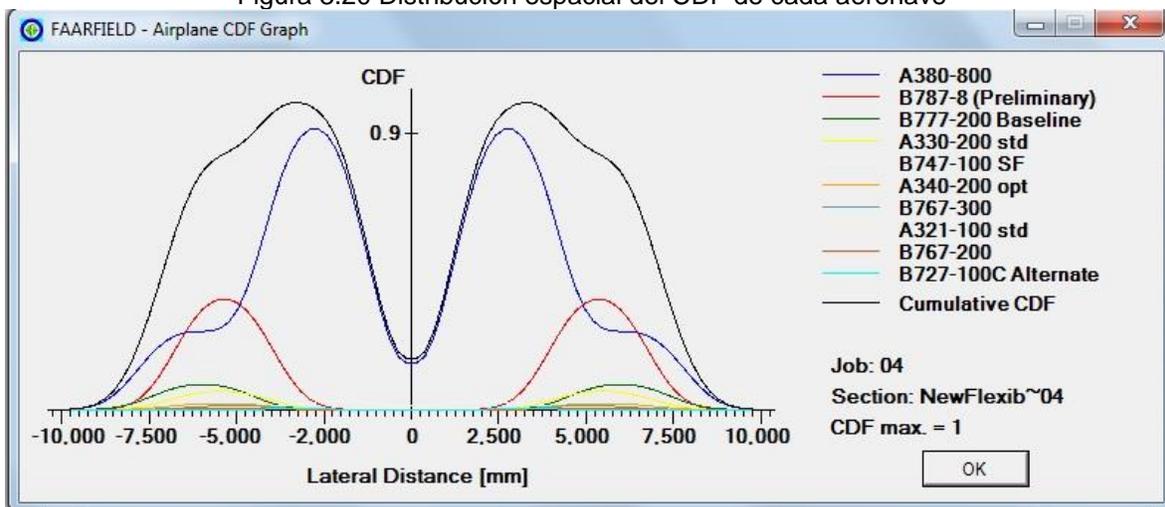
Tabla 3.8 Información adicional de la aeronave

No.	Nombre	Contribución CDF	CDF máx por aeronave	Relación P/C
1	A318-100 std	0.00	0.00	1.14
2	A319-100 std	0.00	0.00	1.14
3	A320-100	0.00	0.00	1.14
4	A321-100 std	0.00	0.01	1.13
5	B737-100	0.00	0.00	1.18
6	B727-100C Alternate	0.00	0.00	1.14
7	Fokker F100	0.00	0.00	1.24
8	B757-200	0.00	0.00	0.90
9	B767-200	0.00	0.01	0.65
10	A300-B2 std	0.00	0.00	0.67
11	B767-300	0.00	0.01	0.66
12	B777-200 Baseline	0.00	0.08	0.44
13	B747-100 SF	0.02	0.03	0.61
14	B787-8 (Preliminary)	0.06	0.36	0.64
15	A330-200 std	0.01	0.06	0.53
16	A380-800	0.89	0.91	0.37
17	A340-200 opt	0.00	0.02	0.53
18	A340-200 opt Belly	0.00	0.00	1.12

Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de mayo de 2014

La figura 3.20 muestra la relación que existe entre el daño que ocasiona cada aeronave respecto a una línea imaginaria en la zona central de la aeropista, con esta figura se puede observar cuáles son las zonas del pavimento que reciben las cargas.

Figura 3.20 Distribución espacial del CDF de cada aeronave



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 20 de mayo de 2014



El diseño que se utilizó nos dice que la capa sub-base granular, la cual es de un material granular triturado debe ser superior a los 70 cm y estar compuesta por un material de una calidad tal que podría ocasionar gastos excesivos. Por ello se modificó el diseño, conservando las bases estabilizada y la sub-base granular y se adicionó otra capa de material con un módulo de rigidez de 200 MPa, la cual, a partir de este análisis se le llamará capa subrasante. Es importante resaltar que el software FAARfield llama capa subrasante al terreno natural, sin embargo, en el presente trabajo se le llamará subrasante a la capa que se encuentra bajo las capas base y sub-base.

La proyección del diseño se realizó contemplando una vida útil de 50 años, como se mencionó anteriormente, los desarrolladores del programa FAARfield no garantizan los resultados que arroja el software cuando la vida útil considerada es diferente de 20 años, sin embargo, los resultados que se obtienen no difieren tanto de los valores correctos y se utilizarán para realizar un análisis de sensibilidad en el espesor de la capa granular de módulo 200 MPa.

El análisis de sensibilidad se realizó con intervalos de tiempo de 5 años. Lo anterior, con el fin de observar la variación del espesor de la capa adicional y conocer el comportamiento del pavimento cuando se hacen variar las combinaciones de tráfico y los años de vida útil.

Para ello se obtuvo el número de salidas anuales por cada clase o grupo de avión (C, D, E, F), para una vida útil de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 años; con esta información fue posible además obtener el número de salidas anuales por aeronave (A-318, A-319, A-320, etc.) para los mismos valores de vida útil. Los resultados se muestran en las tablas 3.9 a 3.18.

Tabla 3.9 Salidas promedio con vida útil de 5 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	208,567.34	C	29,795.33
D	2,555.00	D	851.67
E	5,664.13	E	944.02
F	468.65	F	468.65

Fuente: Propia



Tabla 3.10 Salidas promedio con vida útil de 10 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	229,370.21	C	32,767.17
D	2,555.00	D	851.67
E	7,197.12	E	1,199.52
F	1,034.08	F	1,034.08

Fuente: Propia

Tabla 3.11 Salidas promedio con vida útil de 15 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	245,320.90	C	35,045.84
D	2,275.93	D	758.64
E	8,221.21	E	1,370.20
F	1,323.31	F	1,323.31

Fuente: Propia

Tabla 3.12 Salidas promedio con vida útil de 20 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	258,919.25	C	36,988.46
D	1,847.66	D	615.89
E	9,008.76	E	1,501.46
F	1,518.95	F	1,518.95

Fuente: Propia

Tabla 3.13 Salidas promedio con vida útil de 25 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	271,941.64	C	38,848.81
D	1,515.02	D	505.01
E	9,725.34	E	1,620.89
F	1,681.52	F	1,681.52

Fuente: Propia



Tabla 3.14 Salidas promedio con vida útil de 30 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	285,004.86	C	40,714.98
D	1,272.59	D	424.20
E	10,428.26	E	1,738.04
F	1,831.61	F	1,831.61

Fuente: Propia

Tabla 3.15 Salidas promedio con vida útil de 35 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	298,396.13	C	42,628.02
D	1,093.62	D	364.54
E	11,144.09	E	1,857.35
F	1,978.40	F	1,978.40

Fuente: Propia

Tabla 3.16 Salidas promedio con vida útil de 40 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	312,280.68	C	44,611.53
D	957.73	D	319.24
E	11,888.06	E	1,981.34
F	2,126.85	F	2,126.85

Fuente: Propia

Tabla 3.17 Salidas promedio con vida útil de 45 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	326,771.11	C	46,681.59
D	851.55	D	283.85
E	12,670.54	E	2,111.76
F	2,280.05	F	2,280.05

Fuente: Propia



Tabla 3.18 Salidas promedio con vida útil de 50 años

Salidas promedio por grupo		Salidas promedio por avión perteneciente al grupo	
C	341,955.19	C	48,850.74
D	766.47	D	255.49
E	13,499.67	E	2,249.94
F	2,440.23	F	2,440.23

Fuente: Propia

La figura 3.21 muestra el nuevo diseño de la estructura, se observa la capa de rodadura compuesta por un material bituminoso, la capa base estabilizada para pavimento flexible, la segunda capa sub-base de material granular triturado y la capa que funcionará como subrasante y que es de material granular no triturado. Este diseño se realiza para una vida útil de 5 años, en los siguientes diseños se mantiene la estructura y se hará variar la vida útil hasta los 50 años.

Figura 3.21 Estructura de pavimento para una vida útil de 5 años

FAARFIELD - Modify and Design Section NewFlexib~05 in Job 5years

Section Names
NewFlexib~05

5years NewFlexib~05 Des. Life = 5

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
P-401/P-403 HMA Surface	127.0	1,378.95
P-401/P-403 St (flex)	200.0	2,757.90
P-209 Cr Ag	250.0	428.16
→ Undefined	523.6	200.00
Non-Standard Structure and Life		
Subgrade	CBR=5.0	51.71

Total thickness to the top of the subgrade, t = 1,100.6 mm

Design Stopped 4.16: 1.99

Airplane

Back Help Life Modify Structure Design Structure Save Structure

Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 24 de mayo de 2014



En este diseño se obligó a que las primeras 3 capas tuvieran valores de espesor fijos, mientras que para la capa “Undefined” que es la capa de material granular, se le asigna el módulo de 200 MPa y para la capa subrasante únicamente se fija el valor de CBR igual a 5. Con este arreglo, para las diferentes vidas útiles, se obtuvieron los espesores de la tabla 3.19.

Tabla 3.19 Espesores de capas de pavimento

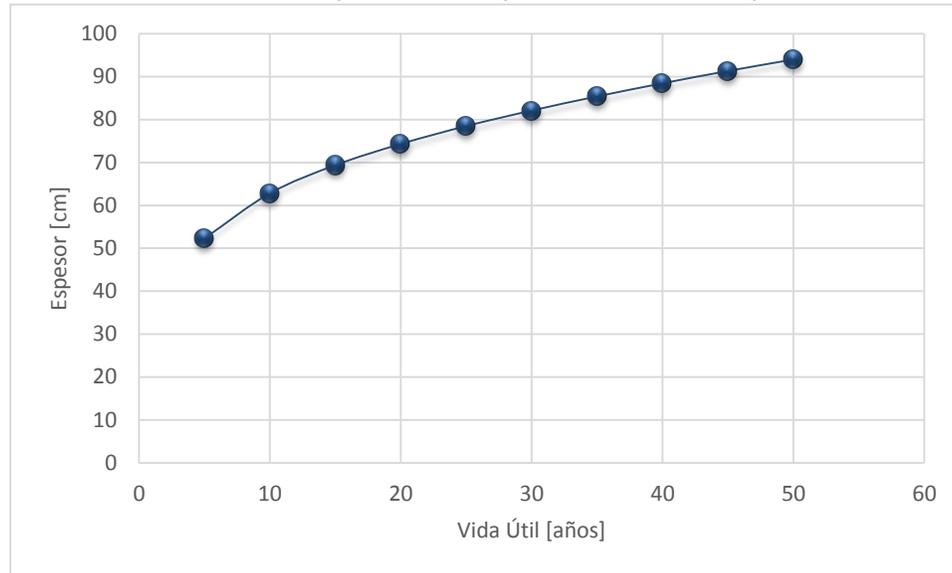
Vida Útil [Años]	Espesores				
	Carpeta Asfáltica [cm]	Base Estabilizada [cm]	Sub-base triturada [cm]	Sub-base No Triturada [cm]	Espesor total [m]
5	12.7	20	25	52.36	1.1006
10	12.7	20	25	62.85	1.2055
15	12.7	20	25	69.39	1.2709
20	12.7	20	25	74.32	1.3202
25	12.7	20	25	78.48	1.3618
30	12.7	20	25	82.09	1.3979
35	12.7	20	25	85.38	1.4308
40	12.7	20	25	88.43	1.4613
45	12.7	20	25	91.3	1.49
50	12.7	20	25	93.97	1.5167

Fuente: Propia

Se observa que cuando la vida útil que se asigna al pavimento aumenta, el espesor de la capa Undefined también, el incremento experimentado se muestra en el gráfico 3.5.



Gráfico 3.5 Variación del espesor de la capa de subrasante respecto a la vida útil



Fuente: Propia

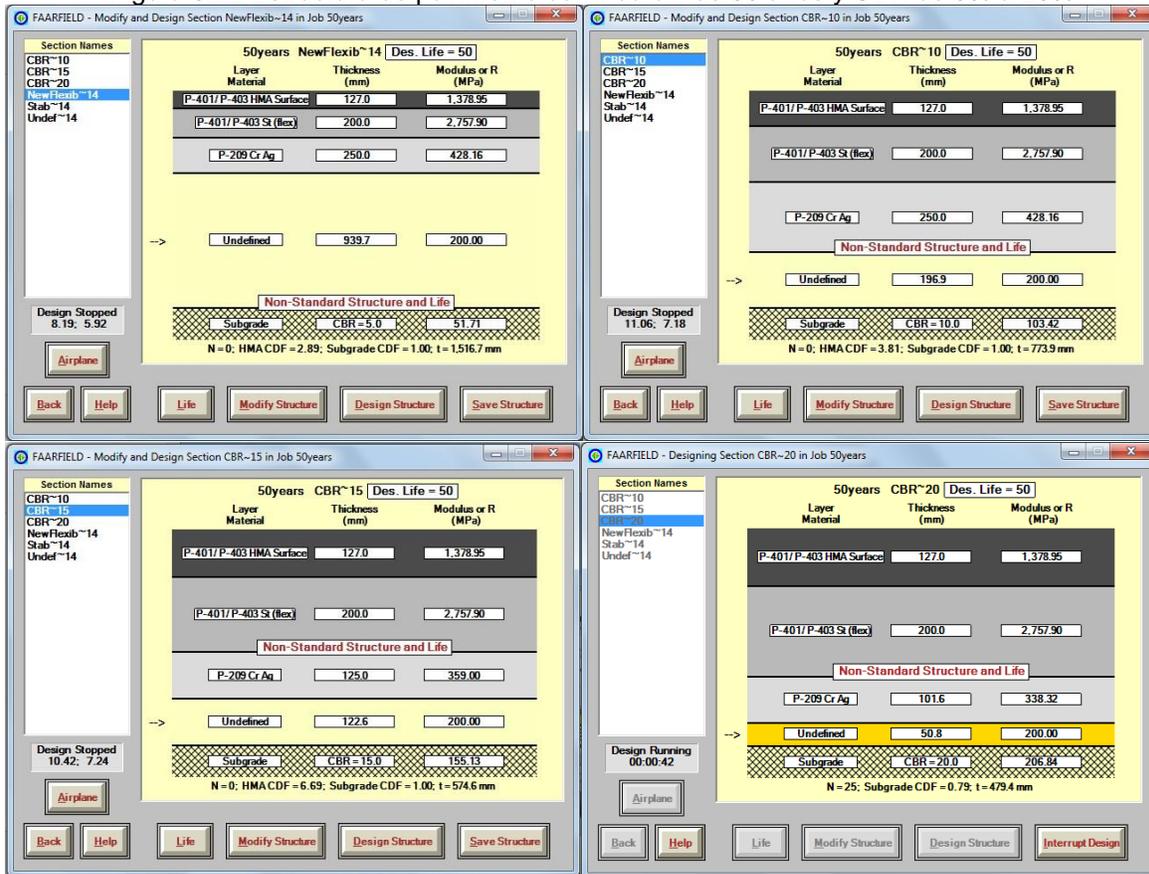
3.1.2 EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CBR EN LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

La Tabla 2.6 indica las categorías del terreno, desde resistencia ultrabaja hasta Alta de acuerdo al valor de CBR que posea el terreno. Utilizando el arreglo de capas de la estructura anterior y seleccionando una vida útil de 50 años con la combinación de tráfico ya calculada, se realizará la variación del CBR desde 5% hasta 20%, con intervalos de 5%. Este ejercicio se realiza con la finalidad de observar la sensibilidad de la capa Undefined, la cual simula ser la capa subrasante, debido a la resistencia del terreno de fundación.

La Figura 3.22 y la Tabla 3.20 muestran los espesores obtenidos al realizar el análisis de la estructura después de variar el valor de CBR, es importante indicar que el espesor de la capa Undefined va disminuyendo de manera importante, incluso la capa P-209 Cr Ag se ve reducida en espesor por la alta resistencia del suelo.



