

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DEL PAVIMENTO DE UN AEROPUERTO
INTERNACIONAL DE PISCO**

Tesis para optar por el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta la bachillera:

Karla Alejandra Roel Rondo

ASESOR: Ing. Manuel A. Olcese Franzero

Lima, Febrero de 2018





A mis padres y hermana por todo su amor,
motivación y apoyo incondicional.

A mis abuelitas por su inmenso cariño
y confianza.

RESUMEN

Actualmente, en el Perú se está desarrollando un crecimiento significativo de tráfico aéreo; sin embargo, la infraestructura aeroportuaria muestra un atraso con relación a este crecimiento. Es por ello que se considera necesaria la implementación de nuevas estructuras que den soporte al movimiento aeroportuario.

En la presente tesis se plantea la construcción de los pavimentos de un Aeropuerto Internacional, el cual estará ubicado en el distrito de San Andrés, provincia de Pisco, departamento de Ica. Se empleará la geometría del área de movimiento del Aeropuerto Internacional de Pisco, ya que es un aeropuerto de categoría OACI 4E, la misma que la del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (AIJCH), convirtiéndolo en el Aeropuerto alterno más cercano al AIJCH para vuelos internacionales.

Para ello, se ha realizado el diseño de pavimentos de un Aeropuerto Internacional en Pisco. Se emplearon las metodologías de la Federal Aviation Administration de los Estados Unidos (FAA), las cuales se encuentran en las circulares AC 150/5320 6D y AC 150/5320 6F. Se decidió trabajar con ambas debido a que la primera (1995) fue la última circular en donde se emplearon curvas de cálculo de diseño, mientras que en la segunda (2016) se usa la versión 1.41 del software FAARFIELD, esta última es la circular vigente.

Como se mencionó, el primer diseño está basado en curvas de cálculo, los resultados obtenidos se han usado como valores referenciales para el diseño bajo la segunda metodología.

En cada caso se ha hecho el diseño de pavimentos flexibles y rígidos. Se ha realizado un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por cada metodología. Para decidir el tipo de pavimento a emplear, se realizó un análisis económico de los diseños; sin embargo, para el caso de los pavimentos de la plataforma, se determinó que estos deberán ser rígidos, al margen del resultado económico, esto debido a que las plataformas se encuentran sometidas a cargas por un tiempo prolongado, lo cual puede generar una deflexión considerable en caso sea un pavimento flexible.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Diseño del Pavimento de un Aeropuerto Internacional de Pisco".
Área : Geotecnia
Asesor : Manuel A. Olcese Franzero
Alumno : KARLA ALEJANDRA ROEL RONDO
Código : 2009.0295.412
Tema N° : # 58
Fecha : Lima, 5 de octubre de 2017



1. INTRODUCCIÓN

El Aeropuerto Internacional de Pisco ha sido establecido por la Fuerza Aérea del Perú como aeropuerto alterno, debido a que es la pista más cercana al Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (AIJCH), ya que se encuentra a 213 km de este. Esto quiere decir que en caso el aterrizaje en el AIJCH se vuelva inconveniente, el vuelo podrá proceder a aterrizar en el aeropuerto de Pisco.

Asimismo, según las proyecciones realizadas, se estima que el tráfico en esta región será elevado, dado que se está dando un continuo crecimiento considerando la exención de visas para los peruanos que salgan a destinos europeos, así como la disminución de las tarifas aéreas. Por tal motivo se ha considerado la construcción de un aeropuerto internacional en Pisco con la finalidad de lograr cumplir la demanda de dicha región, y lograr descentralizar el AIJCH.

De este modo, es necesario otorgarle un nivel de seguridad y buena funcionalidad a los pavimentos del aeropuerto en mención, de manera que pueda cumplir con las solicitudes demandadas por los aeródromos que en él aterricen.

En la presente tesis se realizará el diseño de los pavimentos de un Aeropuerto Internacional en Pisco, para ello se usará la geometría existente del actual Aeropuerto de Pisco. El aeródromo deberá cumplir requerimientos similares a las del aeropuerto de Lima.

Se empleará las metodologías propuestas por la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos (FAA). Se seguirán las pautas de la FAA mencionadas en las circulares AC 150/5320 6D y AC 150/5320 6F, debido a que en nuestro país no hay una norma para realizar el diseño de pavimentos de un aeródromo. La circular vigente es la AC 150/5320 6F; sin embargo, es considerado necesario también realizar el diseño por la circular AC 150/5320 6D con la finalidad de usar los resultados de esta como referencia de los resultados obtenidos por la segunda circular mencionada, así como para la verificación de los datos obtenidos. Se realizarán dos diseños con cada una: el primero será el diseño de pavimentos flexibles, y el segundo será el diseño de



62



pavimentos rígidos. Finalmente, se realizará el análisis económico, en el que se incluirá la inversión de la construcción del pavimento estructural de la pista de aterrizaje, y se elegirá la alternativa más adecuada.

2. ANTECEDENTES

2.1. Ubicación del área

El pavimento del aeropuerto propuesto en la presente tesis estará ubicado en el distrito de San Andrés, Provincia de Pisco y Departamento de Ica, a 4 km al suroeste de la ciudad de Pisco.

2.2. Geología y mecánica de suelos

Las características geotécnicas del terreno, donde se ubicará el aeropuerto, está formada por arcilla de mediana plasticidad. Cabe resaltar que las características físicas y los estudios de la resistencia de la subrasante y de los materiales para las capas del pavimento, forman parte de los datos proporcionados para la presente tesis, y cumplen con las especificaciones mencionadas en la circular.

3. INSTRUCCIONES GENERALES

- El diseño de pavimentos se realizará empleando el método contenido en el manual AC 150/5320-6D¹ y AC 150/5320-6F² de la FAA. Los diseños contemplarán dos alternativas de solución a lo largo de toda el área de movimiento:
 - Pavimento flexible y
 - Pavimento rígido
- Para el estudio de tráfico se emplearán los datos proporcionados para la presente tesis.
- Se considerarán los pronósticos de demanda futura analizados por el Plan Maestro del Aeropuerto Internacional de Pisco.
- Los resultados de CBR y Proctor de la subrasante, base y subbase, forman parte de los datos proporcionados para la presente tesis.
- Los materiales considerados para la conformación de las capas de los pavimentos cumplen con las especificaciones mencionadas en la circular AC 150/5370-10G³, según lo indicado:
 - Capa Subbase: P-154
 - Capa Base: P-209
 - Carpeta Asfáltica: P-401
 - Losa de Concreto: P-501

¹FAA, AC No: 150/5320-6D. *Airport Pavement Design and Evaluation*. Traducción propia. Estados Unidos: 1995

² FAA AC 150/5320-6F. *Airport Pavement Design and Evaluation*. Estados Unidos. 2016

³ FAA AC 150/5370-10G. *Standards for Specifying Construction of Airports*. 2014

- Se hará un análisis económico de la inversión de la construcción del pavimento estructural de la pista de aterrizaje y según ello se elegirá la alternativa más adecuada. No se incluirá el análisis de económico del mantenimiento de la pista por exceder los alcances de la presente tesis.

El trabajo de análisis y diseño presentará la siguiente estructura:

3.1. Situación actual

Se analizarán las características de los suelos y los resultados de sus resistencias, en la zona de estudio.

3.2. Análisis de posibles soluciones

Para el pavimento del aeropuerto propuesto en la presente tesis se plantearán dos alternativas; en cada de una de ellas se trabajará con los resultados obtenidos del estudio de tráfico y de suelos.

3.2.1. *Alternativa 1: Pavimento Rígido.*

Se analizará los parámetros necesarios para el diseño como son: los valores de CBR de la subrasante y base, el módulo de la subrasante y de la base, la resistencia a la flexión del concreto, el tráfico y peso bruto de las aeronaves. Con estos parámetros se deberá calcular el espesor necesario del pavimento rígido.

3.2.2. *Alternativa 2: Pavimento Flexible.*

Se analizará los parámetros necesarios para el diseño como son: los valores de CBR de la subrasante, base y subbase, el módulo de fundación, el tráfico y peso bruto de las aeronaves. Con estos parámetros se deberá calcular el espesor necesario del pavimento flexible.

3.3. Análisis de precios de las alternativas

Se realizará un análisis económico de la inversión de la construcción del pavimento estructural de la pista de aterrizaje de ambas alternativas, para lo cual se hará un análisis de precios unitarios.

El presupuesto, de la pista de aterrizaje tendrá siguientes partidas:

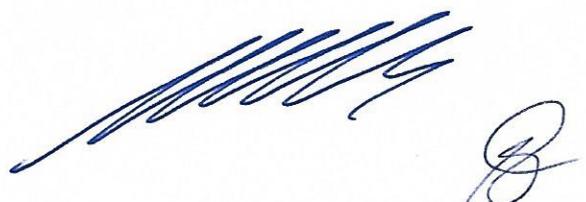
- Movimiento de tierras y
- Pavimento.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se expondrá las conclusiones y las recomendaciones pertinentes como resultado de la elaboración de la presente tesis.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	2
1.3. UBICACIÓN	2
1.4. OBJETIVOS	3
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. PAVIMENTOS.....	3
2.1.1. DEFINICIÓN.....	3
2.1.2. DIFERENCIAS ENTRE PAVIMENTOS DE CARRETERAS Y PAVIMENTOS DE AEROPUERTOS.....	4
2.1.3. TIPOS DE PAVIMENTOS.....	4
2.1.3.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	4
2.1.3.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS	6
2.1.4. DETERMINADAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MATERIALES USADOS EN LAS CAPAS DE PAVIMENTOS.....	20
2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS PAVIMENTOS DE UN AEROPUERTO	21
2.2.1. PISTAS.....	21
2.2.2. CALLES DE RODAJE	26
2.2.3. PLATAFORMAS	29
2.3. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	29
2.3.2. ESTUDIO DEL TRÁFICO	29
2.3.3. ESTUDIO DE SUELOS.....	30
2.3.4. CONSIDERACIONES DE LAS AERONAVES.....	32
2.3.5. DETERMINACIÓN DE LA AERONAVE DE CÁLCULO	33
2.3.6. DETERMINACIÓN DE LAS SALIDAS ANUALES EQUIVALENTES EN FUNCIÓN A LA AERONAVE DE CÁLCULO.....	33
2.4. METODOLOGÍA DE LA FAA	35
2.4.1. METODOLOGÍA ADVISORY CIRCULAR 150/5320-6D	35
2.4.1.1. DISEÑO PARA PAVIMENTOS QUE SOPORTAN AERONAVES DE 30,000 LIBRAS A MÁS.....	35
2.4.2. METODOLOGÍA ADVISORY CIRCULAR 150/5320-6F	40
2.4.2.1. Diseño de pavimentos	42
3. TRÁFICO AÉREO	46

4.	ESTUDIO DE SUELOS	48
5.	GEOMETRÍA DEL ÁREA DE MOVIMIENTO	49
6.	METODO DE LA FAA – AC 150/5320-6D	49
6.1.	DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	49
6.1.1.	DISEÑO DE LA SECCIÓN	52
6.2.	DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO	55
6.2.1.	DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO PARA UN ESPESOR DE LA SUBBASE IGUAL A 8"	57
6.2.2.	DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO PARA UN ESPESOR DE LA SUBBASE IGUAL A 10"	59
6.2.3.	DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO PARA UN ESPESOR DE LA SUBBASE IGUAL A 12"	61
6.2.4.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE SECCIONES CALCULADAS	63
6.2.5.	DISEÑO DE LA SECCIÓN	64
6.2.6.	DISEÑO DE JUNTAS	65
7.	METODO DE LA FAA – AC 150/5320-6F	66
7.1.	DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	66
7.1.1.	SELECCIÓN DE MATERIAL	67
7.1.2.	REGISTRO DE TRÁFICO AÉREO EN FAARFIELD	68
7.1.3.	CÁLCULO DE ESPESOR DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO.....	70
7.1.4.	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE AMBAS METODOLOGÍAS.....	74
7.1.5.	CÁLCULO DEL ESPESOR DEL MARGEN	75
7.2.	DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO	77
7.2.1.	SELECCIÓN DE MATERIAL	77
7.2.2.	REGISTRO DE TRÁFICO AÉREO EN FAARFIELD	79
7.2.3.	CÁLCULO DEL ESPESOR DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO	79
	• Cálculo del espesor de la losa de concreto para un espesor de base igual a 8"	79
	• Cálculo del espesor de la losa de concreto para un espesor de base igual a 10"	80
	• Cálculo del espesor de la losa de concreto para un espesor de base igual a 12"	82
	• Análisis económico de las secciones calculadas	83
7.2.4.	DISEÑO DE JUNTAS	85
7.2.5.	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE AMBAS METODOLOGÍAS.....	88
7.2.6.	CÁLCULO DEL ESPESOR DEL MARGEN	88
8.	ANÁLISIS ECONÓMICO	91
8.1.	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	91
8.2.	PRESUPUESTO PAVIMENTO FLEXIBLE	95

8.3.	PRESUPUESTO PAVIMENTO RÍGIDO	96
9.	CONCLUSIONES.....	97
10.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	100



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Aeropuerto Internacional de Pisco.	2
Figura 2. Sección Típica de Pavimento Flexible. Fuente: CARRASCO, Pedro Pablo. Evaluación de pavimentos aeroportuarios, 2002.....	6
Figura 3. Tipo de Juntas de Pavimentos Rígidos AC 150/5320-6D. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995	8
Figura 4. Detalles de Juntas de Pavimentos Rígidos AC 150/5320-6D. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995	9
Figura 5. Juntas de aislamiento tipo A de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016	13
Figura 6. Juntas de aislamiento tipo A-1 de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F.....	13
Figura 7. Juntas de contracción y construcción de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F.....	14
Figura 8. Detalles de juntas de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016.....	15
Figura 9. Transición entre pavimento rígido y flexible. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016.....	20
Figura 10. Estructura típica del pavimento. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016	20
Figura 11. Pista. Fuente: OACI, 2005	22
Figura 12. Zonas aledañas a la pista. Fuente: OACI, 2005.....	23
Figura 13. Margen de Pista. Fuente: OACI, 2005.....	24
Figura 14. Franja de Pista. Fuente: OACI, 2005.....	25
Figura 15. Resa. OACI, 2005	25
Figura 16. Zona libre de obstáculos. Fuente: OACI, 2005.....	26
Figura 17. Zona de parada. Fuente: OACI, 2005.....	26
Figura 18. Esquema de Calle de Salida Rápida. Fuente: OACI OACI. Manual de diseño de aeródromos, parte 2: calles de rodaje, plataforma y apartaderos de espera. 2005	28
Figura 19. Calles de rodaje en plataformas. Fuente: OACI. Manual de diseño de aeródromos, parte 2: calles de rodaje, plataforma y apartaderos de espera. 2005	28
Figura 20. Ejemplos de configuración de tren de aterrizaje. Fuente: FAA. Order 5300.7, Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations, 2005	33
Figura 21. Efecto de la capa de cimentación sobre k. Fuente: OACI, Manual de Diseño de Aeródromos – Pavimentos, 1983.....	38
Figura 22. Efecto de la capa de cimentación estabilizada sobre k. Fuente: OACI, Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III, Pavimentos, Canadá, 1983	39
Figura 23. Diferencia entre mix de aeronaves y aeronave de diseño. Fuente: FAA. FAARFIELD Software Overview. IX ALACPA Seminar on Airport Pavements Ciudad de Panamá, Panamá. David R. Brill, P.E, Ph D, 2012.....	41
Figura 24. Gráfica CDF. Fuente: FAA. FAARFIELD Software Overview. IX ALACPA Seminar on Airport Pavements Ciudad de Panamá, Panamá. David R. Brill, P.E, Ph D, 2012	42
Figura 25. Sección de pavimento flexible - zona crítica. Fuente: Propia	54
Figura 26. Sección pavimento flexible. Fuente: Propia.....	55
Figura 27. Determinación de k. Fuente: OACI, Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III, Pavimentos. Canadá, 1983	57
Figura 28. Sección Área Crítica para 8" de base. Fuente: Propia	59
Figura 29. Sección Área Crítica para 10" de subbase (valores en pulgadas).	61
Figura 30. Sección Área Crítica para 12" de subbase. Fuente: Propia	63

Figura 31. Sección pavimento rígido. Fuente: Propia	65
Figura 32. Sección del pavimento previo – Pavimento Flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	68
Figura 33. Registro de Tráfico Aéreo en FAARFIELD – Pavimento Flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	69
Figura 34. Ejemplo registro de tren de aterrizaje de aeronave 2D/D1 – Pavimento Flexible. Fuente: Propia	70
Figura 35. Espesores de las capas de pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	71
Figura 36. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	72
Figura 37. Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje del pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	73
Figura 38. Sección del Pavimento Flexible. Fuente: Propia	74
Figura 39. Aeronaves que mayor espesor de pavimento demandan. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	76
Figura 40. Espesor de las capas del margen del pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	77
Figura 41. Selección del material – Pavimento Rígido. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	78
Figura 42. Espesores de las capas de pavimento rígido – espesor de la base igual a 8". Fuente: Software FAARFIELD 1.41	79
Figura 43. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	80
Figura 44. Espesores de las capas de pavimento rígido – espesor de la base igual a 10". Fuente: Software FAARFIELD 1.41	81
Figura 45. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	81
Figura 46. Espesores de las capas de pavimento rígido – espesor de la base igual a 12". Fuente: Software FAARFIELD 1.41	82
Figura 47. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	83
Figura 48. Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje del pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	84
Figura 49. Sección del Pavimento Rígido. Fuente: Propia	85
Figura 50. Patrón de juntas de un área de los pavimentos (longitud en m). Fuente: Propia	87
Figura 51. Aeronaves que mayor espesor de pavimento demandan. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	89
Figura 52. Espesor de la base y carpeta asfáltica del margen del pavimento. Fuente: Software FAARFIELD 1.41	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Espaciamiento Máximo de Juntas para Pavimento Rígido con subbase no estabilizada. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995	10
Tabla 2. Dimensiones y espaciamiento de dowels.	11
Tabla 3. Tipo de juntas de pavimentos. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016	16
Tabla 4. Dimensiones y espaciamiento de los dowels. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016.....	18
Tabla 5. Dimensiones y espaciamiento de juntas para bases no estabilizadas. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016	19
Tabla 6. Dimensiones y espaciamiento de juntas para pavimentos con bases estabilizadas. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016	19
Tabla 7. Especificaciones de las capas de pavimentos. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016.....	21
Tabla 8. Categoría OACI de Pista - Código Número. Fuente: OACI. Manual de diseño de aeródromos. Anexo 14. Volumen I: diseño y operaciones de aeródromos, 2013	22
Tabla 9. Categoría de Pista - Código Letra. Fuente: OACI. Manual de diseño de aeródromos. Anexo 14. Volumen I: diseño y operaciones de aeródromos, 2013	23
Tabla 10. Factor de conversión trenes de aterrizaje. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995.....	34
Tabla 11. Factor de corrección para un tráfico mayor a 25,000. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995	36
Tabla 12. Comparativo entre métodos de la FAA. Fuente: FAA. FAARFIELD Software Overview. IX ALACPA Seminar on Airport Pavements Ciudad de Panamá, Panamá. David R. Brill, P.E, Ph D, 2012.....	40
Tabla 13. Espesor mínimo de las capas - Pavimentos Flexibles. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos. 2016	43
Tabla 14. . Espesor mínimo de las capas - Pavimentos Rígido. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos. 2016	44
Tabla 15. Salidas Anuales. Fuente: Datos proporcionados para la presente tesis	46
Tabla 16. Tráfico Promedio Anual. Fuente: Propia	47
Tabla 17. Cálculo de Aeronave de Diseño. Fuente: Propia	50
Tabla 18. Salida aeronave afecto al factor de trenes de aterrizaje. Fuente: Propia	51
Tabla 19. Salidas anuales equivalentes. Fuente: Propia	52
Tabla 20. Condiciones en que no se requiere una capa de cimentación. Fuente: OACI. Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III, Pavimentos. Canadá, 1983	56

Tabla 21. Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 8". Fuente: Propia	58
Tabla 22. Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 10". Fuente: Propia ..	60
Tabla 23. Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 12". Fuente: Propia ..	62
Tabla 24. Comparación económica de alternativas propuestas. Fuente: Propia	63
Tabla 25. Descripción de las secciones. Fuente: Data Entry, flexible pavement design. Federal Aviation Administration. Estados Unidos, 2012	67
Tabla 26. Capa a ser ajustada. Fuente: Data Entry, flexible pavement design. Federal Aviation Administration. Estados Unidos, 2012	71
Tabla 27. Comparativo de los resultados – Pavimento flexible de espesor al 100%. Fuente: Propia	74
Tabla 28. Comparativo de los resultados – Espesor reducido. Fuente: Propia.....	75
Tabla 29. Espesor mínimo de las capas del margen - Pavimento Flexible. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016	75
Tabla 30. Comparación económica de alternativas propuestas. Fuente: Propia	83
Tabla 31. Comparativo de los resultados – Pavimento rígido estructural. Fuente: Propia.....	88
Tabla 32. Comparativo de los resultados – Franja nivelada. Fuente: Propia	88
Tabla 33. Espesor mínimo de las capas del margen – Pavimento Flexible. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos: 2016	89
Tabla 34. Dimensiones Pavimento Flexible de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia	95
Tabla 35. Presupuesto de Pavimento Flexible Estructural de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia	95
Tabla 36. Dimensiones Pavimento Rígido de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia	96
Tabla 37. Presupuesto de Pavimento Rígido Estructural de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia	96

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. ÁBACOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

ANEXO 2. ÁBACOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

ANEXO 3. DETERMINADAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MATERIALES
USADOS EN LAS CAPAS DE PAVIMENTOS

ANEXO 4. PLANOS DE PAVIMENTOS DE UN AEROPUERTO INTERNACIONAL EN PISCO



1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El Aeropuerto Internacional de Pisco ha sido establecido por la Fuerza Aérea del Perú como aeropuerto alterno, debido a que es la pista más cercana al Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (AIJCH) que cumple con la misma categoría OACI (4E), ya que se encuentra a 213 km de este. Esto quiere decir que en caso el aterrizaje en el AIJCH se vuelva inconveniente, el vuelo podrá proceder a aterrizar en el aeropuerto de Pisco.

Asimismo, según las proyecciones realizadas, se estima que el tráfico en esta región será elevado, dado que se está dando un continuo crecimiento considerando la exención de visas para los peruanos que salgan a destinos europeos, así como la disminución de las tarifas aéreas. Por tal motivo se ha considerado la construcción de un aeropuerto internacional en Pisco con la finalidad de lograr cumplir la demanda de dicha región, y lograr descentralizar el AIJCH.

De este modo, es necesario otorgarle un nivel de seguridad y buena funcionalidad a los pavimentos del aeropuerto en mención, de manera que pueda cumplir con las solicitudes demandadas por los aeródromos que en él aterricen.

En la presente tesis se realizará el diseño de los pavimentos de un Aeropuerto Internacional en Pisco, para ello se usará la geometría existente del actual Aeropuerto de Pisco. El aeródromo deberá cumplir requerimientos similares a las del aeropuerto de Lima.

Se empleará las metodologías propuestas por la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos (FAA). Se seguirán las pautas de la FAA mencionadas en las circulares AC 150/5320 6D y AC 150/5320 6F, debido a que en nuestro país no hay una norma para realizar el diseño de pavimentos de un aeropuerto. La circular vigente es la AC 150/5320 6F; sin embargo, es considerado necesario también realizar el diseño por la circular AC 150/5320 6D con la finalidad de usar los resultados de esta como referencia de los resultados obtenidos por la

segunda circular mencionada. Se realizarán dos diseños con cada una: el primero será el diseño de pavimentos flexibles, y el segundo será el diseño de pavimentos rígidos. Finalmente, se realizará el análisis económico, en el que se incluirá la inversión de la ejecución del proyecto, y se elegirá la alternativa más adecuada.

1.2. ANTECEDENTES

En la actualidad, existen 6 zonas de aterrizaje en el departamento de Ica, de los cuales destaca el aeropuerto de Pisco y los aeródromos de Ica y Nazca. Las otras tres zonas de aterrizaje están ubicados en Palpa, Marcona y Nazca.

Ica posee una extensa superficie, con un relieve poco accidentado (es el único departamento de la costa sur del Perú que no tiene montañas andinas en su territorio), cuyo crecimiento demográfico está aumentando.

La infraestructura aeroportuaria de Pisco ha mostrado un atraso en relación a la región, ya que las proyecciones denotan que es posible un fuerte movimiento aeroportuario en dicha zona.¹

1.3. UBICACIÓN

El pavimento de la pista, calles de rodaje y plataforma a diseñar en la presente tesis se encuentra ubicado en el distrito de San Andrés, Provincia de Pisco y Departamento de Ica.

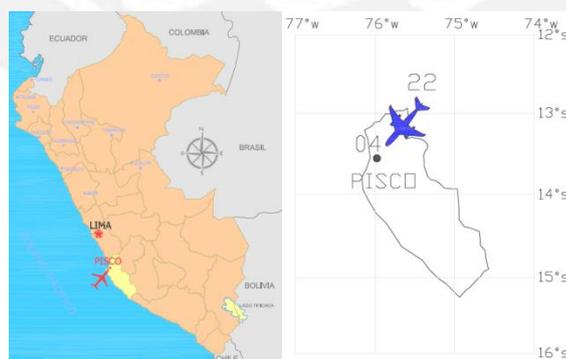


Figura 1. Ubicación del Aeropuerto Internacional de Pisco.
Fuente: Plan Maestro del Aeropuerto de Pisco, 2009

¹ Plan Maestro del Aeropuerto de Pisco

1.4. OBJETIVOS

- **Objetivo general**

El objetivo principal de la presente tesis es efectuar el diseño estructural de los pavimentos destinados para la plataforma aérea, calle de rodaje y pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en Pisco, ubicado en el distrito de San Andrés, en la provincia de Pisco, departamento de Ica.

- **Objetivos específicos**

Para lograr el objetivo general antes descrito, se deberá cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Efectuar el diseño estructural del pavimento flexible según el método de la FAA.
- Efectuar el diseño estructural del pavimento rígido según el método de la FAA
- Calcular el presupuesto de construcción de ambos diseños

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PAVIMENTOS

2.1.1. DEFINICIÓN

Se le denomina pavimento a una estructura estratificada, compuesta de capas superpuestas, las cuales se apoyan sobre la subrasante del área en donde serán construidas. Estas capas están diseñadas de manera tal que resistan los esfuerzos de las cargas repetidas que actuarán en el pavimento durante su período de vida, por ello los materiales de los que está constituida deben ser apropiados y adecuadamente compactados.

Asimismo, los pavimentos deberán presentar una textura que podrá resistir el impacto del vehículo (teniendo en consideración las velocidades que estos tendrán), ser durable y económico para que sea considerado como una buena alternativa.²

² MONTEJO, Alonso. Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño. Tomo I. Tercera edición. Colombia: Universidad Católica de Colombia, 2006, p. 1, 2

2.1.2. DIFERENCIAS ENTRE PAVIMENTOS DE CARRETERAS Y PAVIMENTOS DE AEROPUERTOS

Los pavimentos de un aeropuerto deben ser más rígidos que el de una carretera debido a que deberán resistir mayores cargas y presiones ejercidas por los neumáticos de las aeronaves. Algunas de las diferencias que el autor Yang H. Huang³ señala acerca de los pavimentos de carreteras y aeropuertos son:

- *“El número de repeticiones de carga en los pavimentos de aeródromos son menos recurrentes que el de carreteras.*
- *El diseño de los pavimentos de carreteras está basado en el movimiento de las cargas con cierta duración y en las cargas repetidas que se dan en el pavimento. Por otro lado, el diseño de pavimentos de un aeropuerto está basado en el movimiento de las cargas en el interior de las pistas, y en cargas estacionarias al final de las pistas, de esta manera, se suele usar un mayor grosor de pavimento en el final de las pistas.”*

2.1.3. TIPOS DE PAVIMENTOS

En la presente tesis se analizará el comportamiento de dos tipos de pavimentos: flexible y rígido, los cuales se diferencian por su rigidez, composición, entre otras características descritas a continuación.

2.1.3.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los pavimentos flexibles son estructuras compuestas por capas constituidas de material asfáltico y materiales granulares estabilizados o sin estabilizar. Las capas superiores tienen una mayor resistencia que las inferiores, todas estas se apoyan sobre suelo compactado llamado **subrasante** o suelo soporte. Se diseña de esta manera debido a que en las capas superiores los esfuerzos son mayores, mientras que en las capas inferiores los esfuerzos van decreciendo, pues en cada capa la carga se extiende a un área mayor. Por tanto, este tipo de pavimentos suele presentar una deflexión mayor al pavimento rígido bajo la acción de las cargas.

³ HUANG, Yang. Pavement Analysis and Design. Segunda edición. University of Kentucky, 2004, p. 37, 38, 39

Según la circular AC 150/5320-6D, se debe **estabilizar la subrasante** –en pavimentos flexibles o rígidos- en caso exista uno o más de las siguientes condiciones: drenaje pobre, helada o necesidad de una plataforma totalmente estable. Según la circular AC 150/5320-6F, adicional a las condiciones antes descritas, se le agrega el factor de resistencia de la subrasante, ya que en caso el valor del CBR de esta sea menor a 5, se deberá estabilizar. Las subbases y bases pueden ser estabilizadas mediante estabilización química, mecánica, o mediante el uso de geosintéticos.

La superficie de los pavimentos flexibles suele dañarse al contacto con derivados del petróleo, pues ablandan el betún asfáltico. A continuación se describe cada una de las capas de una sección convencional de pavimento flexible.