Figura 3.22 Estructura de pavimento con vida útil de 50 años y CBR de 5% a 20%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

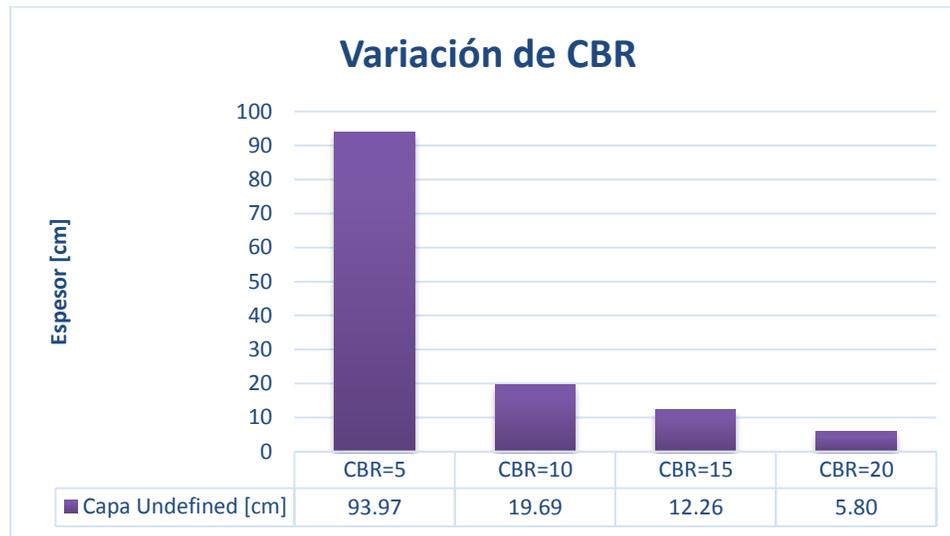
Tabla 3.20 Espesor de capa sub-base a partir del valor CBR en pavimento de 50 años de vida útil

Vida útil de 50 años	
CBR [%]	Espesor de capa Undefined [cm]
5	93.97
10	19.69
15	12.26
20	5.80

Fuente: Propia



Gráfico 3.6 Variación del espesor de la subrasante en función del CBR para una vida útil de 50 años



Fuente: Propia

La Figuras 3.23 a 3.26 muestran los daños ocasionados en la estructura debidos al paso de las ruedas de los aviones en los distintos tipos de terrenos considerados, es decir, en dichas figuras se observan las diferencias de daños en la estructura cuando el CBR del suelo varía. Se observa que el daño en el terreno de fundación es inversamente proporcional al valor de CBR, esto es, si el valor de CBR aumenta, el daño en el terreno de cimentación es menor y, por tanto, los espesores de la capa Undefined disminuyen también, incluso se observa en la Tabla 3.20 que, cuando el valor de CBR es 20, el suelo es tan resistente que la capa Undefined tiene el espesor mínimo requerido que equivale a 5.08 cm. Algo que también muestran las Figuras 3.23 a 3.26 es que los aviones que ocasionan mayor daño al pavimento no son los mismos:

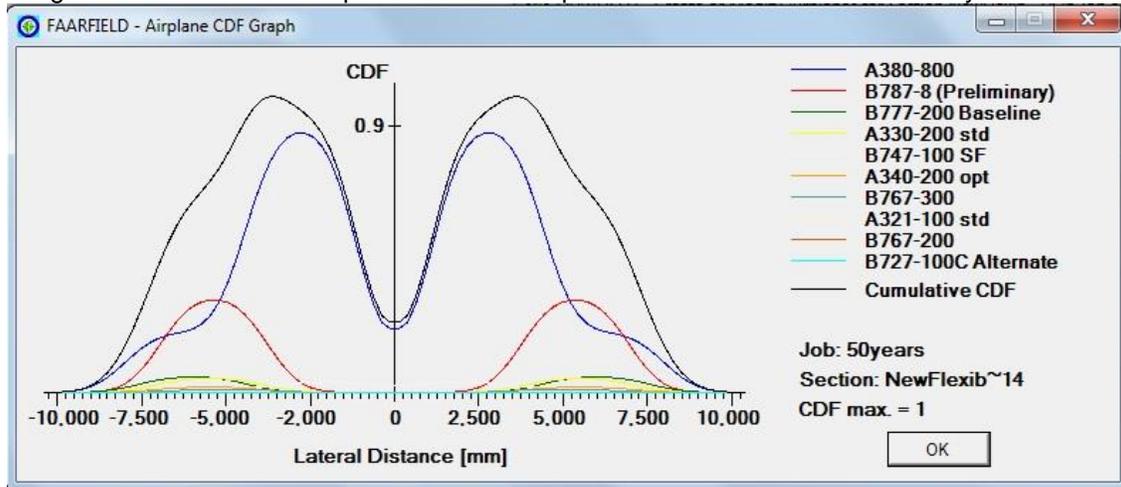
- ✚ CBR de 5, el avión que mayor daño ocasiona es el A 380-800
- ✚ CBR de 10, el avión que mayor daño ocasiona es el B787-8
- ✚ CBR de 15, el avión que mayor daño ocasiona es el A321-100
- ✚ CBR de 20, el avión que mayor daño ocasiona es el A330-200

La figura 3.26 muestra en la parte inferior derecha el valor de CDF máximo estimado por FAAfield, el cual es de 0.78, recordando que el programa indica que al alcanzar un valor CDF =1 la estructura falla, podemos concluir que cuando la resistencia de un suelo es tan



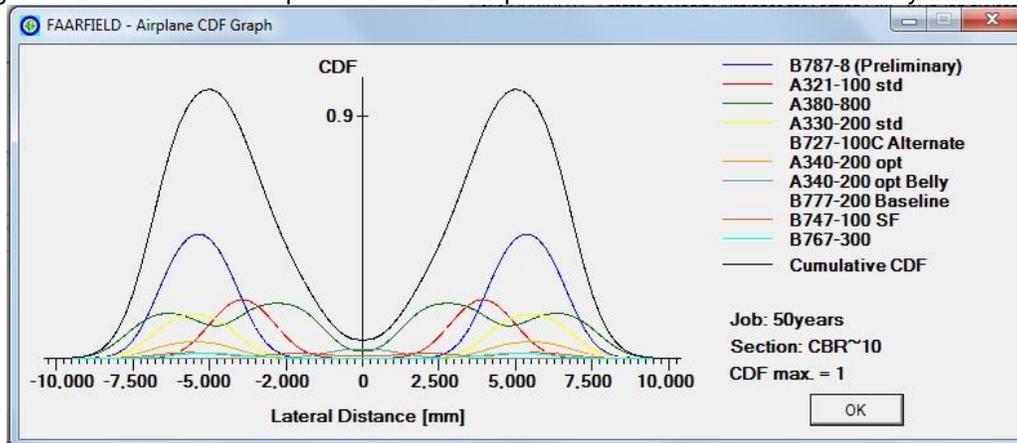
alta, el programa, después de realizar varias iteraciones, no es capaz de determinar el momento del colapso, por lo que podemos intuir que los espesores que se han determinados podrían dar una vida útil mayor de los 50 años que se están considerando para el ejercicio.

Figura 3.23 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 5%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

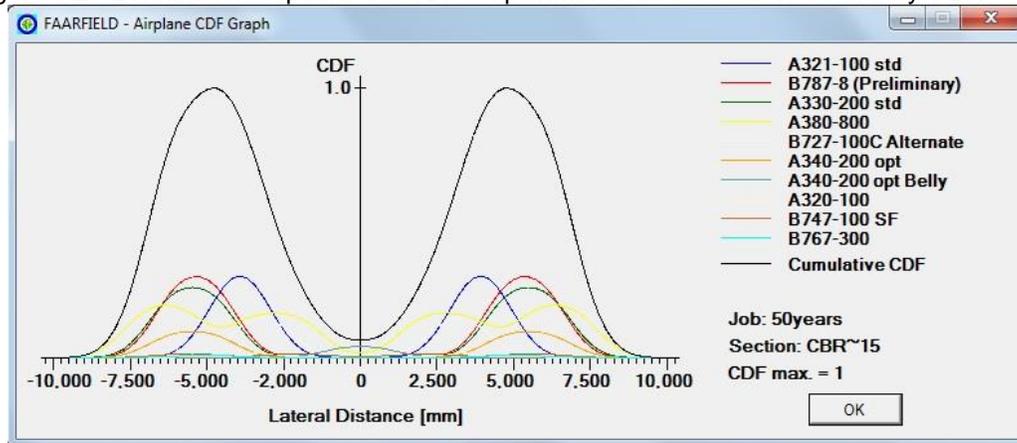
Figura 3.24 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 10%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

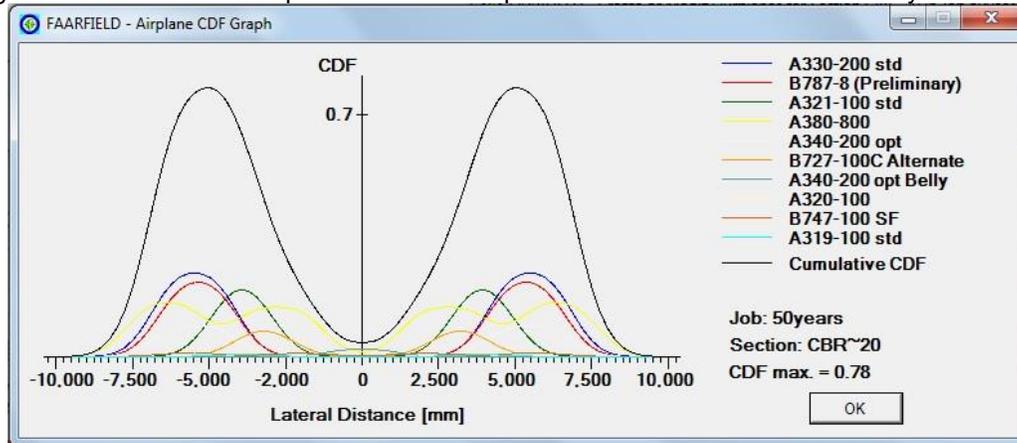


Figura 3.25 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 15%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

Figura 3.26 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 50 años y CBR = 20%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

Ya que el programa garantiza mejores resultados cuando la vida útil es igual a 20 años, a continuación se realiza el análisis anterior con la combinación de tráfico que resulta de una vida útil de la magnitud mencionada, la estructura tiene el mismo arreglo de capas y la variación de CBR es la misma.

La Figura 3.27 muestra los espesores obtenidos al variar el valor de CBR, como se puede observar, el espesor de la capa Undefined va disminuyendo hasta el espesor mínimo de diseño, además es importante observar que la capa base inferior nombrada P-209 Cr Ag por el programa, disminuye su espesor a 12.5 cm cuando el CBR es de 15% y a 10.16 cm, cuando es de 20%; con base en estos resultados se puede observar en la gráfica 3.7 la variación de los espesores de acuerdo al CBR que tiene el suelo.



Figura 3.27 Estructura de pavimento con vida útil de 20 años y CBR de 5% a 20%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

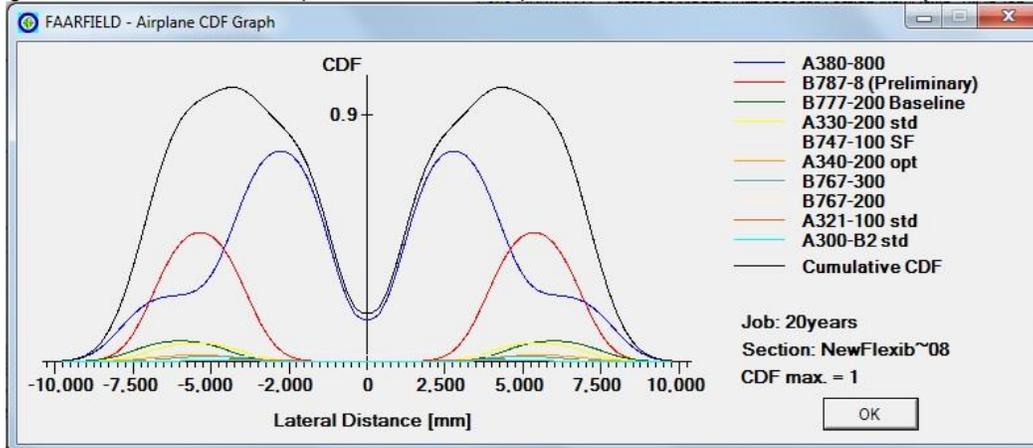
Las figuras 3.28 a 3.31 muestran los factores de daño acumulado en las distintas partes del pavimento, siendo éstas medidas a partir de una línea imaginaria que se coloca al centro de la pista de aterrizaje, como en el caso anterior, el CDF va siendo menos importante conforme aumenta la resistencia del suelo o, dicho de otra manera, cuando aumenta el CBR. Para cada valor de CBR la aeronave que mayor daño ocasiona en el terreno de fundación es diferente, los resultados son muy similares a los observados en la estructura de vida útil de 50 años:

- ✚ CBR de 5%, el avión que mayor daño ocasiona es el A 380-800
- ✚ CBR de 10%, el avión que mayor daño ocasiona es el B787-8
- ✚ CBR de 15%, el avión que mayor daño ocasiona es el A321-100
- ✚ CBR de 20%, el avión que mayor daño ocasiona es el A330-200



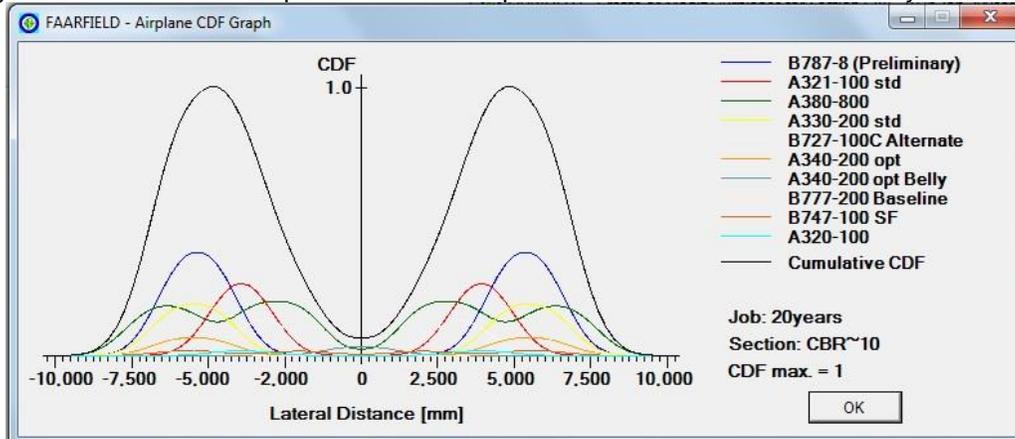
En la Figura 3.31 se observa que el valor máximo de CDF calculado por el programa es de 0.21, lo cual quiere decir que en las iteraciones que el programa realizó, el terreno de cimentación no llegó a colapsar, esto nos indica que para el diseño en el que el CBR vale 20, los espesores de las capas están sobrados.

Figura 3.28 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 5%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

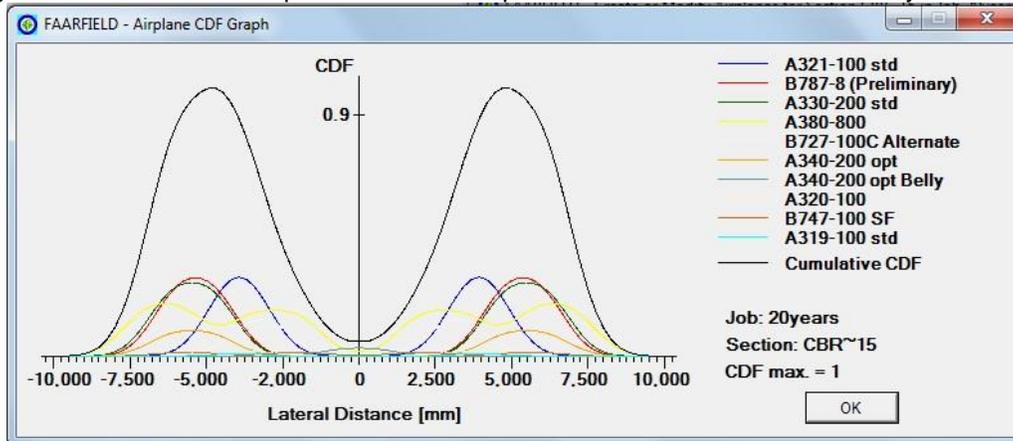
Figura 3.29 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 10%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

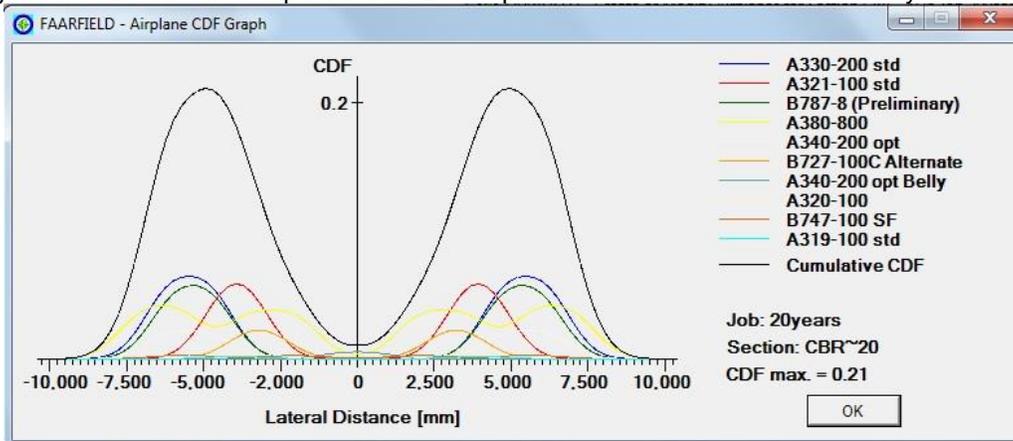


Figura 3.30 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 15%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

Figura 3.31 Distribución espacial del CDF en pavimento de vida útil de 20 años y CBR = 20%

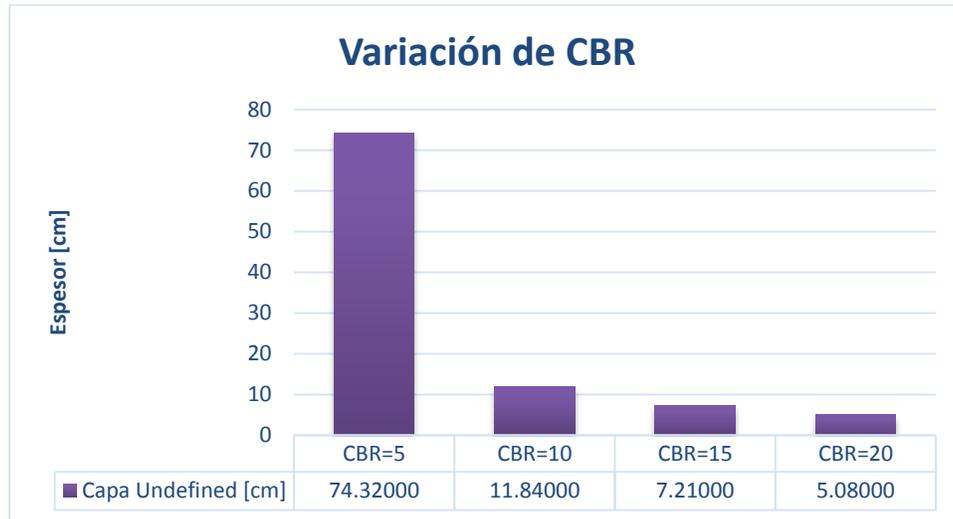


Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 18 de Junio de 2014.

El Gráfico 3.7 muestra los espesores de la capa base inferior de acuerdo al CBR asignado, cuando el CBR es de 20% el programa reduce la capa P-209 Cr Ag hasta los 10 cm y la capa Undefined hasta el espesor mínimo, incluso se puede asegurar que con ese diseño la estructura puede durar más años, pues es el mismo espesor que se obtuvo para la estructura de 50 años siendo este último conservador.



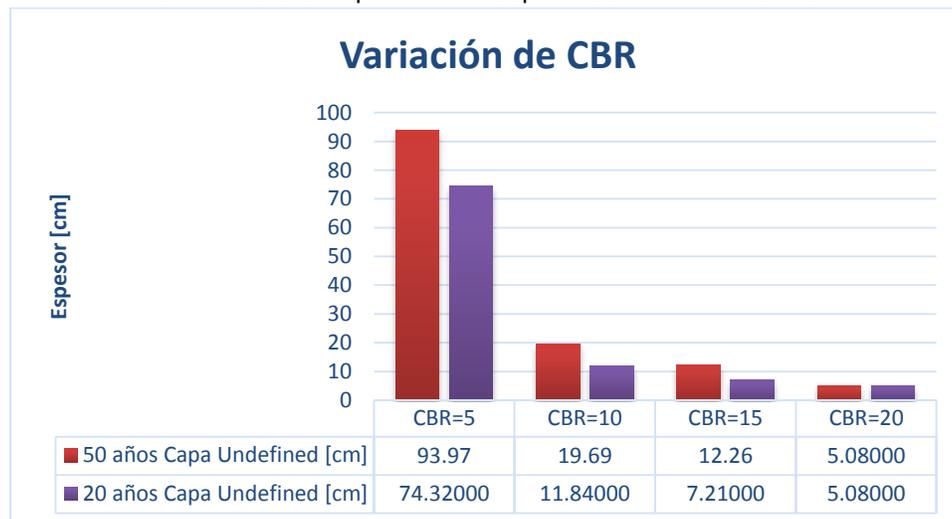
Gráfico 3.7 Variación del espesor de la subrasante en función del CBR, para una vida útil de 20 años



Fuente: Propia

El gráfico 3.8 muestra un comparativo entre los espesores de la capa de subrasante que tendrían las estructuras del pavimento para una vida útil de 20 y 50 años en función de la variación del CBR del suelo de cimentación. En dicha figura se observan diferencias significativas de los espesores para CBR bajos, dichas diferencias se vuelven menores en la medida que aumenta el CBR. Cabe mencionar, que cuando el suelo tiene alta resistencia, es decir, que el CBR es grande, el espesor se reduce al mínimo, incluso se podría eliminar la capa P-209 Cr Ag y aumentar un poco la capa Undefined para que el diseño sea más económico.

Gráfico 3.8 Comparativo de espesores de la subrasante



Fuente: Propia



3.1.3 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO PERPETUO

En este ejercicio se diseña un pavimento con las siguientes características:

- ✚ 12.7 cm de carpeta asfáltica
- ✚ 25 cm de base asfáltica intermedia
- ✚ 10 cm de base asfáltica inferior
- ✚ 15 cm de capa base de material granular triturado
- ✚ Capa de material granular con módulo de 200 MPA

Debido a las características del programa y de las capas precargadas en el programa, el cálculo de esta estructura se realiza englobando las capas de base asfáltica intermedia y capa base asfáltica inferior en una sola, quedando la estructura con los siguientes espesores y capas de FAARfield:

- ✚ 12.7 cm de P-401/P-403 HMA Surface
- ✚ 35 cm de P401/P-403 St. (flex)
- ✚ 15 cm de P-209 Cr Ag
- ✚ Capa Undefined con Módulo de 200 MPa

Es importante mencionar que para estas capas el programa FAARfield establece módulos de rigidez con valores muy por debajo de los que se utilizan la estructura real, es por ello que los resultados que el programa obtiene subestiman la verdadera capacidad de la estructura. Los módulos de rigidez reales para la construcción de pavimentos perpetuos suelen ser del siguiente orden:

- ✚ Carpeta asfáltica: 3,000 MPa
- ✚ Base asfáltica intermedia: 10,000 MPa
- ✚ Base asfáltica inferior: 4,000 MPa

Como se mencionó en apartados anteriores, el programa es muy conservador lo cual puede generar estructuras costosas.

En este ejercicio también se hará variar el valor de CBR desde 5 hasta 20, además se modificará el espesor de la capa Undefined hasta que al calcular la vida útil que presenta

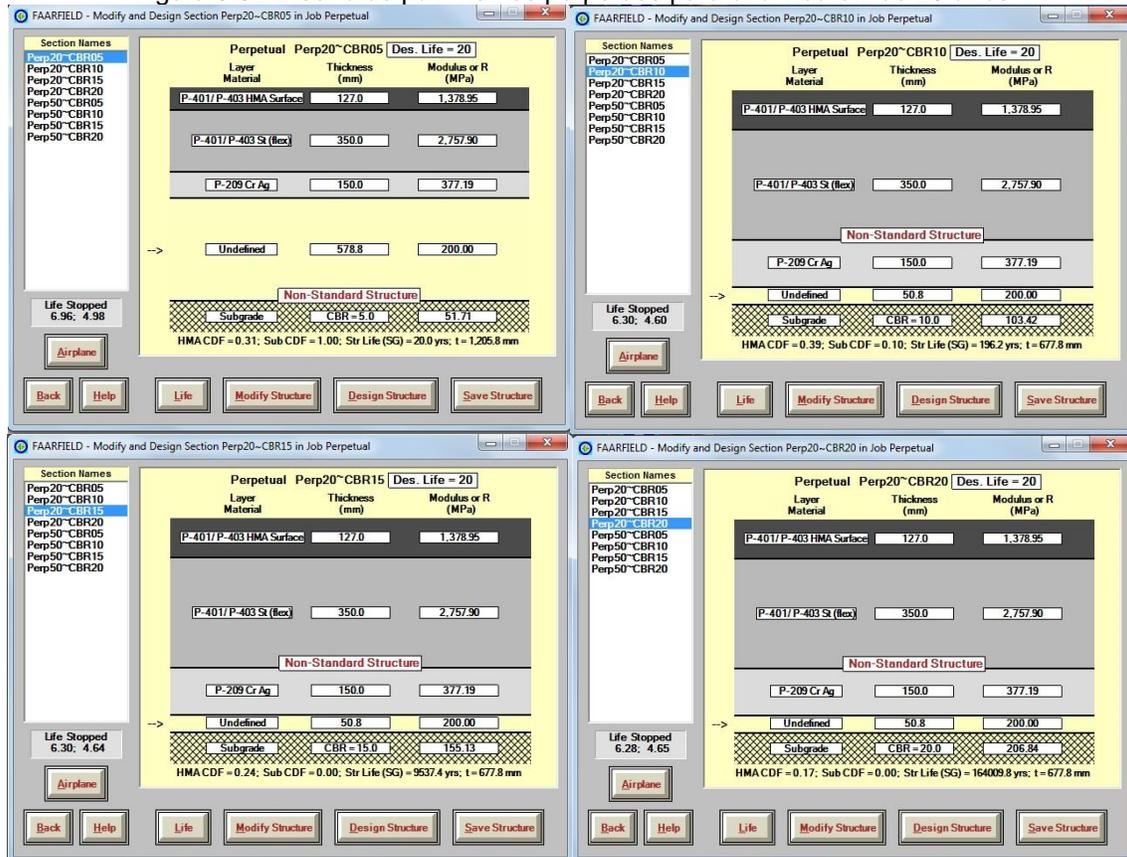


la estructura de pavimento resulte ser de 20 y de 50 años. En la Figura 3.32 se observan las capturas de pantalla del programa en las que se indican, en la parte inferior, los valores de CBR en la subrasante, el valor CDF en la carpeta asfáltica, el CDF en la capa subrasante, la vida útil y el espesor total del pavimento. La finalidad del análisis mostrado en dicha figura fue obtener un diseño capaz de resistir durante 20 años el paso de las aeronaves.

En los últimos tres diseños, es decir, en los que poseen CBR de 10%, 15% y de 20% se observa que, a pesar de utilizar el espesor mínimo aceptado para la capa Undefined, la vida útil calculada por el software de diseño es mayor a 20 años, con ello se puede llegar a la conclusión de que la estructura propuesta tiene un diseño sobrado y que soportará las cargas de la combinación de tráfico que se ha considerado en el periodo de tiempo que se tiene proyectado e incluso durante más años. Si se desea realizar un diseño más económico, se podría reducir la capa P-401/P-403 St. (flex) y volver a calcular la vida útil de la estructura hasta lograr el periodo de tiempo deseado, al realizar esto, incluso, se podría descubrir que para suelos con resistencia alta no es necesario invertir en un pavimento perpetuo y que bastaría con una estructura convencional.



Figura 3.32 Diseño de pavimentos perpetuos para una vida útil de 20 años



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 24 de Junio de 2014.

En el gráfico 3.9 se observan los espesores de las capas del pavimento en relación con la resistencia del terreno de fundación. Las capas precargadas en el programa, y que fueron utilizadas para llevar a cabo el diseño, se han llamado de la siguiente manera para este ejercicio:

- ✚ P-401/P-403 HMA Surface corresponde a la carpeta asfáltica
- ✚ P401/P-403 St. (flex) corresponde a la capa de base asfáltica más la capa de base asfáltica inferior, que por simplicidad, se llamará Sistema Combinado
- ✚ P-209 Cr Ag capa de base granular
- ✚ Capa Undefined con módulo de rigidez 200 MPa corresponde a la capa subrasante



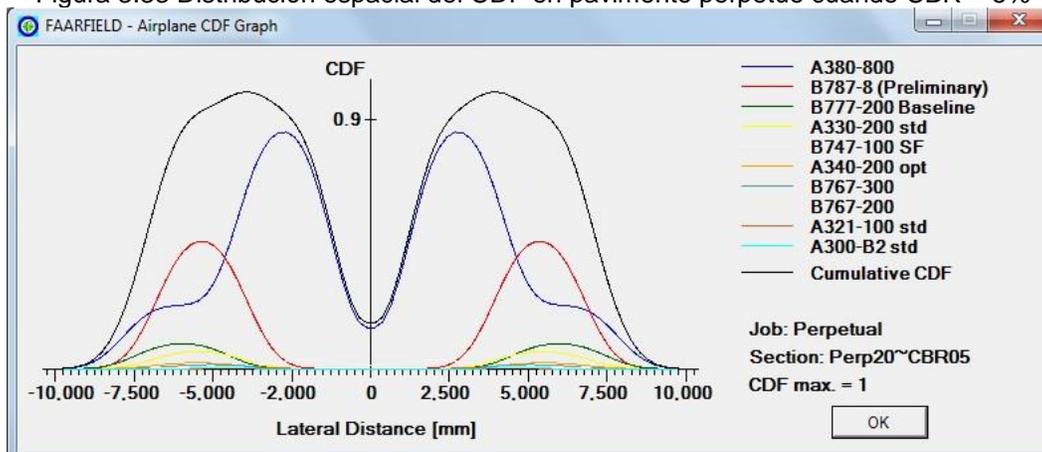
Gráfico 3.9 Espesores de capas en pavimento perpetuo para una vida útil de 20 años



Fuente: Propia

En las Figuras 3.33 a 3.36 se presentan los gráficos de CDF que genera el software de diseño, en ellas se puede observar que los valores del coeficiente de daño acumulativo reducen de manera considerable al cambiar de CBR 5% a 10%, además de que la aeronave que mayor daño causa es diferente, en el primer caso es la aeronave A380-800, mientras que en el segundo es la B787-8. Por otra parte, cuando el CBR es de 10%, 15% y 20%, al tener un diseño tan sobrado, el valor de CDF es muy pequeño, nunca alcanza el valor de 1, es decir, el programa no puede determinar en qué momento fallará el terreno de cimentación.

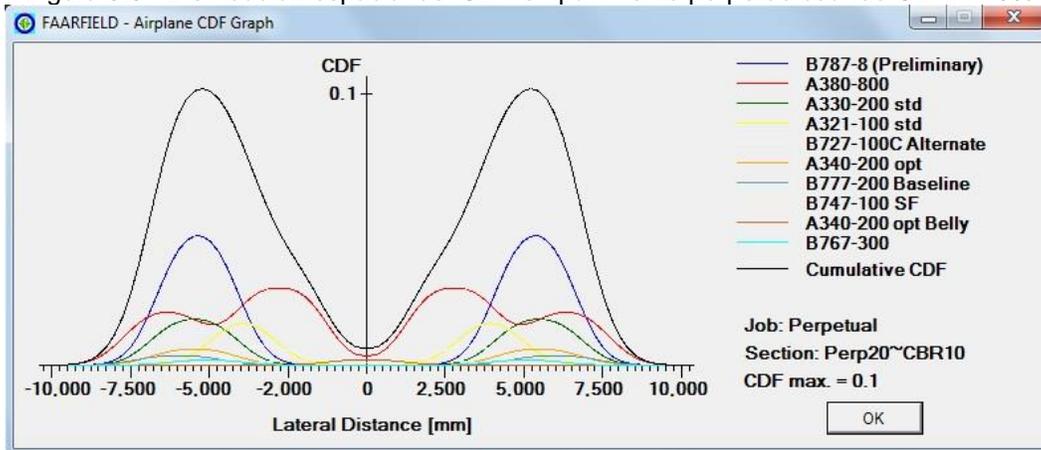
Figura 3.33 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 5%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 24 de Junio de 2014.

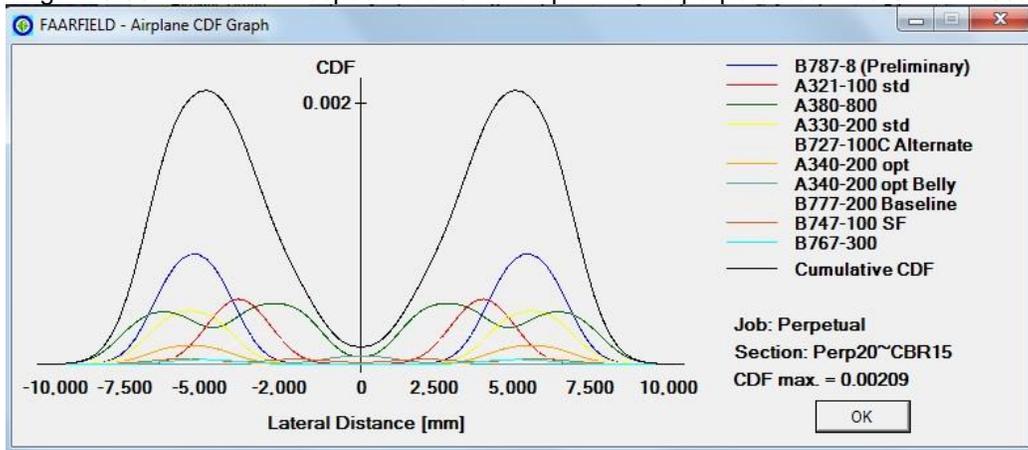


Figura 3.34 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 10%



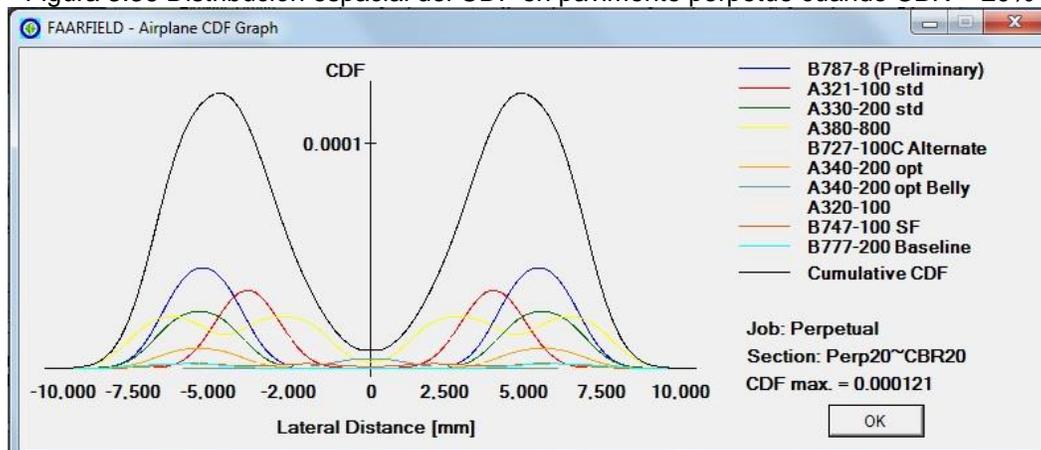
Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 24 de Junio de 2014.

Figura 3.35 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 15%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 24 de Junio de 2014.

Figura 3.36 Distribución espacial del CDF en pavimento perpetuo cuando CBR = 20%



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 24 de Junio de 2014.