- **Carpeta asfáltica:** la carpeta asfáltica es la capa superior del pavimento flexible, sobre esta se aplicarán las cargas directas que serán distribuidas a las capas inferiores. Por tanto, esta capa deberá soportar los máximos esfuerzos de las cargas, así como los efectos abrasivos del tránsito y del medio ambiente.
- **Capa base:** la capa base está situada bajo la carpeta asfáltica, tiene como función transmitir los esfuerzos de la carpeta asfáltica a la subbase con una apropiada intensidad. Usualmente está constituida de material granular. Según la AC 150/5320-6D y la AC 150/5320-6F, hay dos tipos de bases: las bases estabilizadas y las bases sin estabilizar. En la primera circular mencionada se indica que en caso la carga de la aeronave de diseño es mayor a 100,000 libras, será necesario estabilizar la base, excepto en los casos en que se cuente con material disponible para esta capa cuyo CBR sea de mayor o igual a 100. La misma condición se cumple para la circular AC 150/5320-6F, si es que en el tráfico aéreo hay aeronaves cuyas cargas brutas sean iguales o mayores a 100,000 libras.
- **Capa subbase:** está situada bajo la capa base, está compuesta por materiales de menor resistencia debido a que su función es transmitir esfuerzos de la base a la subrasante, los cuales son de menor intensidad que en las capas superiores. Asimismo, impide que los finos de la subrasante contaminen la base. Al igual que la capa base, usualmente esta capa está constituida de material granular. Según la FAA, se requiere de esta capa cuando el valor del

CBR de la subrasante es menor a 20. Según la AC 150/5320-6D y la AC 150/5320-6F, es necesario estabilizar en caso la carga de la aeronave de diseño sea mayor a 100,000 libras (para la primera circular) o si es que en el tráfico aéreo hay aeronaves cuyas cargas brutas sean iguales o mayores a 100,000 libras (para la segunda circular), excepto en los casos en que el CBR de esta capa sea de mayor o igual a 35.

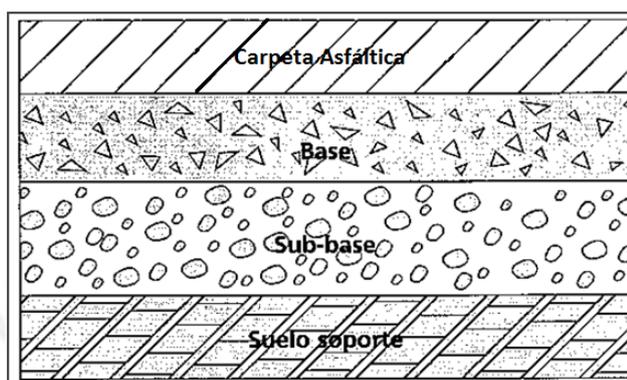


Figura 2. Sección Típica de Pavimento Flexible.
Fuente: CARRASCO, Pedro Pablo. Evaluación de pavimentos aeroportuarios, 2002

2.1.3.2. PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los pavimentos rígidos están contruidos a base de concreto hidráulico, el cual se puede colocar sobre una capa base (o subbase), cuyas características son las mismas descritas para pavimentos flexibles. La elección entre capa base o subbase dependerá de la intensidad de cargas, volumen de tráfico, entre otros factores.

Los principales motivos para el uso de la capa base en pavimentos rígidos son los siguientes:

- Reducción del esfuerzo en el concreto
- Control de bombeo del pavimento rígido, de manera que se prevé los espacios vacíos y fisuras ocasionados por este fenómeno
- Control de cambios de temperatura, con lo cual se controla las fisuras y ablandamiento de la subrasante⁴.

⁴ HUANG, Yang. Pavement Analysis and Design. Segunda edición. University of Kentucky, 2004, p. 13, 14

a) Juntas de pavimentos rígidos (AC 150/5320-6D)

La circular del 1995 de la FAA menciona que es preciso colocar juntas en pavimentos rígidos con la finalidad de reducir altos grados de esfuerzo dentro de la estructura y fisuras originadas por las variaciones de temperatura u otros factores que ocasionen un cambio en el volumen del pavimento.

Las juntas de los pavimentos rígidos están categorizadas según la función para las que están diseñadas, las cuales se describen a continuación:

- **Juntas de expansión/aislamiento:** la función de estas juntas es aislar tanto la intersección del pavimento, como la estructura del mismo. Suelen usarse en caso hayan diferencias en la dirección de movimiento de las aeronaves, por ejemplo entre una calle de rodaje de conexión y una pista de aterrizaje. Existen dos tipos de juntas de aislamiento: la junta de aislamiento tipo B es utilizada cuando se dificulta el uso de dowels y se forman incrementando el espesor del pavimento a lo largo del borde de la losa; por otro lado, la junta de aislamiento A es usada en caso no se quiera realizar el incremento del espesor de la junta al borde de la losa. En las siguientes figuras (Figura 3 y Figura 4) se muestran las juntas de aislamiento y los detalles de las mismas.
- **Juntas de contracción:** la función de las juntas de contracción es controlar las fisuras del pavimento ocasionadas por la contracción debido al descenso de humedad o temperatura. Asimismo, estas juntas controlan la deformación del pavimento rígido. En las siguientes figuras (Figura 3 y Figura 4) se muestran las juntas de contracción, las cuales pueden ser tipo F, G o H y los detalles de las mismas.
- **Juntas de construcción:** se requieren juntas de construcción en caso las losas de concreto hayan sido colocadas en momentos distintos. En la Figura 3 se muestran las juntas de construcción tipo C y D y el detalle de las mismas.

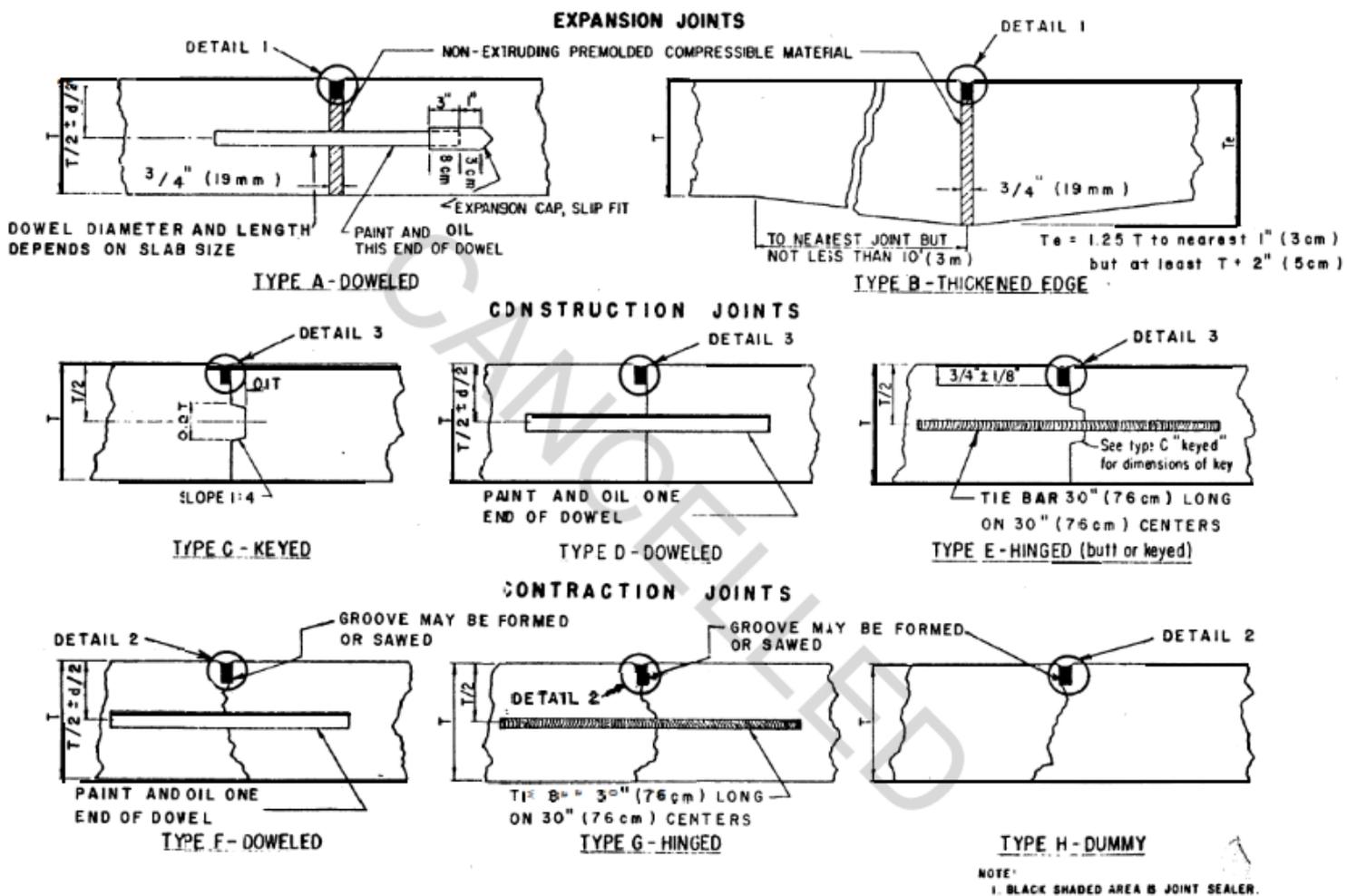


Figura 3. Tipo de Juntas de Pavimentos Rígidos AC 150/5320-6D. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995

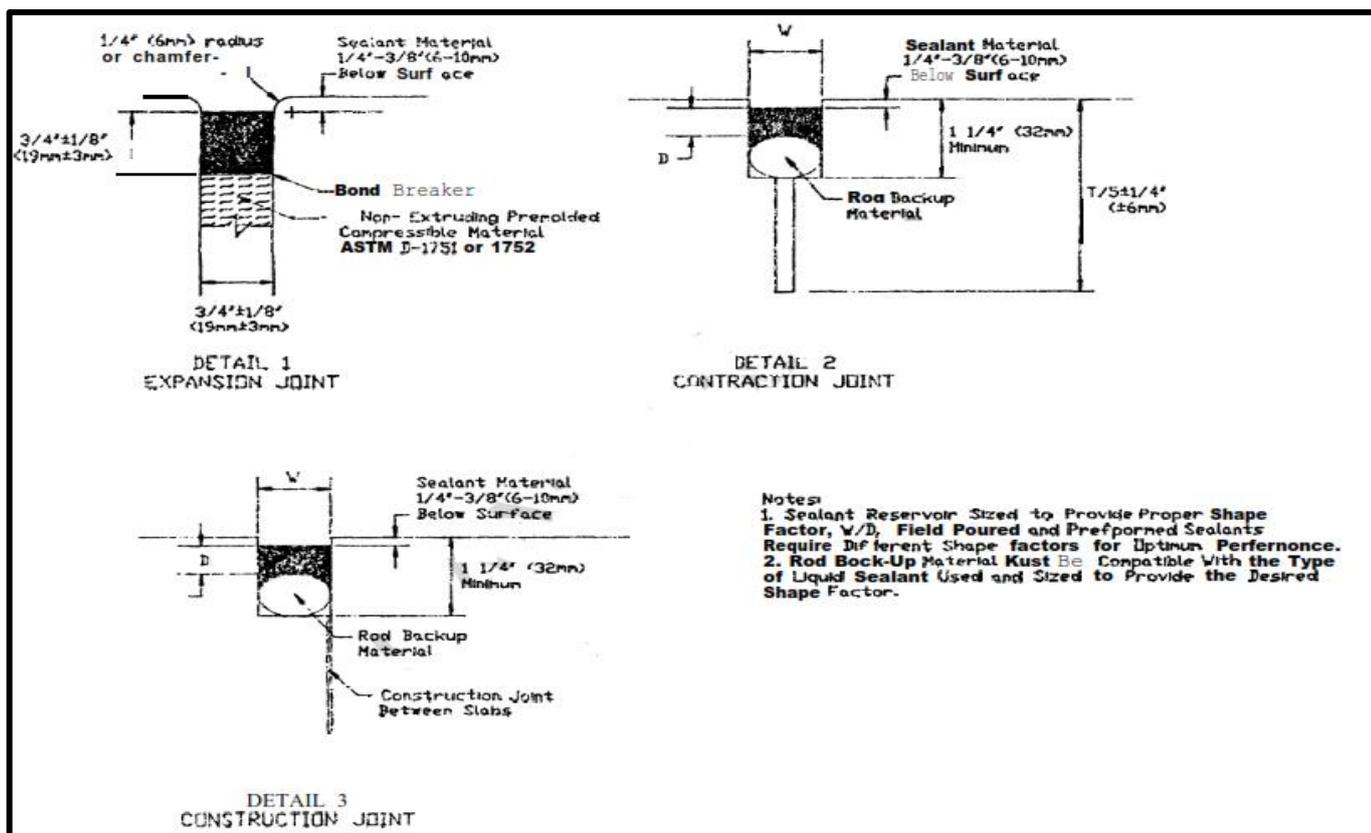


Figura 4. Detalles de Juntas de Pavimentos Rígidos AC 150/5320-6D. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995

Espaciamiento de las juntas

Según la FAA⁵, el espaciamiento de juntas pavimento con base estabilizada debe ser seleccionado de manera que la relación entre el espaciamiento de la junta y el radio de rigidez relativa esté entre 4 y 6; el radio de rigidez relativa se define por Westergaard como la rigidez de la losa con respecto a la rigidez de la subbase y está determinado en la siguiente fórmula:

$$l = \left(\frac{Eh^3}{12(1 - u^2)k} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Donde:

l = Radio de rigidez (en pulgadas)

E = Módulo elástico del concreto (en psi)

h = Espesor de la losa (en pulgadas)

⁵ FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos. 1995

u = Módulo de Poisson del concreto

k = Módulo de reacción de la subrasante

Por otro lado, en caso de un pavimento con subbase no estabilizada, se deberá seguir las recomendaciones de la FAA presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 1. Espaciamiento Máximo de Juntas para Pavimento Rígido con subbase no estabilizada.
Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995

Espesor de la losa		Transversal		Longitudinal	
Pulgadas	Milímetros	Pies	Metros	Pies	Metros
6	150	12.5	3.8	12.5	3.8
7-9	175-230	15	4.6	15	4.6
9-12	230-305	20	6.1	20	6.1
>12	>305	25	7.6	25	7.6

Consideraciones de juntas

Según la FAA (Ref. 5), es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las juntas de construcción tipo C no deben ser utilizadas para losas con un espesor menor a 9”.
- El comportamiento del pavimento puede ser bajo si se emplean juntas de construcción tipo C en caso aeronaves de fuselaje ancho hagan uso de estos. Por tanto, es necesario considerar los siguientes usos en función a la resistencia de la subbase:
 - Subbase de baja resistencia: para subbases de módulo de 200 PCI o menos, es recomendado usar juntas de construcción tipo D o B.
 - Subbase de resistencia media: para subbase de módulo entre 200 PCI y 400 PCI, las juntas de construcción tipo D pueden ser utilizadas, así como las tipo D y B
 - Subbase de alta resistencia: para subbase de módulo de 400 PCI o más, las juntas de construcción tipo C pueden ser usadas.

Dowels y Barras de Amarre

Según la FAA (Ref. 5), se puede emplear barras de amarre o dowels para las juntas de pavimentos rígidos.

- **Barras de amarre:** se utilizan en ciertas juntas de contracción longitudinal para mantener las caras de la losa en contacto. Las barras de amarre no actúan como dispositivos de transferencia de carga por sí mismas. Al prevenir la amplia grieta de la junta, la transferencia de carga es realizada por la trabazón de los agregados. Estas barras deben tener la capacidad de deformarse, un diámetro de

5/8" (16mm), una longitud de 30" (760mm) y un espaciamiento entre ellas de 30" (760mm) al eje.

- **Dowels:** se utilizan para generar transferencia de carga a través de la junta y para prevenir el desplazamiento vertical relativo de los extremos de losa adyacente. Los dowels permiten el movimiento longitudinal de las losas adyacentes. Los dowels de juntas de contracción deben proporcionar al menos tres uniones de un borde libre. Por otro lado, los dowels deben ser de un tamaño tal que resistan los esfuerzos de cizallamiento y flexión producidos por las cargas sobre el pavimento, y de una longitud y espaciado tal que las tensiones de rodamiento ejercidas sobre el concreto no provoquen el fallo de la losa. Los dowels transversales requerirán el uso de una canastilla para dowels, lo cual deberá estar firmemente anclado a la subbase para mantenerlos en posición.

Tabla 2. Dimensiones y espaciamiento de dowels.

Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995

Espesor de la losa (en pulgadas)	Diámetro (en pulgadas)	Longitud (en pulgadas)	Espaciamiento (en pulgadas)
6-7	3/4	18	12
8-12	1	19	12
13-16	1 1/4	20	15
17-20	1 1/2	20	18
21-24	2	24	18

- **Cantidad de acero embebido:** a continuación se muestra la fórmula que determina la cantidad de acero requerido:

$$A_s = \frac{(3.7)L^2t}{f_s}$$

A_s = área del acero por pie de ancho o longitud, en pulgadas al cuadrado

L =longitud o ancho de la losa, en pies

t =espesor de la losa, en pulgadas

f_s =esfuerzo de tensión permisible en el acero, en psi

b) Juntas de pavimentos rígidos (AC 150/5320-6F)

La circular vigente tiene algunas variaciones en las consideraciones de las juntas de pavimentos rígidos a comparación de la anterior circular; sin embargo, las

categorías de las juntas se mantienen (aislamiento, contracción y construcción). Las juntas longitudinales deben diseñarse para minimizar los cambios en el ancho del pavimento

A continuación se mencionan las clases de juntas y los tipos dentro del mismo grupo:

- **Juntas de aislamiento:** existen dos tipos de juntas de aislamiento: la junta de aislamiento tipo A (figura 5) se forma aumentando el espesor del pavimento a lo largo del borde de la losa; por otro lado; la junta de aislamiento A-1 (figura 6) es usada en caso no se pueda realizar el incremento del espesor de la junta al borde de la losa, estas están reforzadas para proporcionar una capacidad de carga equivalente al borde engrosado, y solo pueden usarse para pavimentos cuyo espesor es mayor a 228 mm.
- **Juntas de contracción:** en la figura 7 se muestran las juntas de contracción, las cuales pueden ser tipo B, C o D.
- **Juntas de construcción:** en la figura 7 se muestra el detalle de la junta de construcción tipo E y F.

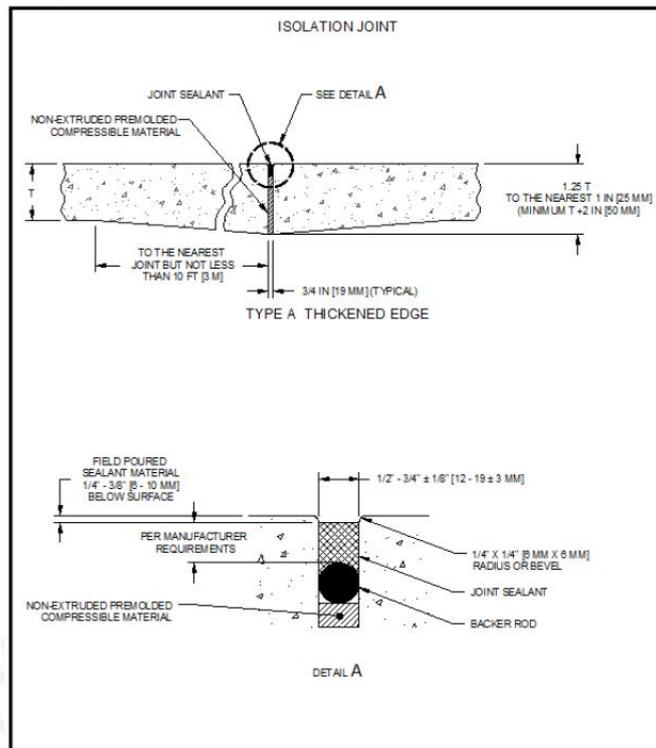


Figura 5. Juntas de aislamiento tipo A de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

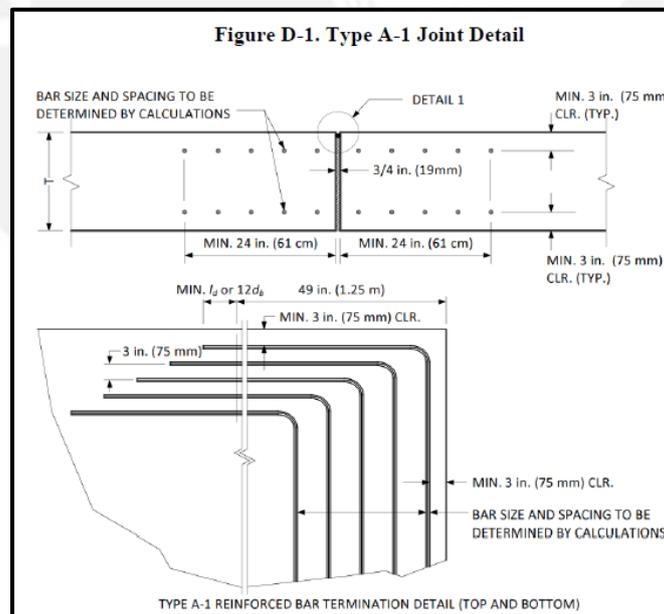


Figura 6. Juntas de aislamiento tipo A-1 de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

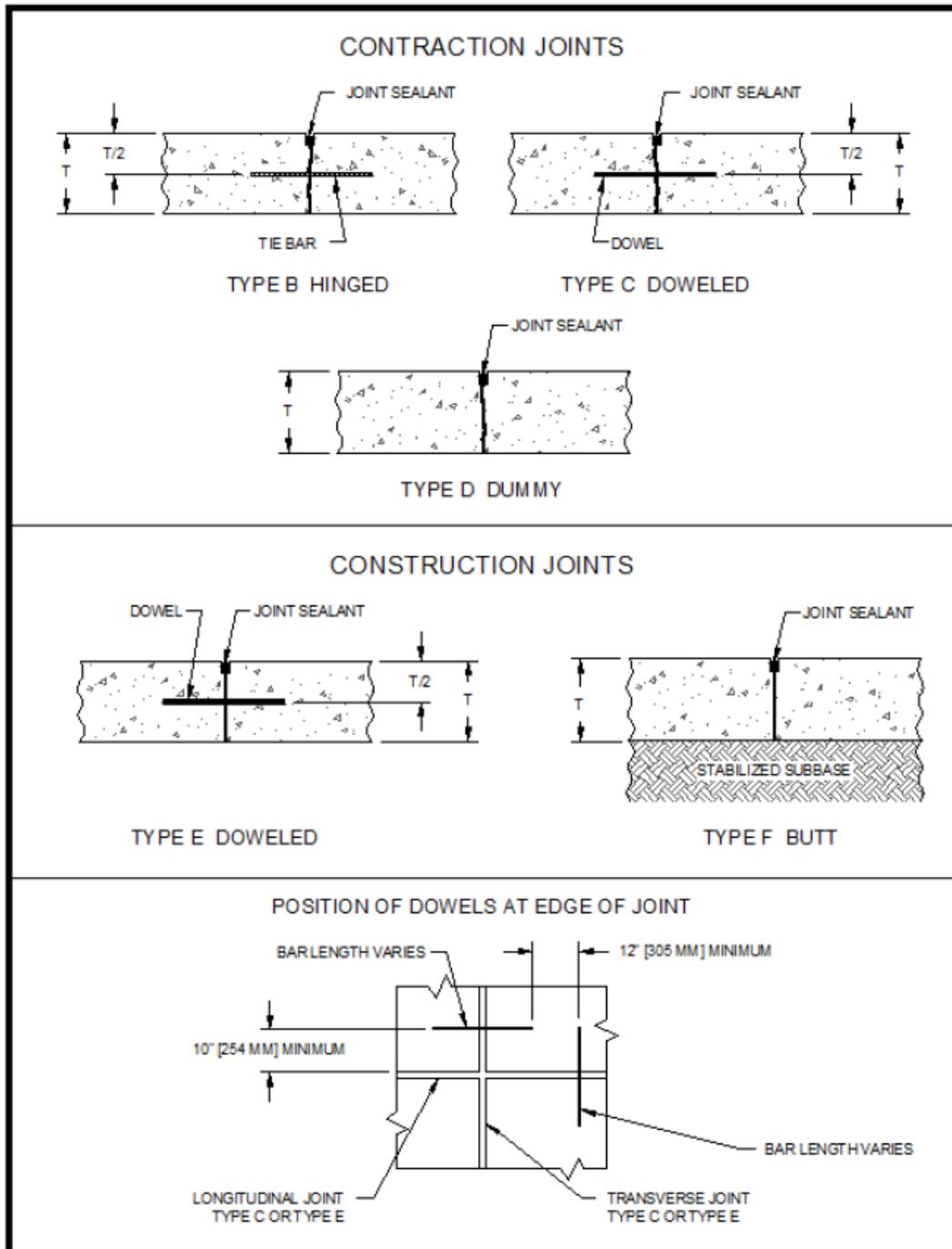


Figura 7. Juntas de contracción y construcción de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F.
 Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

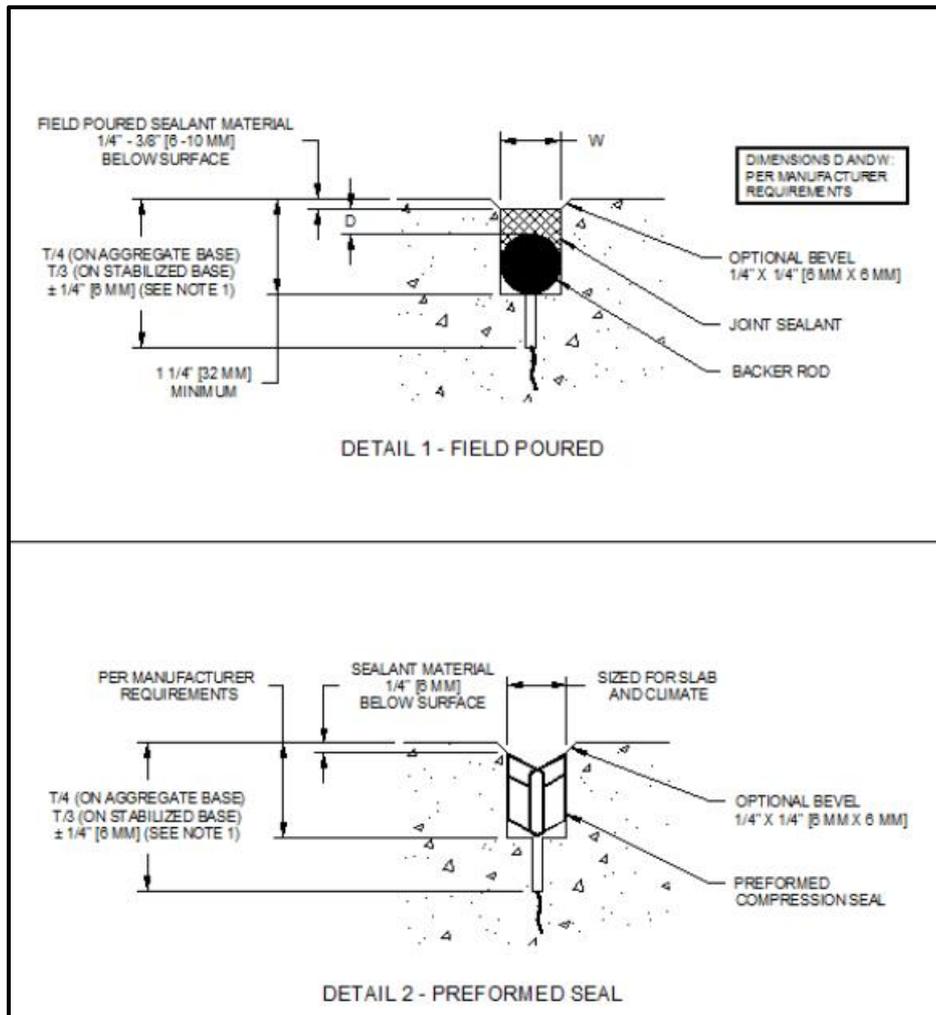


Figura 8. Detalles de juntas de pavimentos rígidos AC 150/5320-6F. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

Tabla 3. Tipo de juntas de pavimentos. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

Tipo	DESCRIPCIÓN	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
A	Engrosado de junta - Junta de aislamiento	Usado en: - Intersecciones del pavimento - Borde libre del pavimento, donde habrán futuras expansiones - Borde de estructuras	Usado en: - Las intersecciones del pavimento, cuando el eje longitudinal intersecta en un ángulo. - El borde libre de pavimentos, donde habrán futuras expansiones.
A-1	Junta de aislamiento reforzada	Usado en: - Intersecciones del pavimento - Borde libre del pavimento, donde habrán futuras expansiones - Borde de estructuras	Usado en: - Intersecciones del pavimento - Borde libre del pavimento, donde habrán futuras expansiones - Borde de estructuras
B	Hinged - Junta de contracción	Para todas las juntas de contracción en el pavimento de calles de rodaje cuyo espesor es menor a 9".	No se utiliza, excepto para losas de espesor < 9" cuando se usa 'anillo de tensión'
C	Dowel - Junta de contracción	Para juntas de contracción, considere un espesor mayor a 9 pulgadas, donde la junta esté ubicada a 20 pies (6 metros) o menos del borde libre del pavimento	Usado en las tres últimas juntas antes del borde libre, y en las tres juntas a ambos lados de las juntas de aislamiento.
D	Dummy - Junta de contracción	Para todas las juntas de contracción en el pavimento	Para todas las otras juntas de contracción.
E	Dowel - Junta de construcción	Todas las juntas de construcción, excepto las juntas de aislamiento.	Usado para las juntas de construcción en todos los lugares que separen las operaciones sucesivas de pavimentación
F	Butt - Junta de construcción	Usado en todas las juntas de construcción para pavimentos que sirven a aviones de menos de 30,000 libras (13,610 kg) sobre una base estabilizada.	Usado en todas las juntas de construcción para pavimentos que sirven a aviones de menos de 30,000 libras (13,610 kg) sobre una base estabilizada.

Dowels y Barras de Amarre

Según la FAA⁶, se puede emplear barras de amarre o dowels para las juntas de pavimentos rígidos.