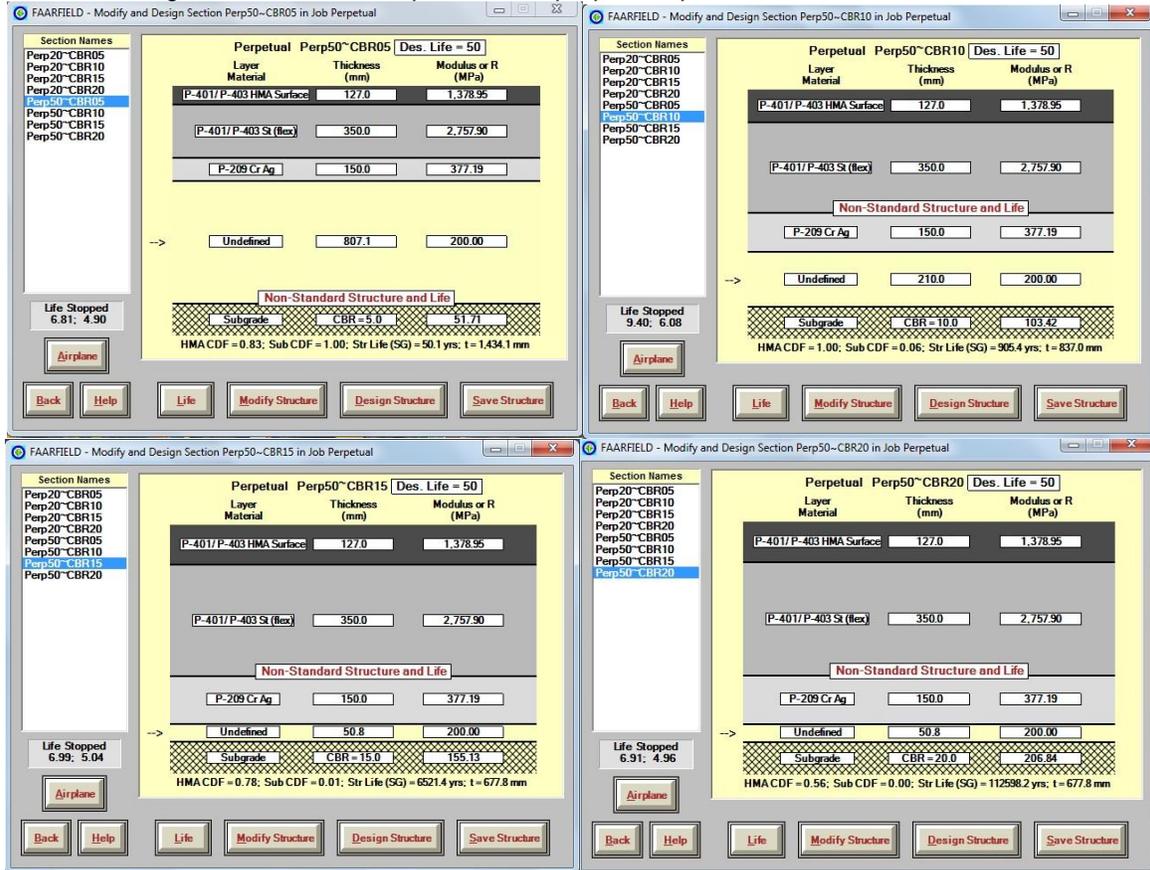


DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



Al realizar el mismo análisis, buscando que el periodo de diseño sea de 50 años, los resultados son muy similares a los anteriores, en la Figura 3.37 se observan los espesores que el programa calcula para las estructuras propuestas. En el gráfico 3.10 se pueden observar con mayor claridad dichos espesores.

Figura 3.37 Diseño de pavimentos perpetuos para una vida útil de 50 años



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 24 de Junio de 2014.



Gráfico 3.10 Espesores de capas en pavimento perpetuo

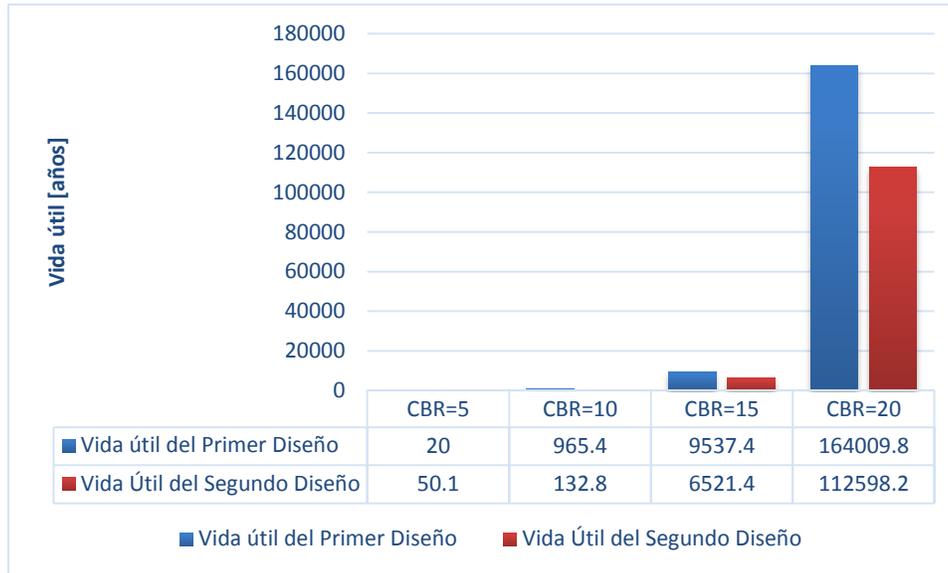


Fuente: Propia

La gráfica 3.11 muestra la vida útil que el programa calculó para los diseños antes presentados, de color azul se muestran las estructuras para las cuales deseábamos conseguir una vida útil de 20 años y de color rojo para las que se deseaba conseguir una vida de 50 años. Tal como se observa la vida útil calculada para las estructuras que pretendían tener vida útil de 50 años, es menor que la que pretendía tener 20, esto se debe a que los diseños resultaron ser los mismos para las estructuras con CBR de 10%, 15% y 20%, lo que se modifica es la combinación de tráfico, por lo que, al ser mayor la correspondiente a 50 años, nos da como resultado una vida útil menor, sin embargo, esto resulta ser poco importante al observar que los datos arrojados por el programa nos dan diseños con una duración bastante grande. Estos resultados no son del todo realistas pues la carpeta asfáltica con el tiempo sufrirá daños debidos al agua, exposición de rayos UV, temperatura, entre otros, lo cual inducirá una disminución de su resistencia. Lo anterior sugiere que para mantener el pavimento funcionando adecuadamente, deberán de realizarse mantenimientos periódicos en dicha capa y en todo caso se deberán realizar evaluaciones periódicas de la capacidad estructural del pavimento.



Gráfico 3.11 Vida útil calculada



Fuente: Propia

3.1.4 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO CONVENCIONAL

La estructura de pavimento rígido que se modela con FAARfield en esta sección tiene una losa de concreto, sobre la cual pasarán las ruedas de los aviones; una sub-base de agregados triturados y una capa subrasante a la cual subyace el terreno natural. Para poder realizar el modelo, la estructura se simula con las siguientes capas y espesores:

- ✚ Capa PCC Surface, con la cual se modela la losa de concreto, el espesor de la capa será el que el software de diseño asigne después de realizar el análisis necesario para ello.
- ✚ Capa P-209 Cr Ag, con esta capa se modela la sub-base de agregado triturado, el espesor de la capa debe ser un dato de entrada, es decir, el programa no realiza el cálculo de éste, en este caso se asignó un espesor de 20 cm.
- ✚ Capa Undefined, con la cual se modela la parte de la capa subrasante que debe ser mejorada, el espesor de esta capa se fijó inicialmente en 90 cm y el módulo en 200 MPa.

La estructura se analiza bajo el supuesto de que el suelo en el que se construirá corresponde a uno del tipo arcilloso de alta plasticidad, es decir, con un CBR de 5%. Ya



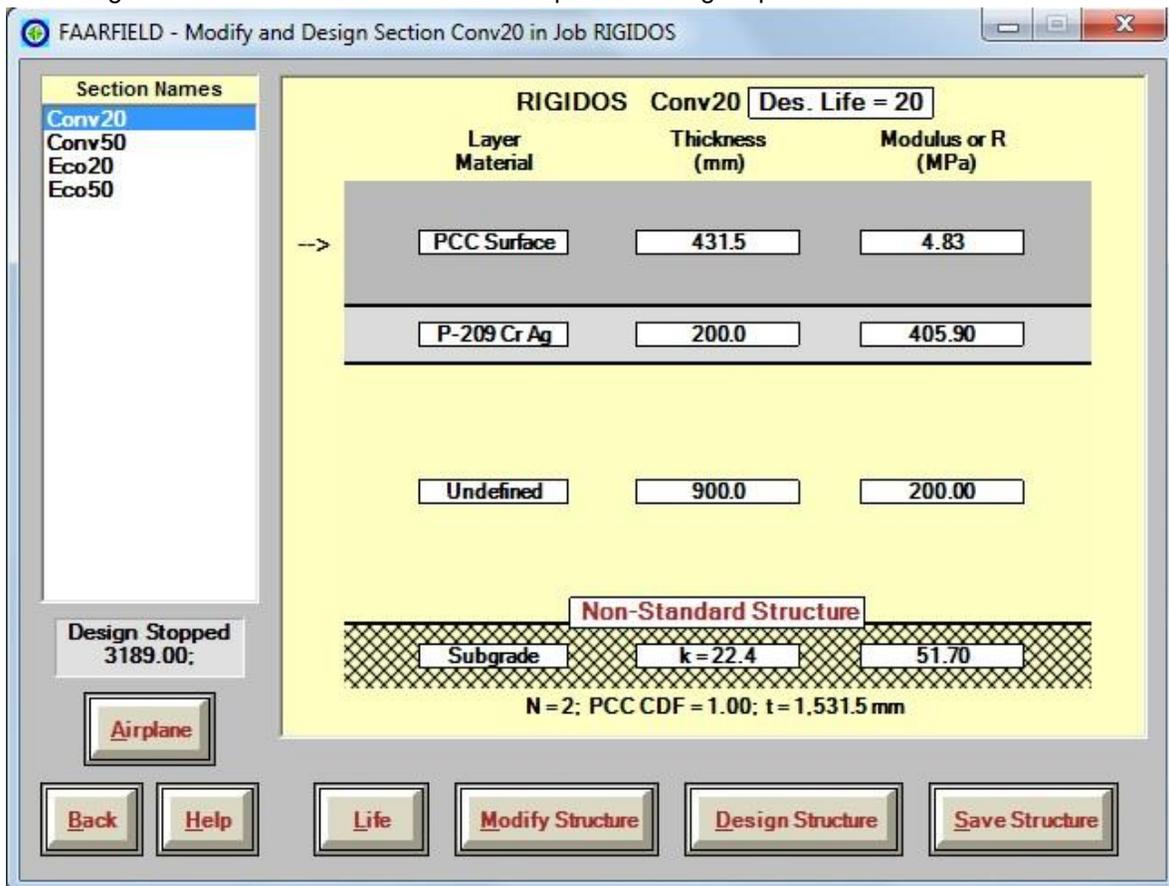
que el programa requiere como dato de entrada el módulo de reacción de la subrasante k y no se tienen datos sobre éste valor, la solución es utilizar el valor de CBR que se tiene y la expresión 2.17 mencionada con anterioridad mediante la cual se hace la conversión.

$$k = \left[\frac{1500 \times 5}{26} \right]^{0.7788} = 82.398 [pci]$$

Ya que hemos utilizado únicamente sistema métrico decimal, es necesario hacer la conversión de pci a KN/m^3 , resultando así un valor $k = 22.4 \text{ kN/m}^3$. Finalmente se fija la vida útil, en este caso, se siguen las recomendaciones de la FAA y se modela la estructura para que pueda estar en servicio durante 20 años.

En la Figura 3.38 se observan los espesores que deberá tener la estructura de pavimento rígido convencional. Cabe mencionar que los espesores de las capas sub-base y subrasante son fijados por el diseñador y el de la losa de concreto por el programa FAARfield.

Figura 3.38 Estructura convencional de pavimento rígido para una vida útil de 20 años



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 21 de Julio de 2014.



Para observar mejor la configuración de la estructura, se presenta la tabla 3.21, en la que se indican los nombres de las capas y los espesores que presenta cada una.

Tabla 3.21 Espesores de la estructura de pavimento rígido convencional para una vida útil de 20 años.

No.	Capa	Espesor [mm]	Módulo MPa	Relación de Poisson
1	PCC Surface	431.5	27,579.03	0.15
2	P-209 Cr Ag	200.0	405.90	0.35
3	Undefined	900.0	200.00	0.35
4	Subgrade	0.0	51.70	0.40

Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 21 de Julio de 2014.

Cabe señalar que el espesor total de la estructura resulta ser de 1.5315 m. La contribución de daño acumulativo que cada una de las aeronaves se presenta en la tabla 3.22, en ella se observa que la aeronave que mayor daño ocasiona a la estructura es la A321-100 std, esta no es la aeronave más pesada que posee la combinación de tráfico, sin embargo, es una de las que más salidas anuales tiene a lo largo de la vida útil, además la presión que ejercen sus ruedas es considerable.

Tabla 3.22 Contribución CDF de la combinación de tráfico

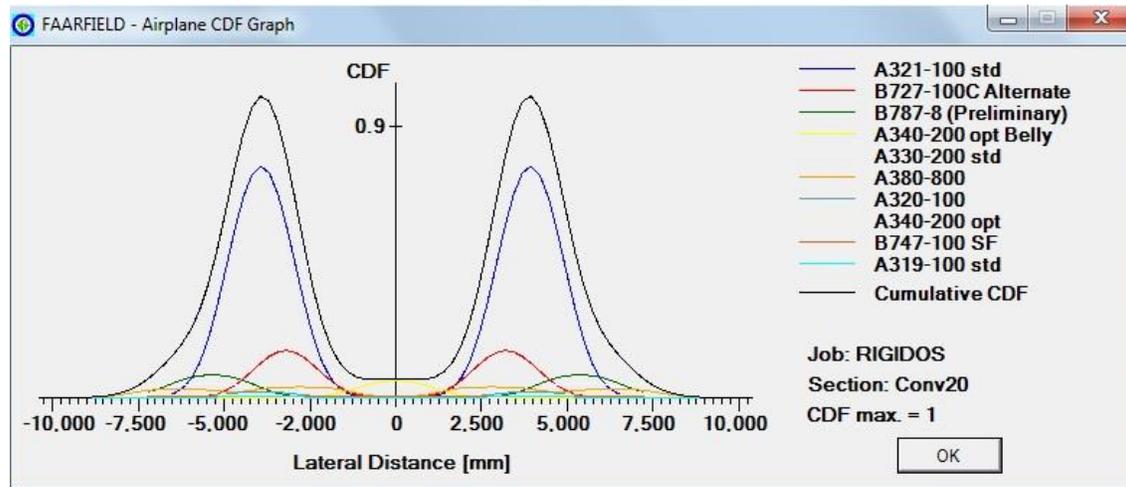
No.	Aeronave	Contribución CDF	CDF Max por Aeronave	Relación P/C
1	A318-100 std	0.00	0.00	3.64
2	A319-100 std	0.00	0.00	3.68
3	A320-100	0.02	0.02	3.84
4	A321-100 std	0.77	0.77	3.46
5	B737-100	0.00	0.00	3.76
6	B727-100C Alternate	0.11	0.16	3.22
7	Fokker F100	0.00	0.00	3.72
8	B757-200	0.00	0.00	3.90
9	B767-200	0.00	0.00	3.77
10	A300-B2 std	0.00	0.00	3.62
11	B767-300	0.00	0.00	3.69
12	B777-200 Baseline	0.00	0.00	4.18
13	B747-100 SF	0.00	0.01	4.07
14	B787-8 (Preliminary)	0.03	0.07	3.78
15	A330-200 std	0.02	0.05	1.88
16	A380-800	0.03	0.04	3.61
17	A340-200 opt	0.01	0.01	1.88
18	A340-200 opt Belly	0.00	0.05	2.97

Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 21 de Julio de 2014.



En la Figura 3.39 se observa la manera en la que las aeronaves generan el daño acumulativo en la subrasante de la estructura, es decir, muestra la magnitud del factor de daño acumulativo en relación con la distancia medida desde el centro del pavimento.

Figura 3.39 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido convencional para una vida útil de 20 años



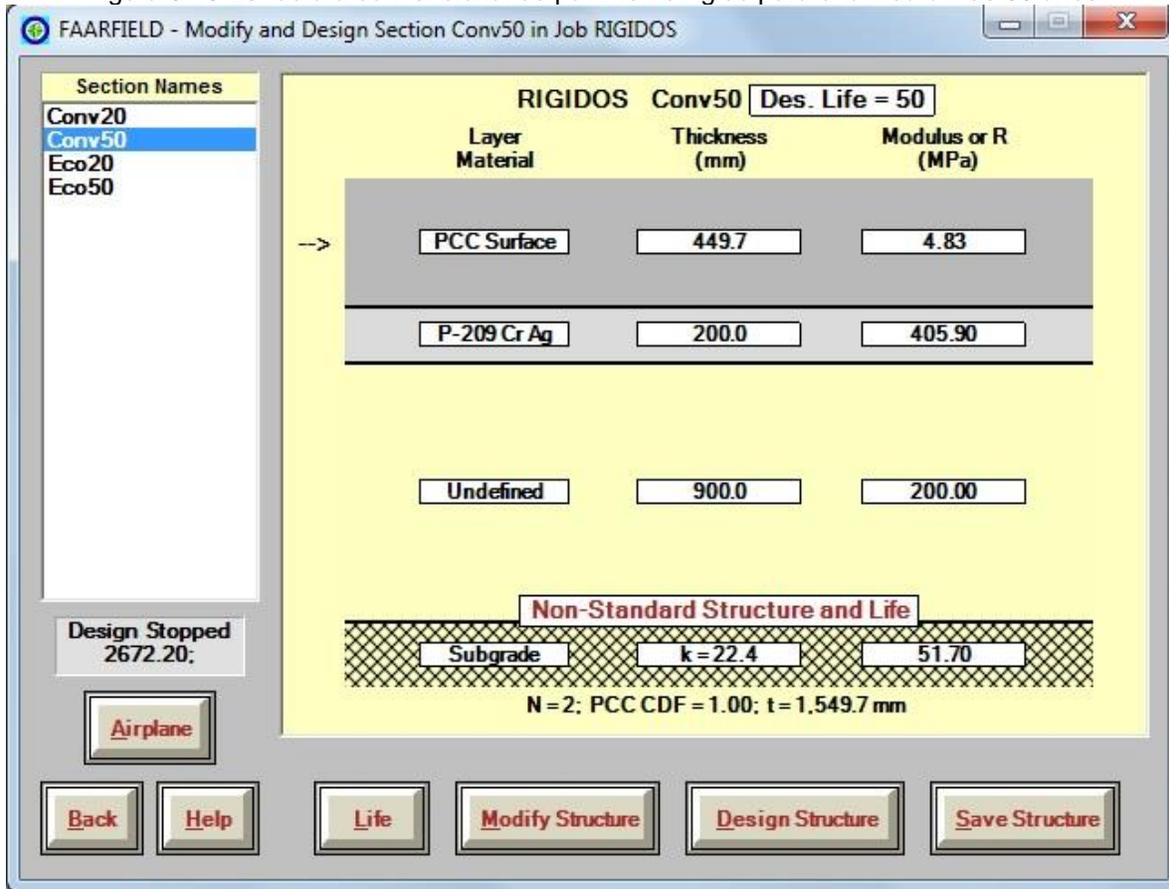
Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 21 de Julio de 2014.