- **Barras de amarre:** se utilizan en losas de espesor menor o igual a 9 pulgadas (223 mm) para juntas de contracción longitudinal que se encuentren a menos de 20 pies (6 m) del borde libre, para mantener las caras de la losa en contacto. Las barras de amarre no actúan como dispositivos de transferencia de carga por sí mismas, al prevenir la amplia grieta de la junta, la transferencia de carga es realizada por la trabazón de los agregados. Para losas de espesor menor o igual a 6 pulgadas (150 mm), las barras de amarre deberán tener una longitud de 20 pulgadas (510 mm), un diámetro de 1/2" (No. 4) y un espaciamiento entre ellas de 36 pulgadas (900 mm). Para losas de espesor mayor o igual a 6 pulgadas (150 mm), las barras de amarre deberán tener una longitud de 30 pulgadas (762 mm), un diámetro de 5/8" (No. 5) y un espaciamiento entre ellas de 30 pulgadas (760mm) al eje.
- **Dowels:** se utilizan para generar transferencia de carga a través de la junta y para prevenir el desplazamiento vertical relativo de los extremos de losa adyacente. Los dowels permiten el movimiento longitudinal de las losas adyacentes. Los dowels de juntas de contracción deben proporcionar al menos tres uniones de un borde libre. Por otro lado, estos deben ser de un tamaño tal que resistan los esfuerzos de cizallamiento y flexión producidos por las cargas sobre el pavimento, y de una longitud y espaciado tal que las tensiones de rodamiento ejercidas sobre el concreto no provoquen el fallo de la losa. Los dowels transversales requerirán el uso de una canastilla, lo cual deberá estar firmemente anclado a la subbase para mantenerlos en posición.

⁶ FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos. 2016

Tabla 4. Dimensiones y espaciado de los dowels. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

Espesor de la losa		Diámetro		Longitud		Espaciado	
Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros	Pulgadas	Milímetros
6-7	152-178	$\frac{3}{4}$	20	18	460	12	305
7.5-12	191-305	1	25	18	460	12	305
12.5-16	318-406	1 $\frac{1}{4}$	30	20	510	15	380
16.5-20	419-508	1 $\frac{1}{2}$	40	20	510	18	460
20.5-24	521-610	2	50	24	610	18	460

Material para juntas

El material que se usará en las juntas son los selladores de juntas y rellenos. Los selladores son usados en todas las juntas para evitar la entrada de agua o algún material extraño. En las juntas de aislamiento se emplea un relleno compresible premoldeado para acomodar el movimiento de las losas, y se aplica un sellador sobre el relleno. La profundidad (D) y el ancho (W) del sellador de junta está en función del tipo de material sellante (ver figura 8 para mayor detalle).

Diseño de juntas

Para realizar el diseño de juntas de pavimento es necesario elegir el tipo de juntas, espaciado y dimensiones apropiadas para asegurar que las juntas se desempeñen de manera adecuada.

Se deberá considerar las siguientes especificaciones cuando se realice el diseño de juntas para intersecciones:

- Juntas de aislamiento: los pavimentos que se intersecten, como una calle de rodaje y una pista, deben aislarse para permitir que los pavimentos se muevan de manera independiente. Asimismo, en lugares donde es necesario cambiar el patrón de las juntas, se requiere juntas de aislamiento.
- Losas de forma irregular o losas con estructuras u otros elementos empotrados: para evitar las grietas es recomendable mantener secciones que sean casi cuadradas o rectangulares; sin embargo, en caso las losas sean irregulares, o en caso la relación entre la longitud y anchura sea superior a 1.25, es necesario colocar acero embebido. La cantidad del acero no deberá ser mayor a 0.05% del área de la sección transversal bruta de la losa en ambas

direcciones. Asimismo, en caso haya en el pavimento una estructura empotrada, el acero deberá estar colocado alrededor de la misma. Pese a que el acero no previene el agrietamiento, ayuda a que las grietas formadas se encuentren relativamente cerradas, lo cual permite que el rendimiento de la losa del pavimento se mantenga. Adicionalmente, al mantener las grietas cerradas, el acero minimiza la infiltración de desechos en las grietas.

Espaciamiento de Juntas

Los pavimentos rígidos apoyados sobre una **base estabilizada** están sujetos a mayores tensiones de deformación. Se recomienda un espaciamiento máximo de 20 pies (6 m) para losas iguales o de mayor espesor a 16" (406 mm). La relación del lado más largo y el lado más corto de una losa no debe exceder 1.25 en pavimentos no reforzados. La separación máxima de las juntas para bases estabilizadas y no estabilizadas se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 5. Dimensiones y espaciamiento de juntas para bases no estabilizadas. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

Espesor de la losa		Espaciamiento de Juntas	
Pulgadas	Milímetros	Pies	Metros
≤6	≤152	12.5	3.8
6.5-9	165-229	15	4.6
>9	>229	20	6.1

Tabla 6. Dimensiones y espaciamiento de juntas para pavimentos con bases estabilizadas. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

Espesor de la losa		Espaciamiento de Juntas	
Pulgadas	Milímetros	Pies	Metros
8-10	203-254	12.5	3.8
10.5-13	267-330	15	4.6
13.5-16	343-406	17.5	5.3
>16	>406	20	6.1

Transición entre pavimento rígido y flexible

Cuando el pavimento rígido limita en una sección de pavimento flexible, se debe proporcionar una transición utilizando un detalle similar al indicado a continuación:

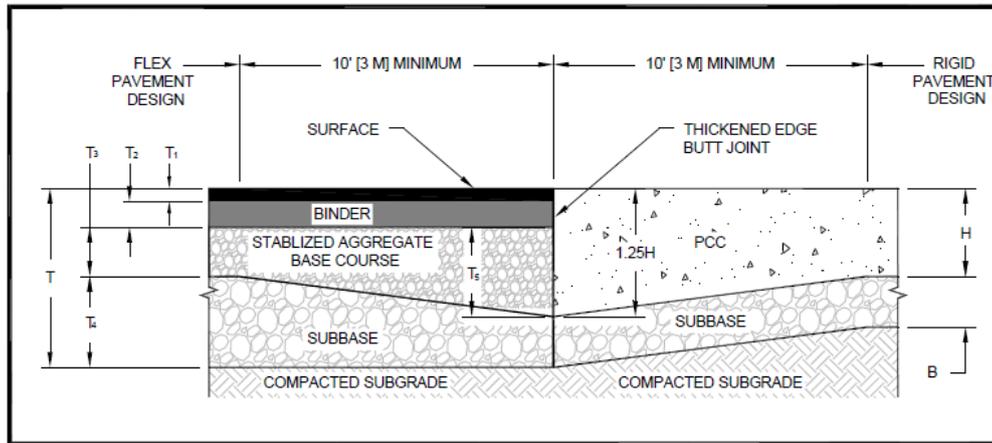


Figura 9. Transición entre pavimento rígido y flexible. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

Donde, los espesores T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T y H son los espesores obtenidos según el diseño. El espesor T_5 es igual a $(H + B) - (T_1 + T_2) o 2(T_3)$, el que sea mayor. El objetivo es que en el punto de transición coincida la elevación de la subrasante en ambos lados, así como proporcionar una base estabilizada bajo el pavimento flexible.

2.1.4. DETERMINADAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MATERIALES USADOS EN LAS CAPAS DE PAVIMENTOS

La circular de la FAA AC 150/5370-10G especifica los estándares de los materiales usados para la construcción de los pavimentos de aeropuertos. Tal como se mencionó en el anterior ítem, la estructura típica del pavimento es según la siguiente figura:

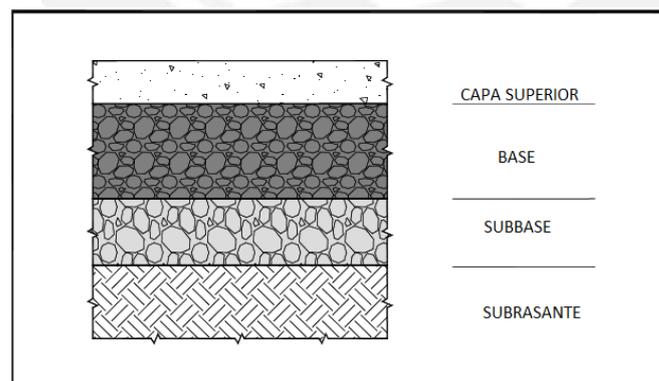


Figura 10. Estructura típica del pavimento. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

En la siguiente tabla se muestran los materiales típicos usados en las capas de pavimento:

Tabla 7. Especificaciones de las capas de pavimentos. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

CAPA DEL PAVIMENTO	ÍTEM *
Capa Superior	P-401 Mezcla asfáltica en caliente
	P-403 Mezcla asfáltica en caliente utilizada en bases estabilizadas
	P-501 PCC Concreto de Cemento Portland
Base estabilizada	P-401/403
	P-304 Base Cementada
	P-306 Concreto Magro
Base	P-209 Capa base de agregado granular
	P-208 Capa base de agregado fino y grueso
	P-211 Fragmentos de roca limolita
Subbase	P-154 Capa Subbase
	P-213 Capa Subbase de Arena-Arcilla
	P-219 Capa Subbase de Concreto Reciclado

(*) La nomenclatura P-401, P-403... etc, corresponden a la denominación que la FAA asigna a distintos tipos de materiales. Para mayor detalle, ver Anexo 3.

En el Anexo 4 se han incluido mayores detalles de las especificaciones de los ítems mencionados.

2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS PAVIMENTOS DE UN AEROPUERTO

2.2.1. PISTAS

Según la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 2006) se le denomina pista al *“Área rectangular definida en un aeródromo terrestre preparada para el aterrizaje y el despegue de las aeronaves.”*



Figura 11. Pista. Fuente: OACI, 2005

La seguridad y eficiencia en el aterrizaje y despegue de los aviones depende en gran medida con el buen diseño de las pistas, es por ello que se deberá considerar las características de las aeronaves, tanto físicas como geométricas, así como los materiales a emplear, entre otros aspectos.

A cada aeródromo se le atribuye un código de referencia constituido por un dígito y una letra, el objetivo es relacionar de una manera simple la envergadura del aeropuerto según las aeronaves que en él operan. El número contenido en el código hace referencia al largo de la pista, mientras que la letra la envergadura de las alas y la distancia externa del tren de aterrizaje principal de la aeronave.

Tabla 8. Categoría OACI de Pista - Código Número. Fuente: OACI. Manual de diseño de aeródromos. Anexo 14. Volumen I: diseño y operaciones de aeródromos, 2013

Código (Número)	Longitud de Pista
1	hasta 800 m
2	de 800 m hasta 1,200 m
3	de 1,200 m hasta 1,800 m
4	más de 1,800 m

Tabla 9. Categoría de Pista - Código Letra. Fuente: OACI. Manual de diseño de aeródromos. Anexo 14. Volumen I: diseño y operaciones de aeródromos, 2013

Código (Letra)	Envergadura de Alas	Distancia Externa del Tren de Aterrizaje	Ejemplos de Aeronaves
A	hasta 15m	hasta 4.5m	
B	de 15m hasta 24m	de 4.5m hasta 6.0m	
C	de 24m hasta 36m	de 6.0 m hasta 9.0m	McDonnell Douglas MD-81, Airbus A318, Airbus A319, Airbus A320, Airbus A321, Boeing 737
D	de 36m hasta 52m	de 9.0m hasta 14.0m	McDonnell Douglas MD-11, Airbus A300, Boeing 757, Boeing 767
E	de 52m hasta 65m	de 9.0m hasta 14.0m	Airbus A340, Boeing 747, Boeing 777
F	de 65m hasta 80m	de 14.0m hasta 16.0m	Airbus A380

Asimismo, junto a las pistas de aterrizaje y despegue hay elementos necesarios en los aeródromos que permiten el correcto aterrizaje y despegue de las aeronaves y minimizan los posibles accidentes ocasionados en las mismas, los cuales son:

- Margen
- Franjas de pista
- Zonas de parada
- Zonas libres de obstáculos
- Áreas de seguridad de extremo de pista ⁷



Figura 12. Zonas aledañas a la pista. Fuente: OACI, 2005

A continuación explicará la función y características de cada uno de estos elementos.

⁷ OACI. Manual de diseño de aeródromos, parte 1. Pistas. 2005.

- **Margen**

De acuerdo a lo referido por la OACI, el margen de pista es “una banda de terreno que bordea un pavimento, tratada de forma que sirva de transición entre ese pavimento y el terreno adyacente”. Es decir, mediante el uso de márgenes pavimentados se prevé la erosión del suelo de la franja de pista ocasionada por reactores y se protegen los bordes del pavimento de la pista.

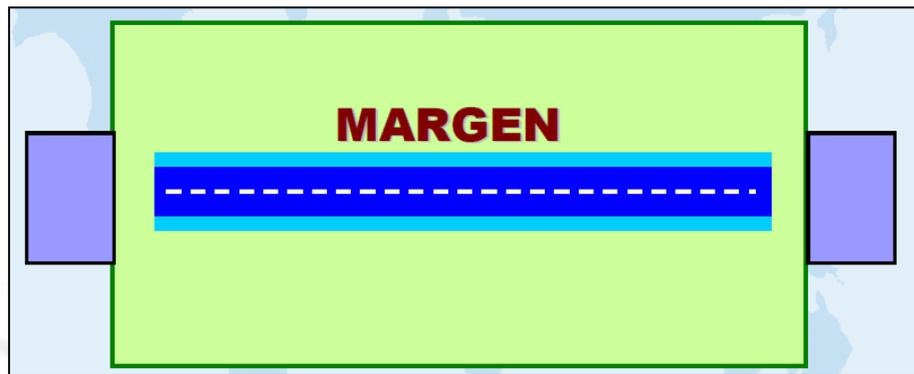


Figura 13. Margen de Pista. Fuente: OACI, 2005

Es necesaria la construcción de márgenes pavimentados sobre todo en pista cuya letra clave sea D, E o F. Deberán resistir el peso de las aeronaves que puedan salir de la pista de manera adecuada sin presentar alguna deficiencia estructural.

- **Franjas de Pista**

“Superficie definida que comprende la pista y la zona de parada, si la hubiese” (OACI). La principal función de este es proteger a los aviones, ya sea durante el despegue y aterrizaje o en caso se salgan de la pista.

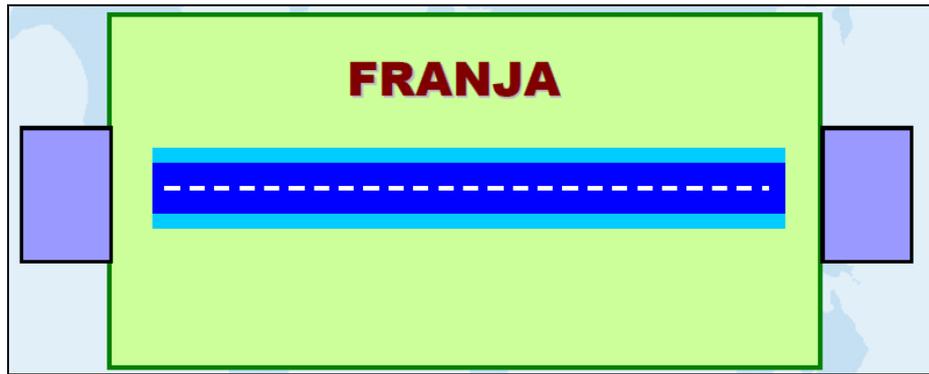


Figura 14. Franja de Pista. Fuente: OACI, 2005

- **Áreas de Seguridad de Extremo de Pista (Runway End Safety Area - RESA)**

Las áreas de seguridad de extremo de pista son extensiones de la franja de la pista, su función es proteger a las aeronaves cuyo aterrizaje o despegue haya sido más prolongado o corto de lo usual. Estas deben contar con una resistencia suficiente para poder soportar las cargas de dichas aeronaves.