Como en ejercicios anteriores, también se realizará el análisis para una vida útil de 50 años, como se ha mencionado, la FAA no garantiza que los resultados, obtenidos al realizar una desviación de la cantidad de años de servicio de la estructura, sean 100% confiables, sin embargo, se sabe que los resultados son aceptables.

La estructura es la misma que se acaba de analizar, únicamente cambia la cantidad de salidas anuales por cada aeronave, esta combinación se presenta en la tabla 3.18; el valor k sigue siendo el mismo (22.4 kN/m^3); el espesor asignado a las capas subyacentes a la losa de concreto siguen siendo 90 cm para la capa subrasante mejorada (Undefined) y 20 cm para la sub-base (P-209 Cr Ag). La Figura 3.40 muestra los resultados que FAARfield obtuvo.



Figura 3.40 Estructura convencional de pavimento rígido para una vida útil de 50 años



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 21 de Julio de 2014.

La tabla 3.23 muestra el resumen de los resultados obtenidos después del análisis de FAARfield, cabe mencionar que el espesor total de esta estructura es de 1.5497 m.

Tabla 3.23 Espesores de la estructura de pavimento rígido convencional para una vida útil de 50 años.

No.	Capa	Espesor mm	Módulo MPa	Relación de Poisson	Esfuerzo R, MPa
1	PCC Surface	449.7	27,579.03	0.15	4.83
2	P-209 Cr Ag	200.0	405.90	0.35	0.00
3	Undefined	900.0	200.00	0.35	0.00
4	Subgrade	0.0	51.70	0.40	0.00

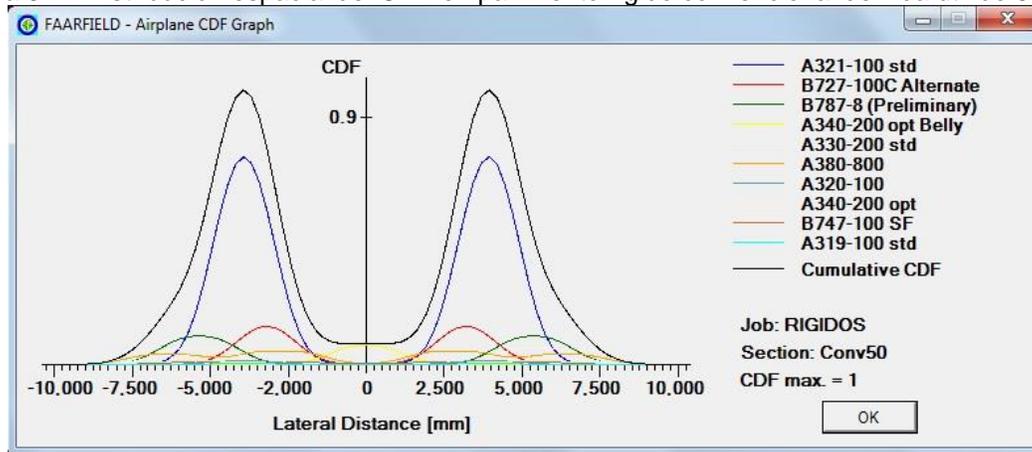
Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 21 de Julio de 2014

Comparando con la estructura que tiene una vida útil de 20 años, la disminución de espesor fue únicamente de 1.82 cm, parecería que es muy poco, sin embargo, al considerar toda la longitud y anchura de la pista, se trata de un volumen importante que traducido en dinero, resulta una suma importante. La figura que muestra la magnitud del daño acumulativo por



aeronave es muy similar a la anterior, el avión que más daño genera es el A321-100 std, tal como se observa en la figura 3.41.

Figura 3.41 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido convencional de vida útil de 50 años



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 21 de Julio de 2014.

3.1.5 VARIACIÓN DE CBR EN ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO

En este ejercicio se propone la siguiente estructura de pavimento rígido:

- Capa PCC Surface, con la cual se modela la losa de concreto, el espesor de la capa será el que el software de diseño asigne después de realizar el análisis necesario para ello.
- Capa P-209 Cr Ag, simula una capa sub-base de agregados a la que se le asigna un espesor de 20 cm.
- Capa Undefined, modela la parte de la subrasante que es mejorada cuyo espesor se fijó en 90 cm y el módulo en 200 MPa.

En este caso la capacidad portante del suelo se hace variar de acuerdo a los valores de CBR 5%, 10%, 15% y 20%, sin embargo, para poder llevar a cabo el análisis es necesario convertir los valores de CBR a módulo k, en la tabla 3.24 se observan los valores que se obtienen al realizar dicha conversión.



Tabla 3.24 Valores de k obtenidos a partir del valor CBR

CBR	k [pci]	[N/m ³]
5	82.40	22.4
10	141.37	38.4
15	193.86	52.6
20	242.55	65.8

Fuente: Propia

Una vez que se tiene estos valores y la estructura propuesta, se decide que la vida útil de diseño es de 20 años, tal como lo recomienda la FAA y enseguida se procede al diseño. La figura 3.42 muestra los 4 diseños realizados, cada uno con su valor k correspondiente, así mismo, en las figuras 3.43 a 3.46 se presenta la distribución espacial del factor de daño acumulativo y la longitud de la pista de cada uno de los diseños.

El gráfico 3.12 muestra el valor de los espesores obtenidos de acuerdo al valor de módulo k que se ha asignado, se observa, como se esperaba, que el espesor de la losa de concreto va disminuyendo conforme aumenta el valor de k, pues esto implica un aumento en la resistencia del suelo sobre el cual se apoya el pavimento.

La diferencia de espesores al variar el valor CBR no es tan grande, sin embargo, como se ha explicado con anterioridad, la reducción de unos cuantos centímetros en la losa de concreto se ve traducida en un gran ahorro durante la construcción. En cuanto al factor de daño acumulativo, se observa que el avión que más daño provoca en la estructura para los cuatro tipos de suelo es el A321-100 std. La presión en neumáticos de dicha aeronave y su peso no son los mayores de la combinación de tráfico, sin embargo, el número de salidas que este realiza a lo largo de los 20 años es significativo, por ello es que es el que genera un mayor daño acumulativo en la subrasante.



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS

Gabriela García Saldivar

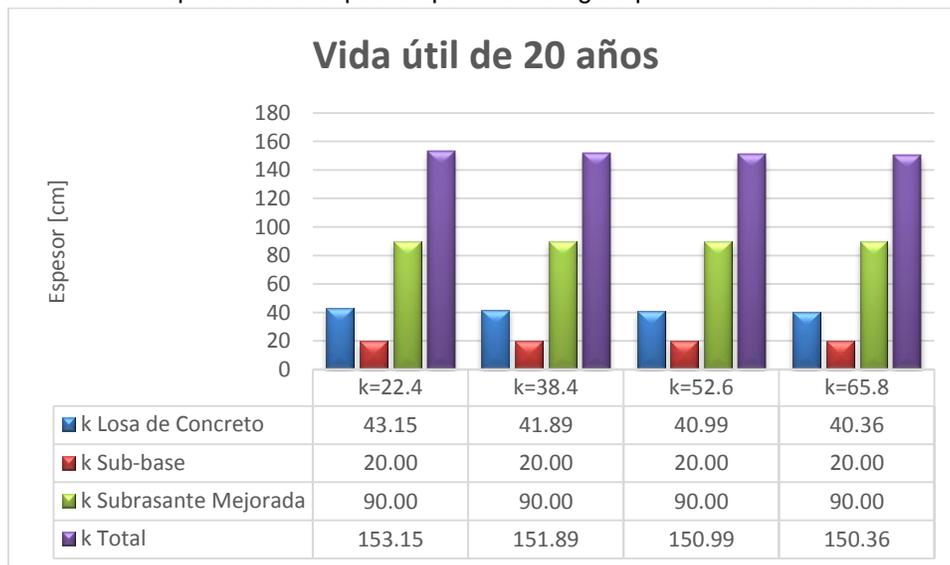


Figura 3.42 Estructura de Pavimento con vida útil de 20 años y k de 22.4 MN/m³ a 65.8 MN/m³



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014.

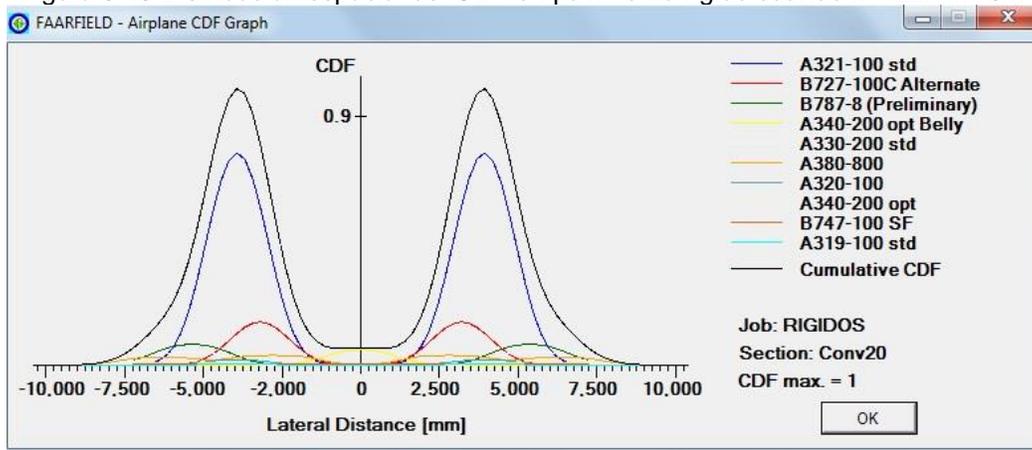
Gráfico 3.12 Espesores de capas en pavimento rígido para una vida útil de 20 años



Fuente: Propia

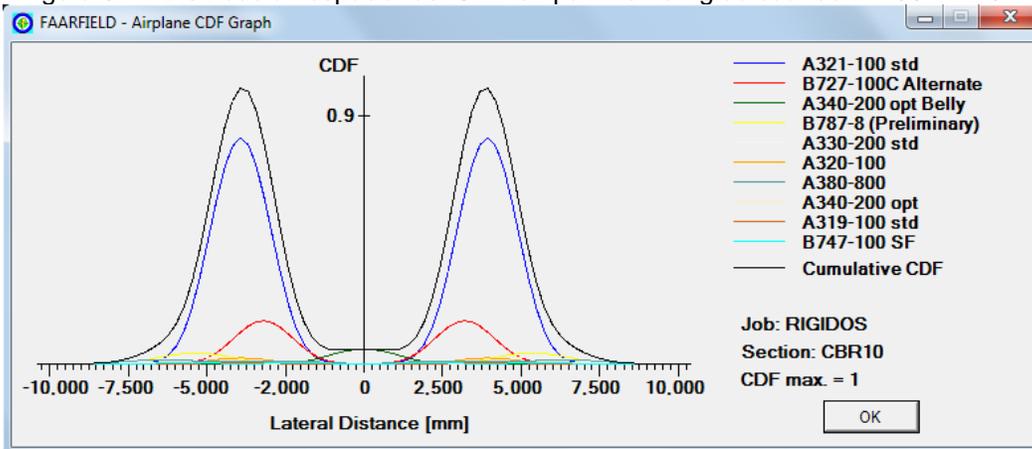


Figura 3.43 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando $k = 22.4 \text{ MN/m}^3$



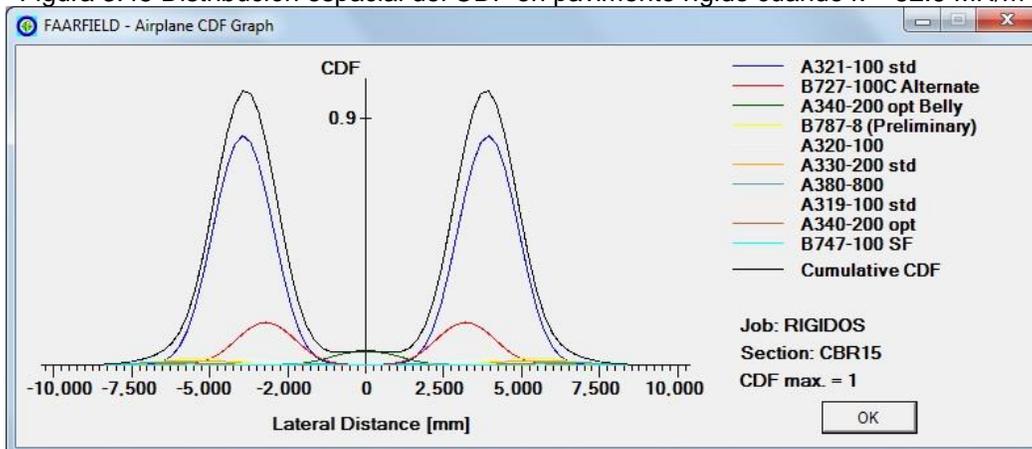
Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014

Figura 3.44 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando $k = 38.4 \text{ MN/m}^3$



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014

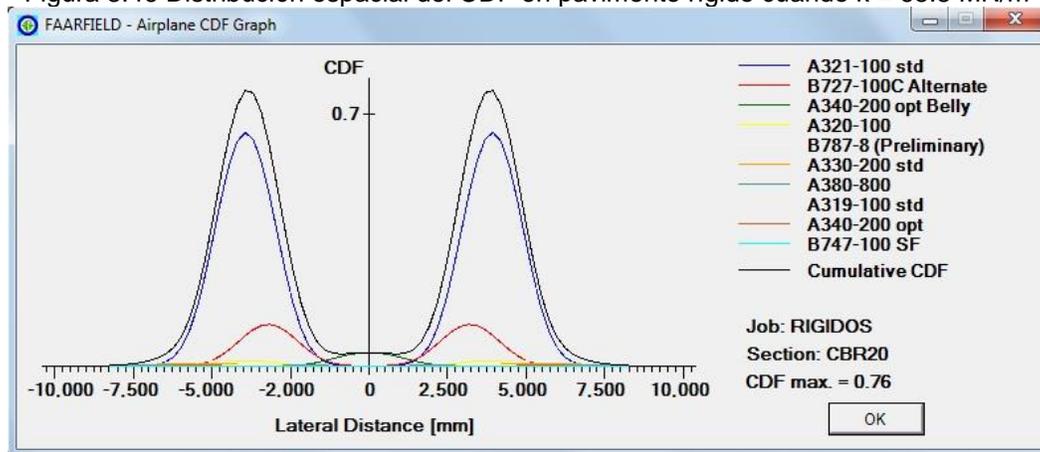
Figura 3.45 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando $k = 52.6 \text{ MN/m}^3$



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014



Figura 3.46 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando $k = 65.8 \text{ MN/m}^3$



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014.

Adicionalmente se llevó a cabo el mismo procedimiento de diseño de pavimentos rígidos, sin embargo, esta vez sin seguir los estándares que garantiza la FAA, la vida útil de diseño en esta ocasión es de 50 años, por lo que el número de salidas anuales cambia. Se espera que los espesores de la losa de concreto aumenten en relación con los ya presentados. La figura 3.47 muestra las 4 capturas de pantalla correspondientes a los 4 valores de k de la tabla 2.8, se observa que los espesores de la losa de concreto si aumentan en relación con la estructura de 20 años, así mismo, se observa que conforme se aumenta el valor de k , los espesores de la losa de concreto van reduciéndose aunque la diferencia entre ellos no es muy grande. En las figuras 3.48 a 3.51 se observan los gráficos de CDF que el programa calcula, en ellos podemos observar que la aeronave que mayor daño acumulativo provoca en la estructura es nuevamente la A321-100 std, las razones son las mismas que se han mencionado ya. El gráfico 3.13 muestra el espesor de cada una de las capas dependiendo del valor de k que se tiene.