Figura 15. Resa. OACI, 2005

- **Zonas Libres de Obstáculos**

Según la OACI, es el área que se encuentra despejada de manera que la aeronave pueda realizar parte del ascenso inicial hasta determinada altura. La longitud de esta deberá ser menor a la mitad de la longitud de recorrido de despegue disponible y en el extremo del mismo deberá iniciar la zona libre de obstáculos.

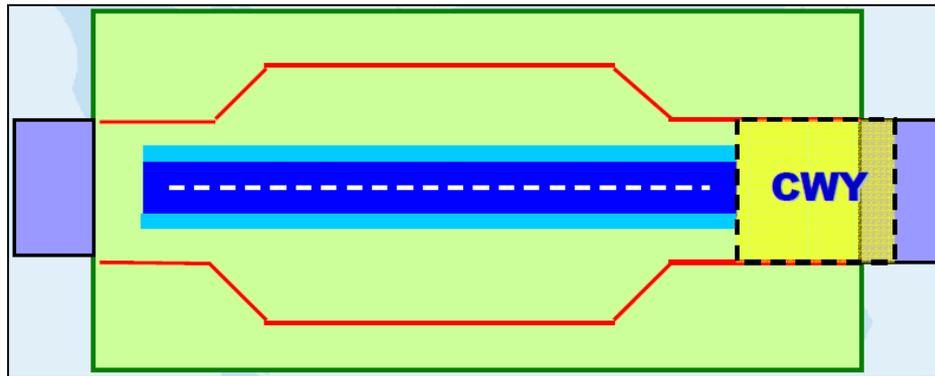


Figura 16. Zona libre de obstáculos. Fuente: OACI, 2005

e

Parada

Es una zona ubicada en la prolongación del recorrido de despegue disponible. Deberá tener una resistencia tal que soporte el peso de las aeronaves que, en caso de sufrir un despegue interrumpido, tengan que aterrizar en dicha superficie. El ancho de la zona de parada será el mismo al de la pista de aterrizaje.

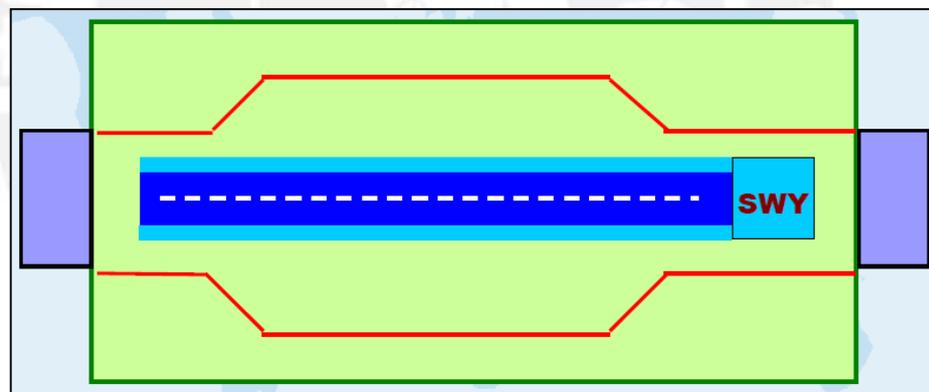


Figura 17. Zona de parada. Fuente: OACI, 2005

2.2.2. CALLES DE RODAJE

La calle de rodaje es el área que tiene por función conectar las pistas, terminales de pasajeros y mercancías, áreas de aparcamiento, servicios de aeronaves u otra instalación de un aeródromo.

Se deberán diseñar de manera tal que las aeronaves puedan mantener una velocidad constante en ella, por tanto es recomendable que el trayecto de esta sea el menor posible, es decir, procurar que los tramos sean rectos y evitar que

se crucen con pistas u otras calles de rodaje, en las zonas donde hayan cambios de dirección (las cuales deberán ser las menores posibles) diseñarlas con radios lo suficientemente grandes como para evitar el flujo continuo de los aviones.

Es necesario que los aeropuertos puedan cumplir con las demandas requeridas, el sistema de calles de rodaje es fundamental para ello debido a que, en caso las aeronaves lleguen y salgan con una mínima separación, el sistema pueda permitir que el flujo se mantenga uniforme y constante.

Las calles de rodaje presentes en un aeródromo son las siguientes:

- Calles de rodaje de entrada y salida
- Calles de rodaje situadas en la plataforma ⁸

A continuación se explicará la función y características de las calles de rodaje mencionadas.

- **Calles de rodaje de entrada y salida**

La función de las calles de salida es *“reducir al mínimo el tiempo de ocupación de la pista por las aeronaves que aterrizan”* (OACI, 2006). Con ello se evita limitar la capacidad del aeródromo en cuanto al número de aeronaves que puedan aterrizar en él.

En caso la calle de salida se encuentre en ángulo agudo (entre 45° y 25°) respecto a la pista, la aeronave podrá realizar la transición con una velocidad necesaria para poder salir de la pista de manera rápida, a este tipo de calle de rodaje se le denomina **calle de salida rápida**.

⁸ OACI. Manual de diseño de aeródromos, parte 2. Calles de rodaje, plataformas y apartaderos de espera. 2005.

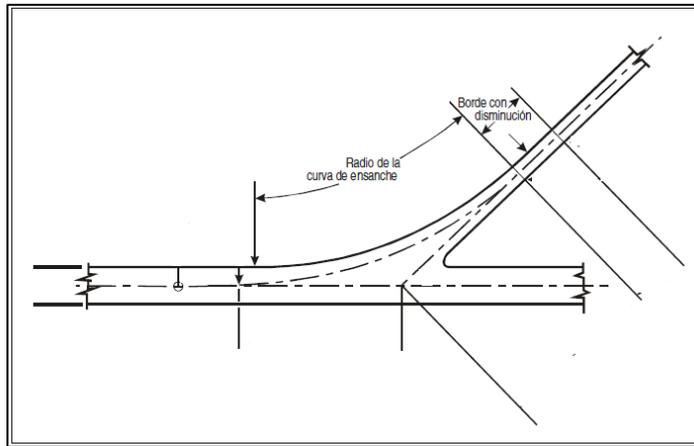


Figura 18. Esquema de Calle de Salida Rápida. Fuente: OACI Manual de diseño de aeródromos, parte 2: calles de rodaje, plataforma y apartaderos de espera. 2005

Por otro lado, las calles de entrada tienen como propósito atender los despegues realizados en las pistas. La OACI recomienda que solo se diseñe una entrada en la pista, en caso se requieran más se pueden añadir desviaciones, apartaderos de espera o entradas múltiples de la pista.

- **Calles de rodaje en Plataformas**

Las calles de rodaje en la plataforma permiten el rápido acceso de y fluidez de las aeronaves en las plataformas, dado que están diseñadas para "proporcionar un trayecto directo para el rodaje a través de la plataforma o para tener acceso a un puesto de estacionamiento de aeronaves" (OACI, 2006) de manera que se logre mantener un flujo constante.

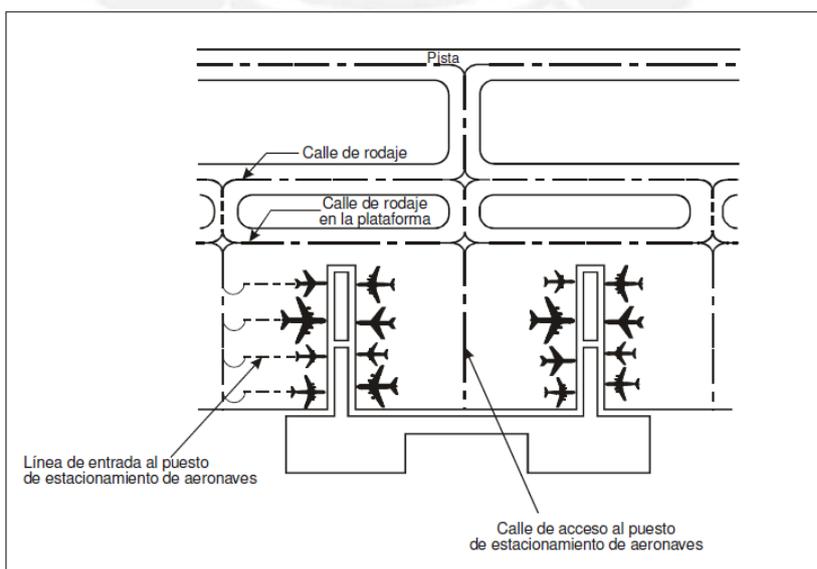


Figura 19. Calles de rodaje en plataformas. Fuente: OACI. Manual de diseño de aeródromos, parte 2: calles de rodaje, plataforma y apartaderos de espera. 2005

2.2.3. PLATAFORMAS

Según la OACI, se denomina plataforma al área en donde las aeronaves se pueden aparcar para el embarque o desembarque de pasajeros, así como para realizar el mantenimiento, abastecimiento de combustibles, entre otras actividades. Las plataformas deben diseñarse de manera que cumpla con los procedimientos de seguridad operacional. *“La seguridad operacional en este contexto entraña que las aeronaves mantengan las distancias libres especificadas y sigan los procedimientos establecidos para entrar en las áreas de plataformas, desplazarse dentro de las mismas y salir de ellas.”* (OACI). Asimismo, la geometría de las plataformas debería llegar a cumplir con los requisitos para asegurar un flujo constante de las aeronaves de manera que se pueda cumplir con la capacidad y demanda de la misma, del mismo modo, deberá permitir que los aviones puedan realizar las maniobras necesarias para entrar y salir de los puestos de estacionamiento.

Existen varios tipos de plataforma según la función de las mismas, algunas de estas son:

- Plataforma del terminal de pasajeros
- Plataforma del terminal de carga
- Plataforma de estacionamiento
- Plataforma de servicio y de hangeres
- Plataforma para la aviación general

2.3. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

2.3.2. ESTUDIO DEL TRÁFICO

El tránsito es uno de los más importantes factores que influye en el diseño de pavimentos, la consideración del tránsito debe incluir la magnitud y configuración de la carga y el número de repeticiones de la misma.

Para poder realizar la proyección del tráfico aéreo, es necesario reunir información sobre el movimiento de años anteriores, de manera que se pueda deducir una tendencia futura.

2.3.3. ESTUDIO DE SUELOS

El estudio de suelos es altamente importante en el diseño de pavimentos de un aeropuerto, debido a que este será quien le dé soporte a la estructura. De manera que, si el suelo no es muy resistente, el espesor del pavimento será mayor, o, tal como se mencionó en el acápite 2.1 *Pavimentos*, se deberá estabilizar la subrasante.

Para poder determinar información acerca de los distintos tipos de suelos, los ensayos realizados deberán determinar la distribución y propiedades físicas de estos. Según la FAA, las investigaciones de las condiciones del suelo donde será emplazado el pavimento deberán incluir:

- Estudio de suelos: es necesario elaborar un estudio de suelos para determinar su perfil, y con ello poder clasificar cada una de sus capas.
- Muestreo: recolectar las muestras más representativas de las capas de suelo.
- Ensayos: ensayar las muestras para determinar las propiedades físicas de los diferentes materiales del suelo.
- Disponibilidad: una muestra para determinar la capacidad de los materiales para poder llevar a cabo la construcción de los pavimentos.

➤ **Ensayos de resistencia**

Es necesario realizar ensayos de resistencia para poder predecir un posible comportamiento del suelo ante la aplicación de las cargas. Para pavimentos flexibles, la resistencia de la subrasante se mide mediante el ensayo de índice de penetración California (CBR), mientras que en el caso de pavimentos rígidos, se utiliza el ensayo de *Plate Bearing Test*. Ambos ensayos serán descritos a continuación:

- ***Relación de soporte california (CBR), NTP 339.154 (ASTM D 1883).***
El ensayo CBR es un ensayo de penetración, cuya finalidad es determinar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y de los agregados del mismo. El cálculo CBR es básicamente empírico; sin embargo, se han preparado en base a correlaciones fiables. Dichas

correlaciones constan en realizar una comparación entre la fuerza requerida para producir una determinada penetración en el material a analizar y la fuerza requerida para realizar la misma penetración en piedra picada californiana, es por ello que el resultado es expresado en un ratio de dos fuerzas (porcentaje).

El ensayo consiste en cargar una placa circular, en estrecho contacto con el suelo a evaluar, midiendo las deformaciones correspondientes a las distintas cargas aplicadas (Ref. 6).

Las pruebas de laboratorio CBR en grava a menudo producen resultados de CBR que son bastante altos debido a los efectos limitadores del molde, por tal motivo el procedimiento de diseño de la FAA recomienda un valor máximo de constante elástica E de la subrasante de 50,000 psi (345 MPa) (CBR=33) para ser usado en el diseño.

El número de pruebas de CBR requeridas dependerá de las condiciones de suelo; sin embargo, según la FAA debería ser suficiente entre tres a siete pruebas.

- **Ensayo de placa de carga, AASHTO T 222.** El ensayo de placa directa (plate bearing test) mide la capacidad de la resistencia del suelo donde será emplazado el pavimento, y da como resultado el valor k , coeficiente de reacción de la subrasante, el cual representa la presión requerida para producir una cierta unidad de deflexión en el suelo; es decir, una constante elástica del material.

El valor de k se puede determinar usando una placa de 30 pulgadas (762 mm) de diámetro. En caso se use un diámetro de placa más pequeño puede tener como resultado un mayor valor de k .

Generalmente, solo se pueden realizar dos o tres pruebas de placa de carga, debido a que los ensayos suelen ser costosos, por lo que el valor k de diseño deberá ser el menor obtenido de los ensayos.

➤ **Ensayos Adicionales**

Según la OACI, estos son los ensayos que adicionalmente se deben realizar al terreno para determinar las propiedades físicas de los mismos.

- Análisis granulométrico, NTP 339.128 (ASTM D 422)
- Límite líquido, NTP.128 (NTP 339.129)

- Índice de plasticidad, NTP.128 (NTP 339.129)
- Relaciones humedad-densidad: en caso el peso bruto de las aeronaves sea de 30,000 lb a más, se deberá utilizar el método NTP 339.141 (ASTM D-1557), en caso contrario se utilizará el método NTP 339.142 (ASTM D-698).

Las secciones de la subrasante suelen ser bastante variables, por lo que la selección de un valor de CBR de diseño requiere un cierto juicio. Según la FAA, se tiene una regla general para la selección del CBR de diseño, en la que el valor del CBR de diseño debe ser igual o menor a 85% del valor del CBR de la subrasante. Dicha regla es empleada para ambas metodologías usadas en la presente tesis.

2.3.4. CONSIDERACIONES DE LAS AERONAVES

- **Carga**

Según las circulares AC 150/5320-6D y 150/5320-6F de la FAA, los pavimentos deberán estar diseñados según el peso bruto de la aeronave. Se considera que el 95% del peso bruto es soportado por los principales trenes de aterrizaje, mientras que el 5% restante es soportado por el tren de nariz. Según la OACI⁹, es necesario utilizar el peso máximo de despegue para realizar el cálculo del espesor del pavimento, de manera que se dé cierta holgura, dado que el tráfico previsto es una cantidad aproximada.

- **Tren de Aterrizaje**

El peso de la aeronave se distribuye según la configuración del tren de aterrizaje, por tanto, es importante analizar el tipo y geometría del tren de aterrizaje ya que *“establecen la respuesta del pavimento a las cargas producidas por la aeronave”* (OACI, 1983). Las configuraciones típicas de trenes de aterrizaje son las tres primeras mencionadas a continuación; sin embargo, los arreglos de trenes de aterrizaje más complejos que no se encuentran dentro de las típicas descripciones, son agrupados en el cuarto tipo de tren de aterrizaje¹⁰.

- a) Aeronave de tren simple (Single Gear Aircraft): una rueda por puntal

⁹ OACI. Manual de Diseño de aeródromos – Parte 3, Pavimentos. Segunda edición. Canadá. 1983, p.

¹⁰ FAA. Order 5300.7, Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations, 2005.

- b) Aeronaves de ruedas gemelas (Dual Gear Aircraft): dos ruedas por puntal.
- c) Aeronave con bogie de cuatro ruedas (Dual Tandem Aircraft): dos ruedas por puntal, seguidas por dos ruedas adicionales por puntal.
- d) Aeronaves con fuselaje ancho (Wide Body Aircraft)

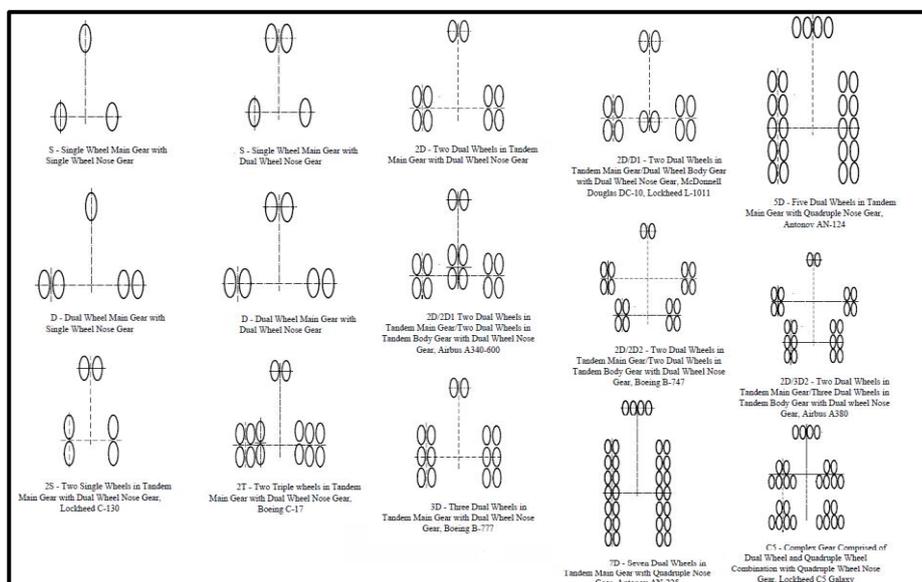


Figura 20. Ejemplos de configuración de tren de aterrizaje. Fuente: FAA. Order 5300.7, Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations, 2005

2.3.5. DETERMINACIÓN DE LA AERONAVE DE CÁLCULO

El concepto de aeronave de cálculo será utilizado en la aplicación de la metodología de la circular AC 150/5320-6D. Se deberán seleccionar las aeronaves de cálculo según los pronósticos de salidas anuales para cada aeronave. La aeronave crítica será aquella que determine el máximo espesor de pavimento. Esta no es necesariamente la más pesada, ya que se debe tener en cuenta las diferentes características de la aeronave.

2.3.6. DETERMINACIÓN DE LAS SALIDAS ANUALES EQUIVALENTES EN FUNCIÓN A LA AERONAVE DE CÁLCULO

El concepto de salidas anuales equivalentes será utilizado en la aplicación de la metodología de la circular AC 150/5320-6D. Para poder determinar las salidas anuales equivalentes de las aeronaves de cálculo, es necesario tener en cuenta los diferentes trenes de aterrizaje y pesos de cada aeronave presente en los pronósticos de salidas anuales. Este cálculo logra “convertir” a

las aeronaves al mismo tipo del tren de aterrizaje, según la aeronave de cálculo. El factor de conversión será el siguiente:

Tabla 10. Factor de conversión trenes de aterrizaje. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995

Para convertir de	A	Multiplíquense las salidas por
rueda simple	ruedas gemelas	0.8
rueda simple	bogie	0.5
ruedas gemelas	bogie	0.6
bogie doble	bogie	1.0
bogie	rueda simple	2.0
Bogie	ruedas gemelas	1.7
ruedas gemelas	rueda simple	1.3
bogie doble	ruedas gemelas	1.7

Una vez realizada la conversión al mismo tren de aterrizaje, se deberá realizar la proporción según las cargas de las aeronaves, la cual se realiza según la siguiente fórmula (Ref. 5):

$$\log R_1 = \log R_2 \times \frac{W_2^{\frac{1}{2}}}{W_1}$$

Donde:

R_1 = salidas anuales equivalentes de la aeronave de cálculo

R_2

= salidas anuales expresadas en el tren de aterrizaje de la aeronave de cálculo

W_1 = carga sobre la rueda de la aeronave de cálculo

W_2 = carga sobre la rueda de la aeronave en cuestión

Las aeronaves de fuselaje ancho son un caso particular, ya que deben ser consideradas de manera distinta en vista que la distribución de sus trenes de aterrizaje son considerablemente diferentes al del resto de aeronaves. La manera de llevar a cabo la conversión en estos casos es considerando cada fuselaje como una aeronave con bogie de cuatro ruedas con peso equivalente a 300,000 lb al calcular las salidas anuales equivalentes.

2.4. METODOLOGÍA DE LA FAA

En la presente tesis se desarrollarán dos métodos para el diseño de pavimentos, con el fin de realizar la comparación entre los diseños obtenidos. Ambos métodos han sido establecidos por la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos, los cuales han sido utilizados en Perú debido a que no hay una norma para pavimentos de aeródromos.

2.4.1. METODOLOGÍA ADVISORY CIRCULAR 150/5320-6D

El primer método está basado en la circular AC 150/5320-6D. *“En 1978, la Federal Aviation Administration de Estados Unidos adoptó el método del índice de resistencia de California (CBR) para el cálculo de los pavimentos flexibles, la hipótesis de cargas sobre los bordes para el cálculo de los pavimentos rígidos y el sistema de clasificación de terrenos unificados”* (Ref. 9).

La metodología se divide en dos procedimientos, para aeronaves con un peso bruto mayor a 30,000 libras y para aeronaves de cálculo con un peso mayor o igual a 30,000 libras.

Las curvas de cálculo son utilizadas para determinar el espesor total del pavimento “T” así como los requisitos de espesor de la capa de rodadura, de las **áreas críticas**. Se considera áreas críticas a las secciones en la pista de aterrizaje, calles de rodadura y plataforma. Por otro lado, es necesario generar una conversión en caso de secciones no críticas, tales como calles de salida rápida. (Ref. 9)

2.4.1.1. DISEÑO PARA PAVIMENTOS QUE SOPORTAN AERONAVES DE 30,000 LIBRAS A MÁS

- **Pavimentos flexibles**

Las curvas de cálculo o ábacos que se emplean en el método en mención se basan en el Índice de Penetración California (CBR), ASTM D 1883, estas

suministran tanto el valor del espesor total, incluyendo la carpeta asfáltica, base y subbase, que el pavimento requerirá para resistir el tráfico y carga a la que será sometido; así como el espesor requerido por la superficie.

Es usual que el suelo de la subrasante presente varias capas de distintas características y distintos valores de CBR, es necesario en dichos casos analizar los posibles diseños que se puedan realizar para la elaboración del pavimento flexible. Puede ocurrir que sea conveniente retirar la capa débil de la subrasante, o diseñar un pavimento con un CBR más elevado. La alternativa más económica y las condiciones de terreno son determinantes para elegir un diseño.

Los ábacos de diseño que se anexan, están clasificadas según el tren de aterrizaje de la aeronave de cálculo. Para utilizarlas es necesario saber el valor CBR de la subrasante, de la subbase, el peso bruto de la aeronave de diseño y las salidas anuales equivalentes. En caso el valor de estas últimas sean mayor a 25,000 se deberá realizar una corrección, aumentando según la siguiente tabla, y la carpeta asfáltica deberá aumentar en una pulgada.

Tabla 11. Factor de corrección para un tráfico mayor a 25,000. Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 1995

Nivel anual de salidas	Porcentaje de espesor de 25,000 salidas
50,000.00	104
100,000.00	108
150,000.00	110
200,000.00	112

Para analizar las secciones de transición entre la pista (bordes de grosor de capas reducido) se debe multiplicar el valor del espesor de la capa base y subbase por 0.7 (Ref. 5).

- **Pavimentos rígidos**

Al igual que los ábacos utilizados para el diseño de pavimentos flexibles, las curvas de cálculo para pavimentos rígidos también están clasificadas según el tipo de tren de aterrizaje. “Estas curvas se basan en una hipótesis de carga en

bordes de junta en que la carga es tangente a la junta” (OACI, 1983). Por este motivo, los ábacos anexados se utilizan según la dirección de los trenes de aterrizaje, en caso estos sean paralelos o perpendiculares a la junta o borde de losa, se usan los 14 primeros ábacos, en caso formen un ángulo agudo con las juntas, se usan los 10 ábacos restantes.

Los datos necesarios para poder utilizar estos son la resistencia a flexión del concreto, el módulo de fundación del terreno, el peso bruto de la aeronave de cálculo y las salidas anuales equivalentes.

A diferencia de los ábacos empleados para pavimentos flexibles, los ábacos utilizados para pavimentos rígidos solo suministran el espesor del concreto. Es necesario realizar otros cálculos para poder determinar las dimensiones de los otros componentes.

Se evalúa el espesor según la resistencia de flexión del concreto, la cual se halla mediante el Método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión del concreto (ASTM C-78) a los 90 días de fraguado el concreto.

El valor k , como se mencionó en la sección anterior, es una constante elástica característica del material sobre el cual se encontrará el pavimento. Este se determina según los espesores de la capa de cimentación y el tipo de agregado utilizado. A continuación se muestran los gráficos de donde se muestra el efecto del espesor de las capas frente al módulo de reacción del terreno de fundación (k).

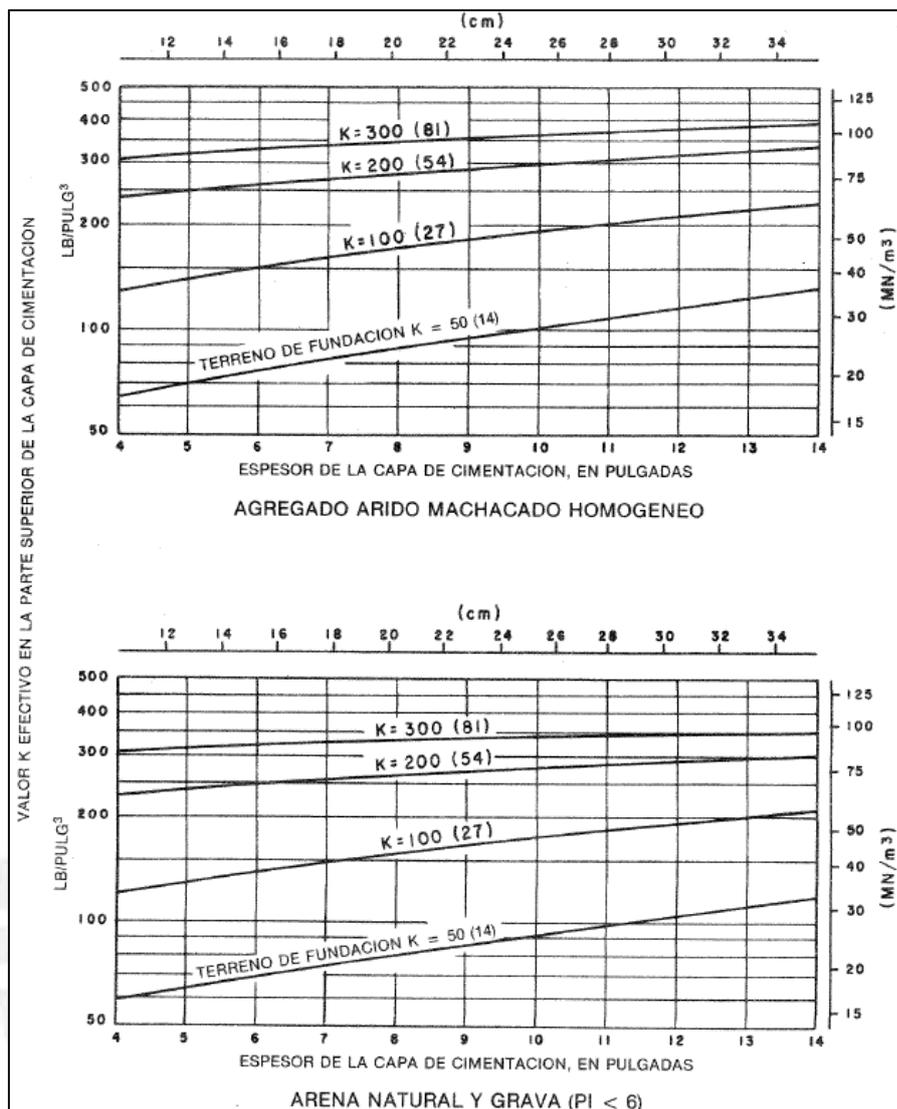


Figura 21. Efecto de la capa de cimentación sobre k. Fuente: OACI, Manual de Diseño de Aeródromos – Pavimentos, 1983

En caso que el pavimento deba resistir aeronaves de igual o más de 100,000 lb, es necesario estabilizar la capa de cimentación. En dichos casos es necesario tener en cuenta la variación del módulo del terreno de fundación, el cual se muestra en la siguiente figura:

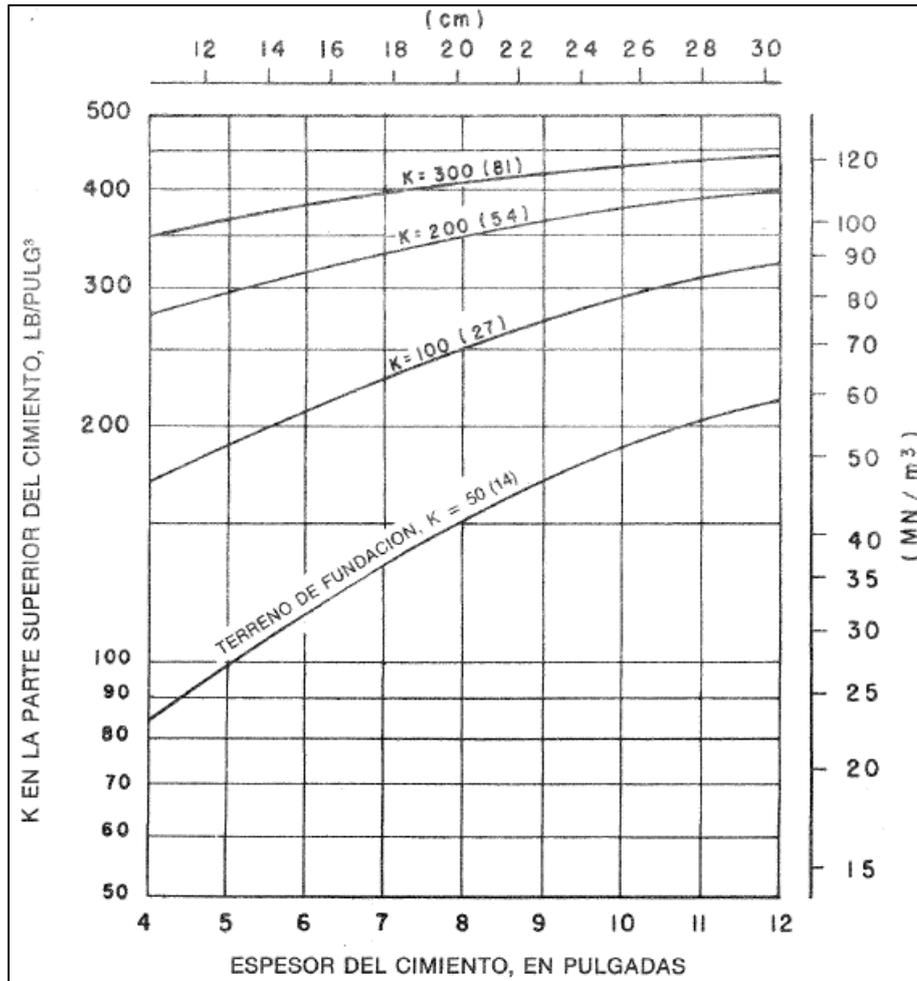


Figura 22. Efecto de la capa de cimentación estabilizada sobre k. Fuente: OACI, Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III, Pavimentos, Canadá, 1983

En caso de que el aeródromo cuente con un volumen de tráfico mayor a 25,000; se realizará el mismo procedimiento que en el caso de pavimentos flexibles.