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS

Gabriela García Saldivar

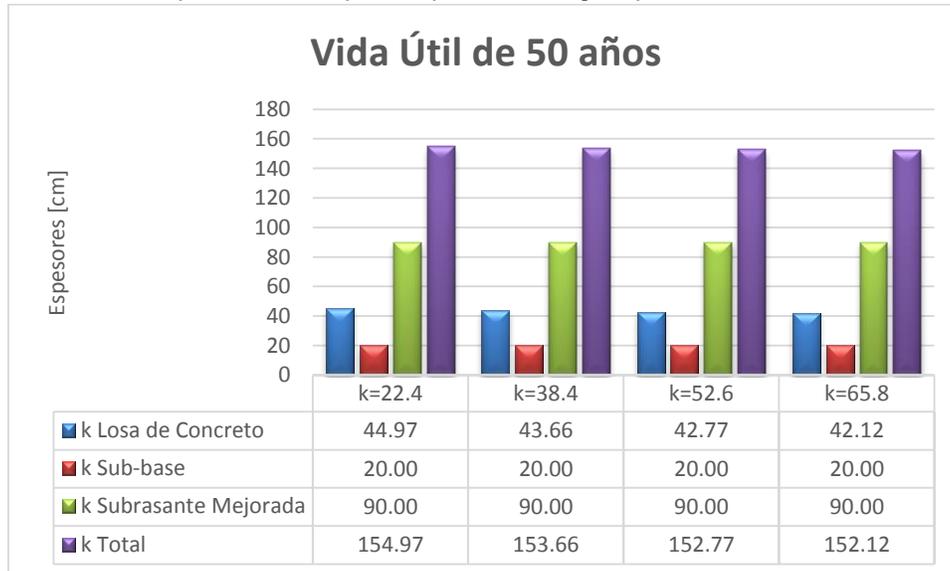


Figura 3.47 Estructura de pavimento para una vida útil de 50 años y k de 22.4 MN/m³ a 65.8 MN/m³



Fuente: Programa FAArfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014

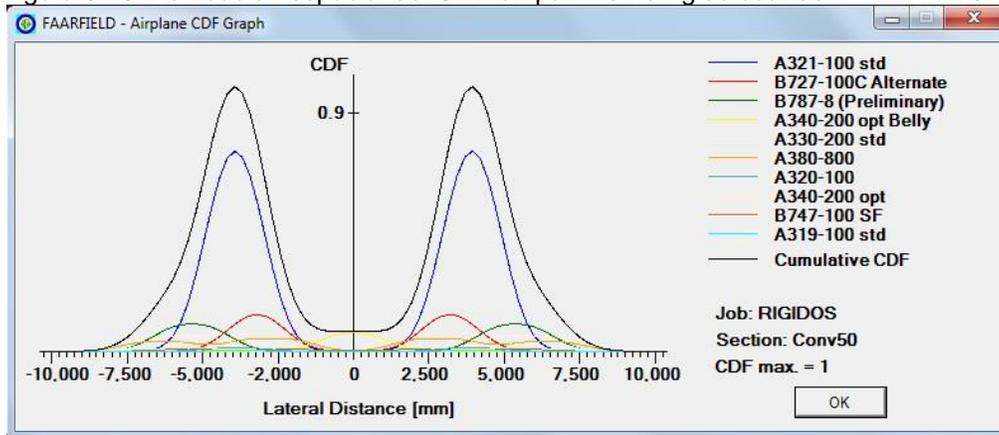
Gráfico 3.13 Espesores de capas en pavimento rígido para una vida útil de 50 años



Fuente: Propia

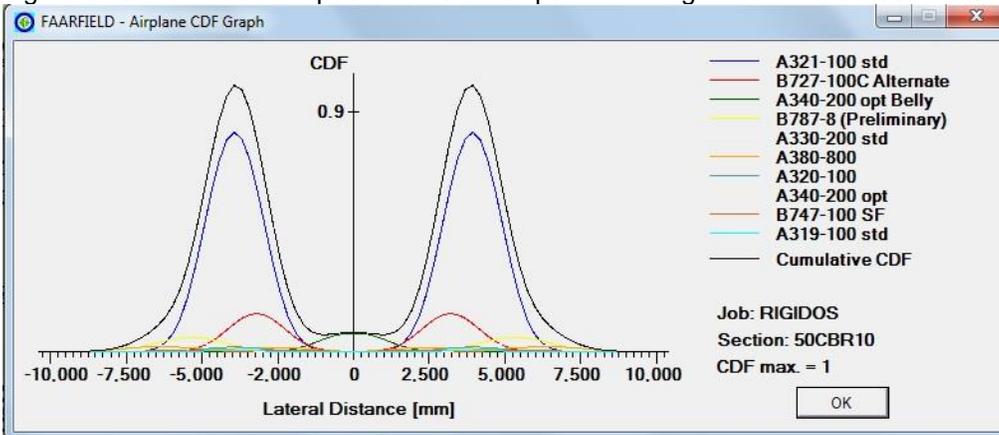


Figura 3.48 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando $k = 22.4 \text{ MN/m}^3$



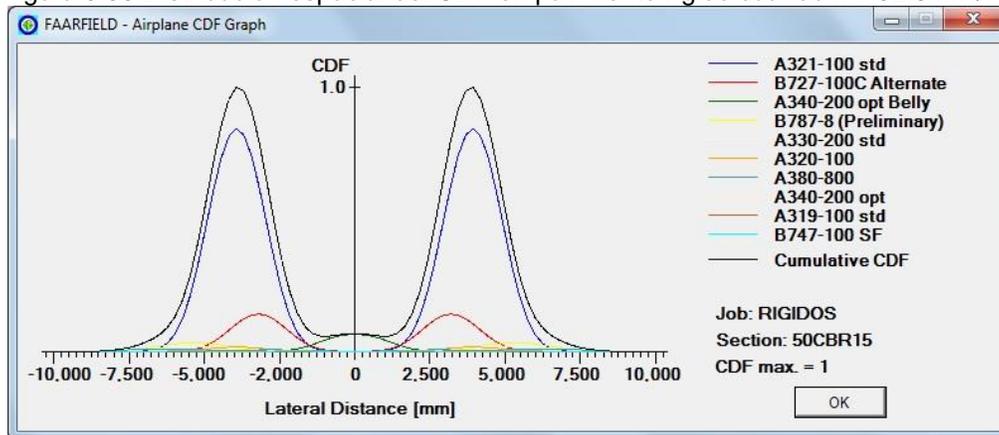
Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014

Figura 3.49 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando $k = 38.4 \text{ MN/m}^3$



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014

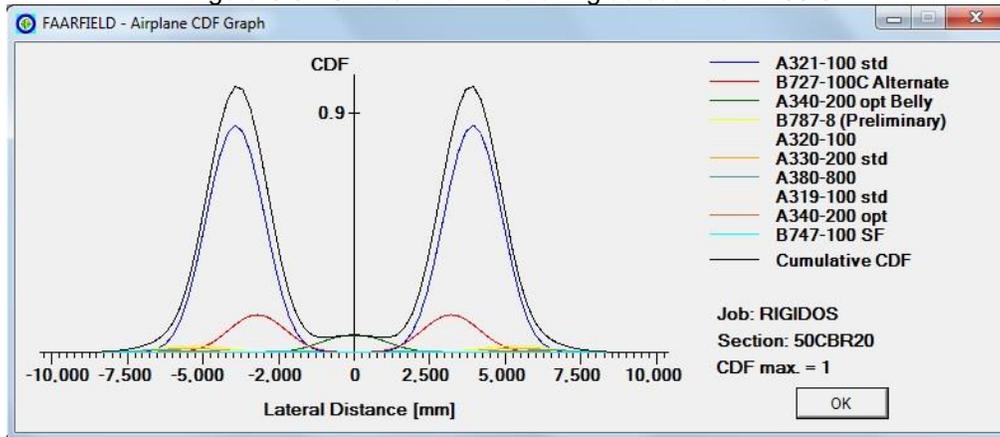
Figura 3.50 Distribución espacial del CDF en pavimento rígido cuando $k = 52.6 \text{ MN/m}^3$





Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014

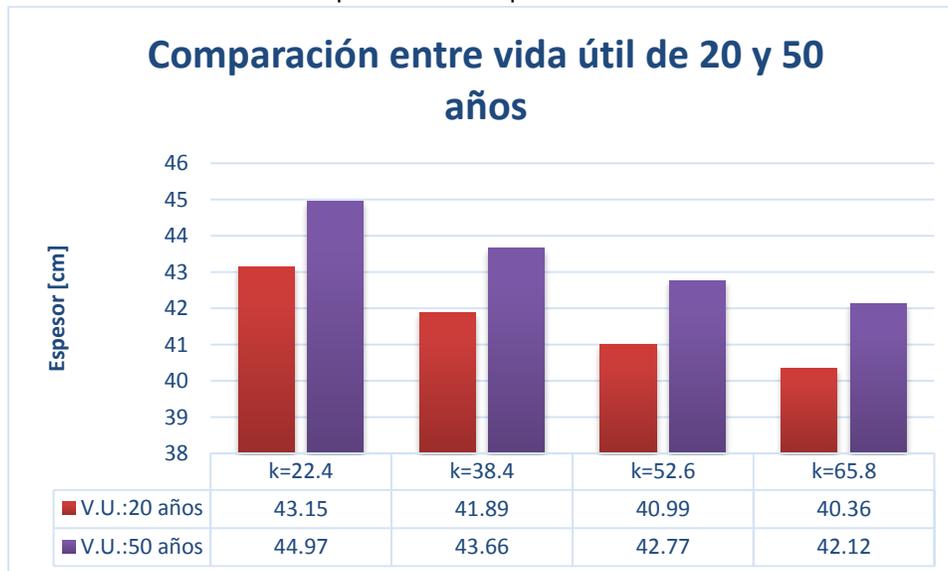
Figura 3.51 CDF en Pavimento Rígido cuando k = 65.8



Fuente: Programa FAARfield, Diseño realizado el 22 de Julio de 2014

Una vez realizados los 8 análisis y comparando los espesores de las capas, se obtuvo el gráfico 3.14, en este se observa el aumento del espesor que experimenta la losa al ser expuesta a una combinación de tráfico mayor, así mismo se observa la disminución de su espesor al ser colocada en un terreno de mayor calidad. Todos los espesores de la losa que dará servicio durante 50 años resultan ser aproximadamente un 4% mayores que los de la losa que estará en operación durante 20 años, esta condición se presenta para todos los valores de k evaluados.

Gráfico 3.14 Comparación de espesores de losa de concreto



Fuente: Propia



4. NÚMERO DE CLASIFICACIÓN DE AERONAVES Y NÚMERO DE CLASIFICACIÓN DE PAVIMENTOS

El método Número de Clasificación de Aeronaves (ACN) – Número de Clasificación de Pavimentos (PCN) se utiliza para determinar la resistencia de una estructura de pavimento de pistas, plataformas y calles de rodaje de aeropuertos siempre y cuando den servicio a aeronaves de masa superior a los 5,700 kg. Es muy importante resaltar que la única finalidad de este método es la difusión de los datos de resistencia de los pavimentos en las publicaciones de información aeronáutica, nunca se debe tomar como un método de diseño.

Cuando se utiliza este método se puede determinar el efecto que una aeronave en particular en diversas estructuras de pavimentos a través de un único número (ACN), el cual depende del peso y configuración de la aeronave, el tipo de pavimento y la resistencia del terreno de fundación. Al ACN se le puede definir como el número que expresa el efecto relativo que una aeronave de configuración dada ocasiona en una estructura de pavimento dependiendo de la resistencia que posea la subrasante.

Por otro lado, cuando se habla de PCN se refiere al número que expresa la capacidad de carga que un pavimento posee sin restricciones, la obtención de este valor no requiere de información específica de las aeronaves ni información detallada del pavimento.

Entonces se busca que el valor de PCN siempre sea mayor o igual al valor de ACN para que no exista ningún tipo de limitación en el uso de la estructura, en caso contrario se podrá utilizar el pavimento a partir de ciertas restricciones, las cuales consisten en permitir que la aeronave de ACN mayor al PCN ocupe la estructura únicamente un número limitado de veces a lo largo de la vida útil de la misma.

La escala utilizada por el método tiene como límite inferior al cero y no existe límite superior, esto aplica tanto para el número de clasificación de aeronaves como para el de pavimentos; además se trata de una escala continua.

Cuando exista una sobrecarga ocasional en la estructura de pavimento, por el motivo que sea, esta puede considerarse de poca importancia e incluso aceptarse, pues en ocasiones éstas provocan una pequeña reducción en la vida útil del pavimento así como un deterioro



poco acelerado, dependiendo de la frecuencia o la magnitud de la sobrecarga, para ello se sugiere seguir las siguientes recomendaciones:

- ✚ Si se trata de un pavimento flexible, se considera que los pases de aeronaves cuyo ACN no exceda el 10% del valor de PCN asignado a la estructura son poco perjudiciales, siempre y cuando sean pases ocasionales.
- ✚ En el caso de estructuras de pavimento rígido o compuestos en las que la capa de cemento Portland es el elemento primordial, se recomienda que el ACN exceda el valor de PCN únicamente en un 5% para que los daños ocasionados no sean perjudiciales.
- ✚ En caso de conocer el valor de PCN gracias a los registros del aeródromo pero no conocer a detalle las capas que componen el pavimento, se limita que el ACN sea superior hasta un 5% y no más.
- ✚ El número de movimientos anuales de la sobrecarga no deberá exceder el 5% de los movimientos totales anuales de la aeronave.

Aun siguiendo las recomendaciones anteriores, se debe observar la aparición de cualquier daño o desperfecto que pudiera sufrir el pavimento, pues en caso de que se presente alguno, se deberán suspender estas sobrecargas porque pudieran representar un peligro importante para la correcta operación de la estructura.

El valor ACN en pavimentos rígidos difiere del obtenido en flexibles, esto se debe a que cada uno utiliza parámetros diferentes para su determinación. A partir de dichos parámetros se deriva -de manera matemática- la carga de rueda simple con la cual se realizan análisis de interacción entre el tren de aterrizaje y el pavimento. En este análisis se supone que el esfuerzo que ocasiona la carga de rueda es igual en toda la estructura por ello es que no es necesario especificar el espesor del pavimento. Cabe mencionar que la presión de la rueda simple corresponde a un valor estandarizado de 1.25 MPaa.

De manera numérica se puede definir al ACN como el doble de la carga derivada de rueda simple expresada en miles de kilogramos; el tipo de terreno de fundación resulta ser un factor muy importante a la hora de obtener el ACN ya que la carga derivada de rueda simple es función de este.



Como se ha mencionado anteriormente, las aeronaves pueden operar con diversas combinaciones de tren de carga sobre los pavimentos de las diferentes estructuras de un aeropuerto. Por ello, la OACI desde hace varias décadas adoptó un procedimiento estandarizado para la determinación del ACN el cual consiste en elegir el máximo ACN calculado a partir de las características de peso y centro de gravedad de cada aeronave. Cabe mencionar que el cálculo del ACN de cada aeronave toma en cuenta la presión de los neumáticos recomendada por los fabricantes y se basa en una frecuencia de 100,000 coberturas de la aeronave.

4.1 OBTENCIÓN DE ACN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

En el caso de las estructuras de tipo flexible, existe una expresión matemática que ayuda a determinar el valor de carga derivada de rueda simple de una aeronave, con la cual la obtención del valor ACN es muy sencillo, la expresión es la siguiente:

$$t = \sqrt{\frac{DSWL}{C_1 CBR} - \frac{DSWL}{C_2 P_s}} \dots(4.1)$$

Donde:

t: espesor de referencia para la masa de la aeronave analizada (valor proporcionado por el fabricante)

DSWL: Carga derivada de rueda simple

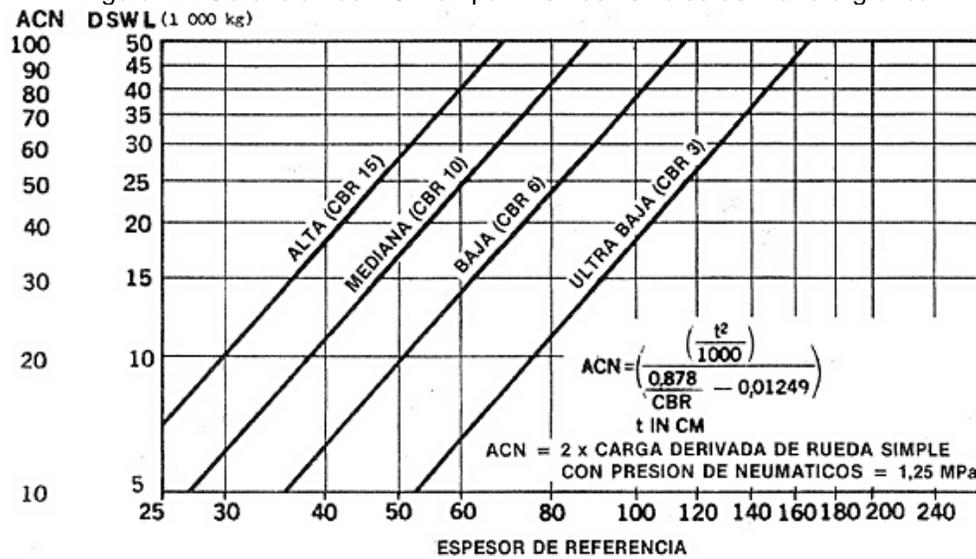
CBR: Valores estándar para la clasificación de suelo (2, 6, 10 y 15)

$C_1 = 0.5695$; $C_2 = 32.035$ (constantes empíricas)

A partir de esta ecuación fue posible la construcción del gráfico mostrado en la Figura 4.1, la cual se utiliza para obtener de manera más sencilla el valor ACN, del mismo modo que la expresión matemática, requiere de la ayuda de los gráficos proporcionados por el fabricante para conocer el espesor de referencia de la masa de la aeronave que es el valor con el que se entra al gráfico.



Figura 4.1 Obtención de ACN en pavimentos flexibles de manera gráfica



Fuente: OACI, Doc. 9157 parte 3 Pavimentos, p.3-11

El primer paso para el uso del gráfico consiste en obtener el espesor de referencia en los gráficos que el fabricante de la aeronave proporciona a partir de la masa de la misma, el terreno de fundación y siempre considerando 10,000 coberturas.

Una vez teniendo este valor, se busca en el eje de las abscisas de la Figura 4.1 y se traza una línea vertical; enseguida se busca la intersección de dicha línea con aquella que nos indica la categoría del terreno pues en ese punto se traza una línea horizontal que al cortar al eje de las ordenadas nos indicará el valor de carga derivada de rueda simple y el valor ACN buscado.

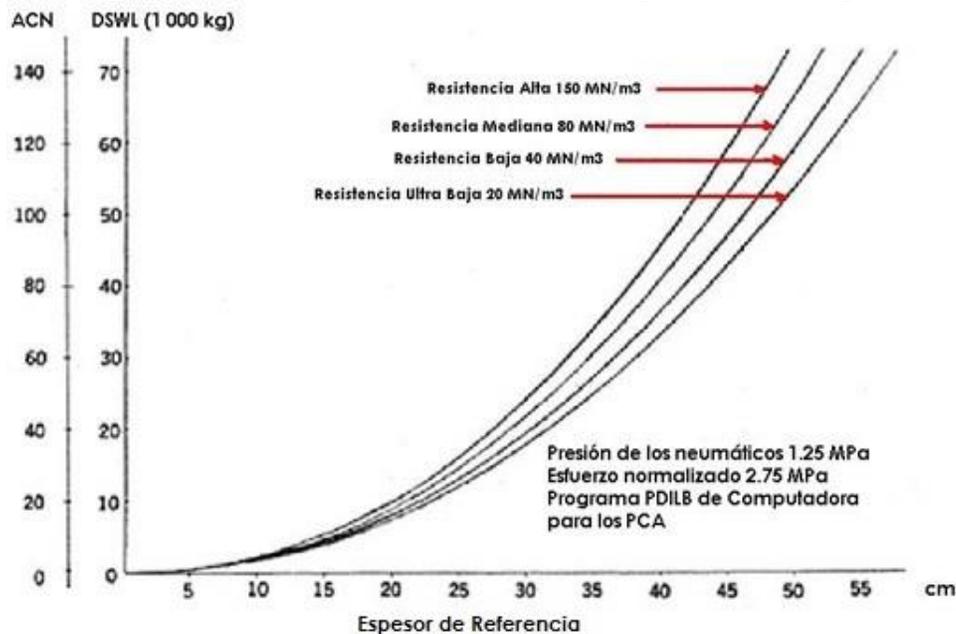
4.2 OBTENCIÓN DE ACN EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

El procedimiento a seguir en el caso de estructuras con losa de concreto es el mismo que en el caso de flexibles, sin embargo, para determinar la categoría del terreno se utilizan los valores estándar del módulo de reacción de la subrasante k en lugar de los de CBR.

La Figura 4.2 fue construida mediante el uso de un programa elaborado por la Portland Cement Association y la ayuda de los gráficos que proveen los fabricantes, así mismo, se consideró un esfuerzo normalizado para el concreto de 2.75 MPa.



Figura 4.2 Obtención de ACN en pavimentos rígidos de manera gráfica



Fuente: OACI, Doc. 9157 parte 3 Pavimentos, p. 3-9

EL procedimiento para el uso del gráfico es el mismo que para la de la figura 4.1, se entra en el eje de las abscisas con el valor de espesor de referencia, se traza una línea vertical que deberá cortar a la curva que indica el tipo de terreno que se posee, en el punto de corte se traza una línea horizontal que al intersecar con el eje de las ordenadas indicará el valor de carga derivado de rueda simple así como el valor ACN buscado.

4.3 USO DE COMFAA

El Método ACN-PCN es el que la OACI establece para medir, de manera relativa, la resistencia de las estructuras de pavimento, por ello, se han desarrollado gráficos y nomogramas que, utilizando los datos establecidos por los fabricantes de aeronaves, ayudan a determinar el ACN de las mismas; además se han desarrollado programas de cómputo con librerías internas que tienen precargados los datos más importantes de las aeronaves y que tienen la finalidad de obtener los valores ACN y PCN de manera más sencilla, algunos de ellos desarrollados por la Portland Cement Association e incluso algunos son mencionados en el documento 9157 parte 3 de la OACI.

La FAA también ha desarrollado un software que determina los valores de ACN y PCN, este se conoce como COMFAA, la metodología que este sigue para obtener el ACN es la



establecida en el apéndice 2 de la Parte 3 del Manual de Diseño de Aeródromos publicado por la OACI. Este programa puede operar en modo ACN y modo Espesor de Pavimentos, para el primer caso, el software calcula el valor ACN en pavimentos flexibles y rígidos, además calcula un espesor de pavimentos para valores definidos de CBR (3, 6, 10 y 15) y de k (150, 80, 40 y 20 MN/m³) que la OACI utiliza en condiciones específicas del método. Es importante mencionar que los espesores obtenidos en este caso no pueden utilizarse para el diseño de la estructura, es mejor utilizar los obtenidos en FAARfield.

Para la obtención de PCN se conocen dos métodos “Uso de aeronaves” y “Evaluación Técnica”, los valores de ambos pueden ser obtenidos mediante el software COMFFA a partir de los datos de combinación de tráfico y las características del suelo que se posee.

4.3.1 MÉTODO DE USO DE AERONAVE

Este procedimiento consiste en obtener cada uno de los valores de ACN de las aeronaves pertenecientes a la combinación de tráfico y, de acuerdo al tipo de suelo que se tiene, elegir el mayor como el valor de PCN de la estructura, es el método más sencillo y asume que todas las aeronaves pueden hacer uso del pavimento sin restricción.

En ocasiones se puede subestimar la capacidad de la estructura si se incluye en la determinación del PCN una aeronave excesivamente perjudicial pero con baja frecuencia de operación. Adicionalmente, este método puede subestimar la capacidad estructural del pavimento, por ello es muy importante determinar qué aeronaves serán de uso regular en el aeropuerto, es decir, cuáles efectuarán más de 1,000 coberturas sobre la estructura a lo largo de su vida útil y considerarlas en el análisis, así se asegura el uso correcto del método “Uso de aeronaves”.

4.3.2 MÉTODO DE EVALUACIÓN TÉCNICA

El método de “Evaluación Técnica” requiere de ciertos datos para poder llevarse a cabo tales como la combinación de tráfico y los datos de cada una de las aeronaves, frecuencia de operación y las condiciones del suelo de cimentación. Este método es más confiable que el de “uso de aeronaves” sin embargo, sólo es una guía, no se debe tomar como un resultado absoluto. Al hacer uso de este método puede ocurrir que haya aeronaves con ACN mayor al PCN obtenido, en este caso se habla de limitaciones de uso, esto significa



que la estructura de pavimento puede resistir únicamente cierto número de pases al año de las aeronaves que resulten tener un valor de ACN muy grande o, en casos muy desfavorables, que el pavimento no pueda dar servicio a estas.

Para este método se tienen que obtener ciertos valores a partir de los cuales se comienza a procesar la información, uno de ellos es el espesor equivalente, este se obtiene únicamente cuando se trata de una estructura de tipo flexible pues debido a la gran variedad de combinaciones de capas que se pueden colocar entre la subrasante y la carpeta asfáltica y a los diferentes módulos de los materiales utilizados, resulta más cómodo transformar las estructuras existentes a estructuras convencionales establecidas por la FAA.

Existen dos tipos de estructuras de pavimentos convencionales, la elección entre una y otra dependerá del número de ruedas que se tienen en el tren de aterrizaje principal de las aeronaves de la combinación de tráfico, es decir, cuando el número de ruedas en el tren es menor a 4, entonces se establece que la estructura convencional estará compuesta por una capa asfáltica de tipo P-401/P-403 de 3 pulgadas de espesor, una capa base de tipo P-209 con espesor de 6 pulgadas y una capa sub-base de tipo P-154 cuyo espesor estará determinado por la configuración de la estructura a analizar. Cuando el tren de aterrizaje tiene 4 ruedas o más los espesores cambian a 5 pulgadas para P-401/P-403 y a 8 pulgadas para P-209.

Cuando la estructura existente posee espesores mayores que las especificadas con anterioridad será necesario que los excesos sean convertidos a un espesor correspondiente a la capa de calidad inmediatamente menor mediante el uso de los factores establecidos en la tabla 4.1, para que, de ese modo, se pueda obtener la estructura convencional que podrá ser utilizada para la obtención del valor PCN. En caso de que la estructura posea espesores menores a los ya mencionados, será necesario convertir las capas de menor calidad en una de mayor utilizando el recíproco de los mismos factores de la tabla 4.1.

De este modo se tiene que, para estructuras con capas que exceden los valores recomendados, el espesor de la estructura convencional resultante será mayor que el espesor de la estructura analizada y, para los pavimentos con capas de menor espesor que los establecidos, el espesor de estructura convencional será menor que el analizado.



Tabla 4.1 Factores de conversión para pavimento convencional

Capa	Rango para convertir a P-209	Recomendado para P-209	Rango para convertir a P-154	Recomendado para P-154
P-501	-	-	-	-
P-401	1.2 a 1.6	1.6	1.7 a 2.3	2.3
P-403	1.2 a 1.6	1.6	1.7 a 2.3	2.3
P-306	1.2 a 1.6	1.2	1.7 a 2.3	1.6
P-304	1.2 a 1.6	1.2	1.7 a 2.3	1.6
P-212	-	-	-	-
P-213	-	-	-	-
P-220	-	-	-	-
P-209	1.0	1.0	1.2 a 1.6	1.4
P-208	1.0	1.0	1.0 a 1.5	1.2
P-211	1.0	1.0	1.0 a 1.5	1.2
P-301	n/a	-	1.0 a 1.5	1.2
P-154	n/a	-	1.0	1.0
P-501	Rango para convertir a P-401 2.2 a 2.5, se recomienda 2.5			

Fuente: FAA, Advisory Circular 150/5335-5C Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength-PCN, 2014, p. B-2

Para el caso de pavimentos rígidos se busca un módulo de reacción de subrasante k equivalente, el cual englobe los módulos k de las capas que se encuentran entre la subrasante y la losa de concreto, esto para evitar mencionar cada una de las capas de la estructura con su respectivo módulo; para ajustar el valor del módulo de reacción k se utilizan las gráficas que se encuentran en el apéndice B de la AC150/5335-5C.

Otro concepto importante en el método de evaluación técnica es la relación Pases por Ciclo de Tráfico (P/TC), el cual se define a partir de las prácticas de carga de combustible de las aeronaves y de la configuración que posea la pista de aterrizaje respecto a las calles de rodaje, es decir, si la pista cuenta únicamente con una calle de rodaje central o con dos calles de rodaje paralelas ubicadas en los extremos de la pista.

La figura 4.3 muestra cómo se realizarían las maniobras de aterrizaje y despegue dependiendo de la configuración geométrica de la pista respecto de las calles de rodaje, por lo que se enumeran las siguientes opciones para el valor P/TC:

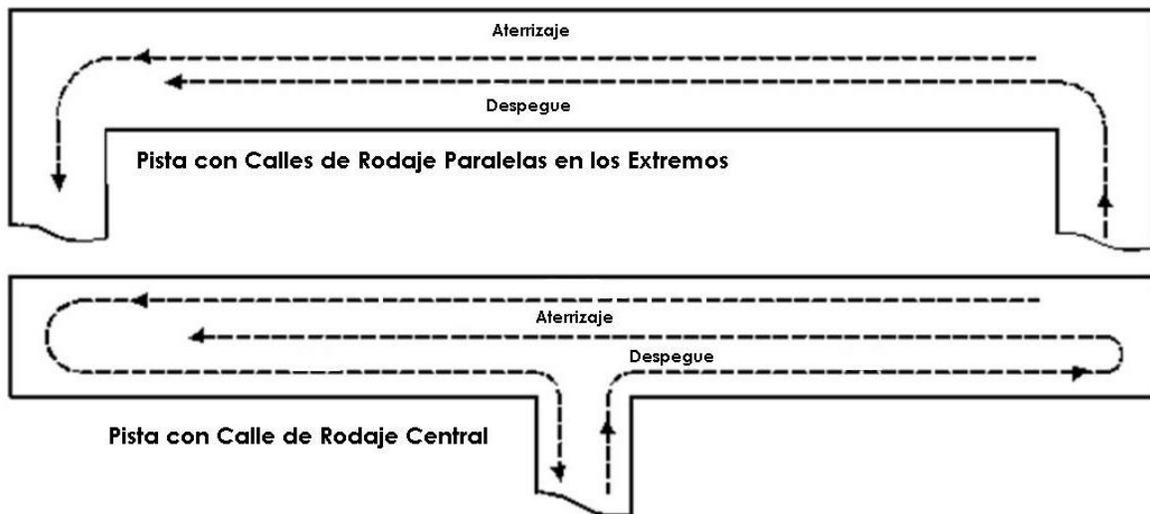
- ✚ Pista con calles de rodaje paralelas en los extremos: El ciclo de tráfico consiste en un solo paso ya que la carga de la aeronave al momento del despegue es mucho



mayor que cuando aterriza, es por ello que el pase que realiza al aterrizar es despreciado y la relación de Pases por Ciclo de Tráfico equivale a la unidad ($P/TC=1$).

- ✚ Pista con calle de rodaje central: En este caso también es despreciado el aterrizaje, sin embargo, la existencia de una pista con calle de rodaje al centro obliga a la aeronave a transitar dos veces por la pista tal como se indica en la figura 4.3, por tal motivo la relación de Pases por Ciclo de Tráfico equivale a dos ($P/TC=2$).

Figura 4.3 Configuración de la pista de aterrizaje respecto a las calles de rodaje



Fuente: http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/draft_150_5335_5c.pdf.
Consulta: 09 de Octubre de 2014

Una vez que se ha hecho la equivalencia de espesores reales a convencionales, que se cuenta con la relación P/TC , número de salidas anuales, características de la aeronave y del tren de aterrizaje, es posible obtener el valor de PCN de las estructuras analizadas; a continuación se enumeran los pasos a seguir para obtener dicho valor a partir del Método de Evaluación Técnica haciendo uso del Software COMFAA que provee la FAA:

- ✚ Reunir todos los datos relacionados con las aeronaves que forman parte de la combinación de tráfico, es decir, el peso operacional de las aeronaves, tipo de tren de aterrizaje, presión de neumáticos, salidas anuales, relación paso por ciclo de tráfico P/TC e introducir estos valores en la librería externa del programa



- ✚ Conocer la configuración de la pista de aterrizaje con las calles de rodaje, es decir, si se trata de una pista con calle de rodaje central o calles de rodaje laterales, a fin de elegir de manera adecuada la relación P/TC.
- ✚ Determinar el valor de CBR que posee el terreno sobre el cual se fundará la estructura a analizar.
- ✚ A partir de los factores de conversión, determinar el espesor de la estructura equivalente convencional que se utilizará para introducir en el programa COMFAA.
- ✚ Una vez que se introducen los datos de CBR del suelo de cimentación de la estructura del pavimento y del espesor de la estructura equivalente en COMFAA, dicho programa calcula los pesos máximos permisibles para cada aeronave, las coberturas equivalentes, espesor requerido para el total de coberturas equivalentes, espesor requerido de acuerdo al ACN obtenido, CDF y los valores ACN.
- ✚ Finalmente se elige el valor ACN de mayor valor como el valor PCN de la estructura, siempre y cuando el valor elegido pertenezca a una aeronave de uso regular, es decir, que tenga un mínimo de 1,000 coberturas.

Cualquiera que sea el método que se utilice para la obtención del PCN (Uso de Aeronaves o Evaluación Técnica), este número se presenta como una combinación del valor numérico que hace referencia a la resistencia de la estructura y cuatro códigos más que nos indican lo siguiente:

- ✚ Tipo de pavimento: Rígido (R) o Flexible (F)
- ✚ Resistencia de la subrasante: El método ACN-PCN adopta cuatro niveles estándar de resistencia de la capa sobre la cual se apoya la estructura del pavimento, para pavimentos rígidos y cuatro más para pavimentos flexibles. Dichos niveles se indican en las Tablas 4.2 y 4.3.



Tabla 4.2 Niveles estándar de resistencia de la subrasante para pavimentos flexibles

Resistencia de la subrasante (Capa de apoyo del pavimento)	CBR de la subrasante (%)	Características del suelo	Código
Alta	15	$CBR \geq 13$	A
Media	10	$8 < CBR < 13$	B
Baja	6	$4 < CBR \leq 8$	C
Ultra Baja	3	$CBR \leq 4$	D

Fuente: http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/draft_150_5335_5c.pdf.

Consulta: 09 de Octubre de 2014

Tabla 4.3 Niveles estándar de resistencia de la subrasante para pavimentos rígidos

Resistencia de la subrasante (Capa de apoyo del pavimento)	Módulo de reacción de la subrasante, k (MN/m ³)	Características del suelo	Código
Alta	150	$k \geq 120$	A
Media	80	$60 < k < 120$	B
Baja	40	$25 < k \leq 60$	C
Ultra Baja	20	$k \leq 25$	D

Fuente: http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/draft_150_5335_5c.pdf.

Consulta: 09 de Octubre de 2014

- ✚ Presión de la rueda del avión: La cual puede variar de baja a ilimitada, tal como se describe en la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Categorías de presión de las ruedas de la aeronave

Categoría	Código	Rango de presión en la llanta del avión (MPa)
Ilimitada	W	Sin límite de presión
Alta	X	Limitada a 1.75 MPa
Medía	Y	Limitada a 1.25 MPa
kBaja	Z	Limitada a 0.50 MPa

Fuente: http://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/draft_150_5335_5c.pdf.

Consulta: 09 de Octubre de 2014

Tal como lo indica la FAA en su circular AC 150/5335-5C, por lo general los pavimentos rígidos pueden ser catalogados como estructuras con presiones de llanta admisibles ilimitadas (código W), debido a que este tipo de estructuras son lo



suficientemente fuertes como para resistir presiones mayores a las inducidas por las llantas de las aeronaves comerciales.

Para el caso de flexibles, la presión de las llantas puede ser restringida en función de la calidad del concreto asfáltico y de las condiciones climáticas donde se emplace el aeropuerto. La experiencia recopilada por la FAA indica que las capas asfálticas con características similares a las de los materiales tipo P-401 (circular AC 150/5370-10) adecuadamente construidas, se comportarán de forma satisfactoria bajo presiones de llanta mayores a 1.5 MPa en cuanto a lo que se refiere a la formación de roderas. Así mismo, capas asfálticas de este tipo construidas con espesores superiores a los 12 cm pueden ser calificadas bajo los códigos X o incluso W.

✚ Método utilizado: Evaluación Técnica (T) y Uso de Aeronaves (U).

Cada uno de estos caracteres debe ir separado por diagonales, por ejemplo, para un pavimento flexible que al ser revisado mediante el método de evaluación técnica obtuvo un valor numérico de 60, que está cimentado en un terreno de resistencia baja y que da servicio a aeronaves cuya presión de rueda máxima es de 1.5 MPa, su PCN se expresa como 60/F/B/X/T.

4.4 OBTENCIÓN ACN-PCN MEDIANTE METODO DE USO DE AERONAVES

En el capítulo 3 se diseñaron varias estructuras de pavimento entre las que encontramos de tipo flexible y rígido, con vida útil de 20 y 50 años, así como para distintos valores de capacidad portante en su subrasante; para cada una de estas estructuras se obtendrá el valor PCN a través del método de uso de aeronave ya que la configuración de las estructuras a analizar se obtuvieron basado en el CDF=1.

El primer paso consiste en obtener el valor de todos los valores de ACN, tanto para estructuras rígidas como para flexibles, la tabla 4.5 muestra estos valores para cada una de las cuatro categorías de suelo.



Tabla 4.5 ACN de la combinación de tráfico

	Aeronave	ACN							
		Flexible				Rígido			
		D (03)	C (06)	B (10)	A (15)	D (20)	C (40)	B (80)	A (150)
1	A318-100 std	34.8	29.6	26.8	25.8	33.4	31.6	29.5	27.3
2	A319-100 std	42.1	36.4	32.8	31.9	41.2	39.3	37.1	34.7
3	A320-100	46.1	40.3	36.6	35.3	46.2	44.3	42.1	39.8
4	A321-100 std	58.9	53.1	47.5	45.2	59.0	56.8	54.1	51.2
5	B737-100	33.1	28.9	25.7	24.9	32.3	30.8	29.1	27.2
6	B727-100C Alternate	54.4	49.2	43.4	41.6	53.4	51.2	48.5	45.6
7	Fokker 100	33.1	30.7	27.3	25.5	32.9	31.7	30.2	28.5
8	B757-200	52.9	40.3	33.0	29.7	49.2	43.3	36.7	30.6
9	B767-200	72.3	53.1	44.7	40.8	64.4	55.7	46.7	39.2
10	A300-B2 std	65.4	50.2	41.5	37.5	60.3	52.7	44.4	37.1
11	B767-300ER	72.5	53.3	44.9	40.8	65.1	56.5	47.5	40.2
12	B777-200 Baseline	76.8	54.2	45.0	40.3	80.1	64.1	48.8	38.8
13	B747-100 SF	74.1	55.0	46.5	42.8	68.5	60.0	51.1	43.7
14	B787-8 (Preliminary)	105.0	80.1	65.2	59.1	94.4	82.7	70.0	59.1
15	A330-200 std	96.8	71.6	61.9	57.0	84.7	72.6	61.2	53.3
16	A380-800 Basic 1 Body	105.7	75.1	62.0	56.1	110.2	88.6	68.0	54.9
17	A340-200 opt	90.2	66.7	57.7	53.5	78.2	66.6	55.9	48.7

Fuente: Programa COMFAA, Diseño realizado el 12 de Agosto de 2014.

En la tabla 4.5 se resaltan los valores de ACN mayores para cada una de las categorías de terreno dependiendo del tipo de pavimento, a partir de ellos se comienzan a componer los códigos de PCN pertenecientes a cada una de las estructuras. En caso de todas las estructuras rígidas, por las características que poseen se recomienda utilizar el código W para indicar que la estructura soporta una presión de rueda ilimitada, mientras que para el caso de flexibles es recomendado ocupar el código X que indica que la presión soportada es de 1.5 MPa, sin embargo, para el caso de las estructuras que se han diseñado con anterioridad, se observa que además de poseer una carpeta asfáltica de alta calidad, se colocaron bases asfálticas que mejoran aún más la capacidad portante, es por ello que se decide colocar el código W para todos los pavimentos analizados. Las tablas 4.6 y 4.7 muestran los códigos de PCN de todas las estructuras diseñadas.



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



Tabla 4.6 PCN de las estructuras flexibles con el método de uso de aeronave

Núm	Tipo de pavimento	Vida útil [años]	CBR	Espesor [cm]				PCN
				Superficie asfáltica	Base Asfáltica	Base de Agregado Triturado	Subrasante Mejorada	
1	Flexible Convencional	20	5	12.7	27.34	75.51	-	80/F/C/W/U
2	Flexible Convencional	20	5	12.7	20	25	74.32	80/F/C/W/U
3	Flexible Convencional	20	10	12.7	20	25	11.84	65/F/B/W/U
4	Flexible Convencional	20	15	12.7	20	12.5	7.21	59/F/A/W/U
5	Flexible Convencional	20	20	12.7	20	10.16	5.08	59/F/A/W/U
6	Perpetuo	20	5	12.7	35	15	57.78	80/F/C/W/U
7	Perpetuo	20	10	12.7	35	15	5.08	65/F/B/W/U
8	Perpetuo	20	15	12.7	35	15	5.08	59/F/A/W/U
9	Perpetuo	20	20	12.7	35	15	5.08	59/F/A/W/U
10	Flexible Convencional	50	5	12.7	20	25	93.97	80/F/C/W/U
11	Flexible Convencional	50	10	12.7	20	25	19.69	65/F/B/W/U
12	Flexible Convencional	50	15	12.7	20	12.5	12.26	59/F/A/W/U
13	Flexible Convencional	50	20	12.7	20	10.16	5.08	59/F/A/W/U
14	Perpetuo	50	5	12.7	35	15	80.71	80/F/C/W/U
15	Perpetuo	50	10	12.7	35	15	21	65/F/B/W/U
16	Perpetuo	50	15	12.7	35	15	5.08	59/F/A/W/U
17	Perpetuo	50	20	12.7	35	15	5.08	59/F/A/W/U

Fuente: Programa COMFAA, Diseño realizado el 12 de Agosto de 2014

Tabla 4.7 PCN de las estructuras rígidas con el método de uso de aeronave

Núm	Tipo de Pavimento	Vida Útil [años]	k [MN/m ²]	Espesor [cm]			PCN
				Losa de Concreto	Sub-base Agregado Triturado	Subrasante Mejorada	
1	Rígido Convencional	20	22.4	43.15	20	90	89/R/C/W/U
2	Rígido Convencional	20	38.4	41.89	20	90	70/R//B/W/U
3	Rígido Convencional	20	52.6	40.99	20	90	59/R/A/W/U
4	Rígido Convencional	20	65.8	40.36	20	90	59/R/A/W/U
5	Rígido Convencional	50	22.4	44.97	20	90	89/R/C/W/U
6	Rígido Convencional	50	38.4	43.66	20	90	70/R/B/W/U
7	Rígido Convencional	50	52.6	42.77	20	90	59/R/A/W/U
8	Rígido Convencional	50	65.8	42.12	20	90	59/R/A/W/U

Fuente: Programa COMFAA, Diseño realizado el 12 de Agosto de 2014



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez que se han analizado diversos tipos de estructuras capaces de soportar la misma combinación de tráfico, se puede decir que el diseño de un pavimento no es tarea fácil, existen muchas posibilidades, se puede elegir entre utilizar pavimentos rígidos o flexibles, así como elegir una estructura convencional, un pavimento perpetuo, una estructura mixta, etc. Es por ello que además de la combinación de tráfico, es importante que se tomen en cuenta diversos factores tales como las condiciones climáticas de la zona, problemas típicos del terreno de fundación, necesidades económicas, tipo de mantenimiento que se podrá dar a la estructura después de cierto tiempo, etc.

La evolución de las características físicas y mecánicas que las aeronaves van teniendo día a día siempre van generando nuevos retos para la ingeniería, es por ello que se debe tener presente que las características de los pavimentos de las pistas de aterrizaje, plataformas y calles de rodaje de los aeropuertos también tendrán que evolucionar, por ello es importante adoptar un criterio conservador y tener en cuenta en el diseño de los pavimentos de estas estructuras las condiciones más desfavorables que se pudieran llegar a presentar.

Una vez realizados los análisis de las estructuras de pavimentos rígidos y flexibles, se observó que a medida que la capacidad del suelo de cimentación va mejorando, el espesor requerido por dichas estructuras va siendo cada vez menos exigente, es decir, se cumple que a mayor resistencia la subrasante, la estructura es de menor espesor.

Los diseños más desfavorables que se presentaron en el presente trabajo fueron aquellos cuyo suelo de cimentación pertenece a la categoría C, es decir, una categoría baja, los cuales se caracterizaron con valores de CBR igual a 5% y módulo de reacción de la subrasante de 22.4 MN/m³. Para el caso en el que se utilizó una vida útil de 20 años se obtuvo como resultado que el espesor total necesario en caso de construirse una estructura convencional de pavimento asfáltico sería de 132.02 cm, mientras que al utilizar un pavimento perpetuo sería de 120.28 cm y si se utilizara una estructura de cemento portland, 151.67 cm, en todos los casos las estructuras soportan de manera adecuada las cargas, sin embargo en cada caso el tipo de mantenimiento futuro es completamente diferente, el caso más desfavorable suele ser el de la estructura de pavimento flexible convencional.



Cabe mencionar que el diseño de pavimento perpetuo tiene un criterio muy conservador, pues, como se mencionó con anterioridad, los módulos de rigidez con los que se modeló la estructura de pavimento en el programa FAARfield resultan ser mucho menores que los módulos reales, esto trae consigo ventajas tales como retrasar algunos años la necesidad de mantenimiento en la carpeta asfáltica o el incremento de la vida útil de la estructura de pavimento.

Para el caso de una subrasante con categoría C y vida útil de 50 años, los resultados de espesores totales son 151.67 cm para la estructura de pavimento flexible convencional, 143.41cm para el perpetuos y 154.97 cm para pavimento rígido, al igual que las estructuras con vida útil de 20 años, resulta que los espesores de pavimento perpetuos son menores a los de la estructura flexible convencional que a su vez son menores que los de las estructuras rígidas, esto no significa que el ahorro que se realiza en cuanto a material se refiere ocasione un costo total de las estructuras distribuido de la misma manera, pues el costo de cada uno de los materiales utilizados varía y a pesar de tener menores espesores puede que el costo sea muy grande.

En cuanto al Factor de Daño Acumulativo, se observó en todos los diseños que la aeronave que mayor daño causa a las estructuras no es aquella que pesa más, sino que se trata de algo más complejo, es importante tomar en cuenta la cantidad de operaciones anuales que las aeronaves realizan, la separación de sus ruedas en el tren de aterrizaje, la distribución de peso en dicho tren, la presión en los neumáticos, la distribución de capas en la estructura, etc., se observa que en el caso de las estructuras rígidas la aeronave que mayor daño ocasiona es la A321-100 std, la cual resulta ser la aeronave más pesada de aquellas que realizan el mayor número de salidas anuales, pero no es la más pesada de la combinación de tráfico.

Como se describe con anterioridad, el valor numérico asignado al PCN de un pavimento determina la resistencia que la estructura posee para hacer frente a las cargas de las aeronaves que soportará, de tal manera que, entre más alto sea este valor, la resistencia del pavimento es mayor. En las estimaciones de PCN realizadas, se puede observar que, utilizando la misma combinación de tráfico, y tomando como referencia un tipo de suelo determinado, los pavimentos rígidos poseen una capacidad portante mayor que los pavimentos flexibles.



Lo anterior se observa de manera clara al comparar entre sí los pavimentos número 3 de la tabla 4.6 y el número 2 de la tabla 4.7, ambos pavimentos se diseñaron con una vida útil de 20 años utilizando la misma combinación de tráfico y considerando un suelo de mediana resistencia, es decir, del tipo B. La primer estructura tuvo un PCN de 65/F/B/W/U, mientras que la segunda obtuvo uno de 70/R//B/W/U, esto indica que la estructura compuesta por losa de cemento tipo Portland resiste más las cargas que aquella compuesta por materiales bituminosos, sin embargo, con ello no se está diciendo que la primer estructura sea mejor que la segunda o viceversa, para determinarlo es imprescindible analizar los factores analizados con anterioridad, además nunca se debe perder de vista que el método ACN-PCN no es absoluto.

Al observar las tablas 4.6 y 4.7 es fácil notar que a medida que el valor CBR aumenta, el valor numérico del PCN disminuye, esto se debe a que al usar el método de uso de aeronave, el número de clasificación de pavimento se obtiene a partir del ACN de las aeronaves que a su vez corresponde a un valor calculado a partir del tipo de suelo y la configuración del tren de aterrizaje. El número de clasificación de la aeronave es una medida del efecto relativo que ocasiona esta sobre la estructura, por lo cual, conforme las condiciones del suelo mejoran, el valor ACN va siendo menor y, por tanto, el PCN también.

Al utilizar el método de uso de aeronave para el cálculo del PCN, se asume que las estructuras diseñadas con anterioridad son capaces de soportar cada uno de los aviones que forman parte de la combinación de tráfico; esto se asegura desde el análisis realizado con FAARfield en el cual se buscó que el valor de CDF siempre fuera menor a uno con la finalidad de que el pavimento pudiera soportar el paso de todas las aeronaves que se tienen sin limitación alguna.

Los coeficientes de daño acumulativo (CDF) que calculan los programas COMFAA y FAARfield son diferentes y no podrán compararse ya que cada programa utiliza procedimientos diferentes para determinar la capacidad estructural de un pavimento.

Es recomendable que al realizar diseño de aeropistas utilizando FAARfield se tenga en cuenta que los aspectos más importantes a cuidar son las características de las aeronaves que se introducen al programa, el espesor de las capas que no son calculadas por el programa y los datos de capacidad portante del suelo. Una vez realizado el diseño es



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



importante que en los pavimentos flexibles se revise el valor de CDF en la carpeta asfáltica pues el programa basa su diseño en el valor $CDF=1$ en la subrasante pero en ocasiones este valor en la carpeta asfáltica suele sobrepasar la unidad, en este caso será importante revisar el espesor de las capas restantes y aumentarlo.



BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). Obtenido de
http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/productos/aliquidos/
- (s.f.). Obtenido de
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Catalogo_Pavimentos/Catalogo.pdf
- (Marzo de 2014). Obtenido de http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_aviaci%C3%B3n
- (Abril de 2014). Obtenido de <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/tag/pistas-de-aterrizaje/>
- (Abril de 2014). Obtenido de
<http://www.icao.int/SAM/Documents/2005/AIRPORTPAVEMENT/04%20Cap.%203%20-%20Pistas.pdf>
- (Abril de 2014). Obtenido de <http://www.aeropuertos.net/aeropuerto-internacional-de-la-ciudad-de-mexico/>
- (Abril de 2014). Obtenido de <http://www.obrasweb.mx/construccion/2013/07/12/5-aeropuertos-que-aterrizaron-antes-de-tiempo>
- (Abril de 2014). Obtenido de <http://www.obrasweb.mx/construccion/2013/07/12/5-aeropuertos-que-aterrizaron-antes-de-tiempo>
- (Mayo de 2014). Obtenido de
http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%201.pdf
- (Mayo de 2014). Obtenido de http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02020301.pdf
- (Mayo de 2014). Obtenido de http://www.imcyc.com/50/pdfs/50a_PavimentosChih.pdf
- (Mayo de 2014). Obtenido de
http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Catalogo_Pavimentos/Catalogo.pdf
- (Mayo de 2014). Obtenido de
<http://materias.fi.uba.ar/6807/contenidos/Apunte%20Pavimentos.pdf>
- (Mayo de 2014). Obtenido de <http://www.acreditacionfic.uni.edu.pe/files/PAPERFAARFIELD.pdf>



DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA AEROPISTAS
Gabriela García Saldivar



(Mayo de 2014). Obtenido de

http://www.academia.edu/6474423/UNIVERSIDAD_DEL_CAUCA_CATOLICA_Y_ESCUELA_DE_INGENIEROS_MILITARES_COLOMBIA_ESPECIALIZACION_EN_INGENIERIA_DE_PAVIMENTOS_MANUAL_CONTENIDO

(Junio de 2014). Obtenido de <http://prezi.com/ohzowmm8uzxk/sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-sucs/>

(Mayo de 2014). Obtenido de

<http://materias.fi.uba.ar/6807/contenidos/Notas%20Pavimentos.pdf>

(Agosto de 2014). Obtenido de

http://www.boeing.com/assets/pdf/commercial/airports/faqs/Calculating_PCN_using_the_FAA_Method.pdf

Alliance, A. P. (2002). Perpetual Pavements. Synthesis.

FAA. (2009). Advisory Circular 150/5320-6E.

FAA. (2012). Advisory Circular 150/5300-13A.

FAA. (2012). Pass to coverage computation for arbitrary gear configurations in the FAARFIELD program. Technical note.

FAA. (2014). Advisory Circular 150/5335-5C.

Hennes, R. G., & Ekse, M. I. (1963). *Fundamentos de Ingeniería del Transporte*. Reverte.

Navneet Garg, P. F.-E. (Julio de 2014). Obtenido de

<http://www.airporttech.tc.faa.gov/conference/2013APWG/20130416/09Garg.pdf>

OACI. (Julio 2004). *Anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional* (Cuarta ed.).

Truyois Mateu, S., & Alcobilla de la Fuente, F. (s.f.). *Transporte Aéreo e Ingeniería Aeroportuaria*. Madrid.