Asimismo, el método para calcular la sección de márgenes y franjas de las pistas de aterrizaje, se mantienen igual que los descritos en el diseño de pavimentos flexibles.

2.4.2. METODOLOGÍA ADVISORY CIRCULAR 150/5320-6F

El segundo método está basado en la AC 150/5320-6F. En la circular se indica los procedimientos para el uso del software FAARFIELD¹¹ (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design), el cual, tal como lo indica su nombre, es un sistema iterativo, que tiene en cuenta diferentes parámetros, como las cargas, el suelo y la resistencia del pavimento, y da como resultado el espesor de las capas del pavimento.

FAARFIELD está basado en el factor de daño acumulado (CDF, *cumulative damage factor*), el cual es un factor que “suma” o acumula el daño o desgaste en el pavimento causado por las diversas aeronaves para un tráfico dado. Una vez que el programa itere hasta que el criterio de diseño (CDF) sume uno, el diseño estará satisfecho.

Las principales diferencias entre el de esta circular y la antes mencionada son las indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 12. Comparativo entre métodos de la FAA. Fuente: FAA. FAARFIELD Software Overview. IX ALACPA Seminar on Airport Pavements Ciudad de Panamá, Panamá. David R. Brill, P.E, Ph D, 2012

	AC 150/5320-6D	FAARFIELD
Tráfico	Todo el tráfico es convertido a salidas equivalentes de la aeronave de diseño	Se utiliza el concepto CDF (Factor de Daño Acumulado), mediante el cual se considera todo el mix de aeronaves
Modelo de Respuesta Estructural	- Solución Westergaard para pavimentos rígidos -El modelo de Boussinesq utilizado para pavimentos rígidos	- Análisis elástico en capas (LEAF) para pavimentos flexibles - Modelo tridimensional de elementos finitos para pavimentos rígidos
Método de Diseño del Espesor	- Ecuación CBR con factor alfa (pavimento flexible) - Aplica un porcentaje del espesor al diseño básico para 5000 coberturas (pavimento rígido)	El modelo de falla relaciona las coberturas con las siguientes fallas estructurales: deformación de la subrasante (pavimento flexible) o tensión máxima en la parte inferior de la capa de PCC (pavimento rígido)
Implementación	Ábacos de diseño	Programa de computadora escrito en Visual Studio 2005
Tiempo de vida estructural	El tiempo de vida del pavimento estándar de la FAA es de 20 años, el mismo en el que se basan los ábacos de diseño	El tiempo de vida del pavimento estándar de la FAA es de 20 años; sin embargo, FAARFIELD acepta un rango de vida de diseño de 1 a 50 años

¹¹ FAARFIELD. (2016). (Versión 1.41). Disponible en Federal Aviation Administration: <http://www.airporttech.tc.faa.gov/Download/Airport-Pavement-Papers-Publications-Details/dt/Detail/ItemID/23/FAARFIELD-1305>

Asimismo, en la circular vigente se continúan usando dos conceptos que no se consideraban en la circular AC 150/5320-6D, los cuales son el ratio Pass-to-Coverage o Paso-a-Cobertura y el Factor de Daño Acumulado, o CDF por sus siglas en inglés. A continuación se explica con mayor detalle ambos conceptos:

- **Ratio “Pass-to-Coverage” (P/C):** el ratio *pass-to-coverage* expresa el número de veces que puede pasar una aeronave por un punto dado para aplicar la mayor carga que este podrá resistir. En el caso de pavimentos flexibles, es necesario medir el esfuerzo en la parte de arriba de la subrasante, mientras que en el caso de pavimentos rígidos, son medidos en el fondo de la losa de concreto.
- **Factor de daño acumulado (CDF):** tal como se mencionó, a diferencia del anterior método, este utiliza un concepto que representa la fatiga del pavimento, el cual es representado por el factor CDF. Se puede definir el factor mencionado de la siguiente manera:

$$CDF = \frac{\text{número de repeticiones de carga aplicada}}{\text{número de repeticiones admisibles antes de la falla}}$$

En caso el valor de CDF sea igual a 1, el pavimento ha gastado toda su vida de fatiga. En caso sea menor a 1, el pavimento aún no ha gastado toda su vida de fatiga y el valor CDF muestra la fracción de período utilizado. En el programa, CDF se calculará para cada banda de 10 pulgadas o 25.4 cm de ancho.

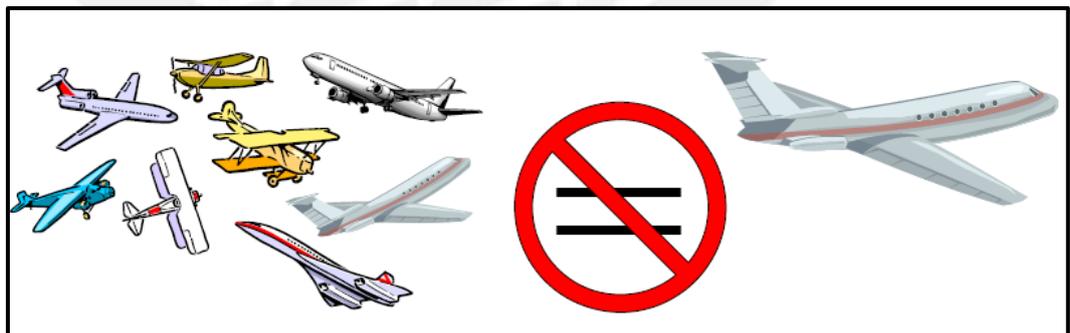


Figura 23. Diferencia entre mix de aeronaves y aeronave de diseño. Fuente: FAA. FAARFIELD Software Overview. IX ALACPA Seminar on Airport Pavements Ciudad de Panamá, Panamá. David R. Brill, P.E, Ph D, 2012

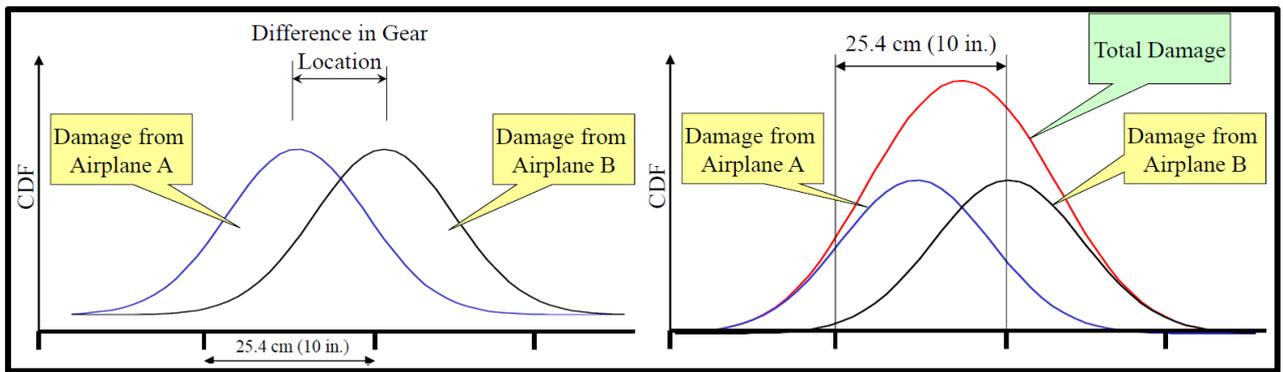


Figura 24. Gráfica CDF. Fuente: FAA. FAARFIELD Software Overview. IX ALACPA Seminar on Airport Pavements Ciudad de Panamá, Panamá. David R. Brill, P.E, Ph D, 2012

2.4.2.1. Diseño de pavimentos

- **Pavimentos Flexibles**

El diseño de pavimentos flexibles mediante el uso del programa FAARFIELD considera dos tipos de falla. La primera es aquella ocasionada por la tensión vertical en la subrasante, en la cual puede generar ahuellamiento. Mientras que la segunda es producida por la tensión horizontal en la carpeta asfáltica, la cual puede originar agrietamiento en dicha capa.

En la siguiente tabla se muestra el espesor mínimo de las capas del pavimento, los cuales se encuentran en función del peso bruto máximo de avión operando en el pavimento.

Tabla 13. Espesor mínimo de las capas - Pavimentos Flexibles. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos. 2016

CAPA DEL PAVIMENTO	ÍTEM	PESO BRUTO MÁXIMO DEL AVIÓN OPERANDO EN EL PAVIMENTO					
		< 12,500 lbs (5,670 kg)		< 100,000 lbs (45,360 kg)		≥100,000 lbs (45,360 kg)	
		pulgadas	milímetros	pulgadas	milímetros	pulgadas	milímetros
Carpeta Asfáltica	P-401 Mezcla asfáltica en caliente	3	75	4	100	4	100
Base Estabilizada	P-401 O P-403, P-304, P-306	No requiere	No requiere	No requiere	No requiere	5	125
Capa Base de Agregado Triturado	P-209 Capa Base de Agregado Triturado	3	75	6	150	6	150
Capa base de agregado fino y grueso	P-208 Capa base de agregado fino y grueso	3	75	No utilizado	No utilizado	No utilizado	No utilizado
Subbase	P-154 Capa Subbase	4	100	4	100	4	100

La calidad de la subrasante es mejor descrita por el módulo elástico (E), el cual es el parámetro del material utilizado en los cálculos internos de FAARFIELD. El valor del módulo de elasticidad se puede hallar por diversos medios, uno de ellos es mediante una relación entre este y el valor CBR, cuya fórmula se muestra a continuación:

$$E = 1500 \times CBR$$

En donde el valor del módulo (E) se encuentra en psi.

Tal como se mencionó en la sección correspondiente a Tipos de Pavimentos, es necesario estabilizar la capa base y subbase en caso haya aeronaves de 100,000 libras o 45,360 kg o más incluidas en el tráfico aéreo, excepto cuando el CBR de la capa base sea igual a 100 y de la subbase igual a 35.

- **Pavimentos Rígidos**

El diseño de pavimentos rígido mediante el uso del programa FAARFIELD considera solo un modo de falla: agrietamiento en la parte inferior de la losa de concreto. El agrietamiento se controla limitando la tensión horizontal en la parte inferior de la losa. Para el diseño de pavimento rígido se deberá iterar el espesor de la losa hasta que el valor CDF llegue a 1. Se utiliza un modelo tridimensional de elementos finitos para calcular las tensiones de borde en losas de concreto, el modelo tiene la ventaja de considerar dónde se producen las tensiones críticas para el diseño de la losa, estas usualmente están en los bordes de la losa; sin embargo, pueden situarse en el centro de esta ante determinado tren de aterrizaje, el cual puede ser paralelo o perpendicular al borde de la losa de concreto. El programa FAARFIELD no calcula el espesor de otras capas que no sean la losa de concreto; sin embargo, respeta los requisitos colocados en la siguiente tabla.

Tabla 14. Espesor mínimo de las capas - Pavimentos Rígido. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos. 2016

CAPA DEL PAVIMENTO	ÍTEM	PESO BRUTO MÁXIMO DEL AVIÓN OPERANDO EN EL PAVIMENTO					
		< 12,500 lbs (5,670 kg)		< 100,000 lbs (45,360 kg)		≥100,000 lbs (45,360 kg)	
		pulgadas	milímetros	pulgadas	milímetros	pulgadas	milímetros
Losa de Concreto	P-501, PCC	5	125	6	150	6	150
Base Estabilizada	P-401 O P-403, P-304, P-306	No requiere	No requiere	No requiere	No requiere	5	125
Base	P-208, P-209, P-211, P-301	No requiere	No requiere	6	150	6	150
Subbase	P-154 Capa Subbase	4 *	100 *	Según lo solicitado para las heladas o para crear una plataforma de trabajo firme	Según lo solicitado para las heladas o para crear una plataforma de trabajo firme	Según lo solicitado para las heladas o para crear una plataforma de trabajo firme	Según lo solicitado para las heladas o para crear una plataforma de trabajo firme

* No es necesario colocar una capa subbase para pavimentos diseñados para cargas de 12,500 libras (5670 kg) o menores, a excepción de que estén presentes los siguientes suelos: OL, MH, CH o OH

Se puede considerar el uso de una capa subbase como reemplazo de la capa base en caso de que el diseño de pavimento sea para aeronaves cuyo peso sea igual o menor a 30,000 libras o 13,610 kg.

Al igual que en el caso anterior, se puede relacionar el módulo de la subrasante en función al valor utilizado en la anterior circular para pavimentos rígidos, el coeficiente de reacción de la subrasante, mediante la siguiente fórmula:

$$E = 20.15k^{1.284}$$

En donde le valor del módulo (E) se encuentra en psi.

Asimismo, se puede establecer una relación entre el valor k y el CBR:

$$k = 28.6926 \times CBR^{0.7788}, k \text{ en pci}^{12}$$

Al igual que en el anterior método, se usa la resistencia a la flexión de concreto para el diseño del pavimento, medido de acuerdo a la norma ASTM C78. Se recomienda una resistencia a la flexión del concreto de diseño entre 600 y 750 psi (42.2 y 52.7 kg/cm²). En general, se considera necesario evitar las resistencias a la flexión de diseño mayores a 750 psi, debido a que para alcanzar un valor mayor al rango usualmente es necesario recurrir a aditivos o uso excesivo del cemento, lo cual puede afectar negativamente a la durabilidad del pavimento. La resistencia de aceptación del material P-501 es diferente a la resistencia utilizada en el diseño del espesor de la losa de concreto, ya que la resistencia de aceptación debe asegurar que la resistencia real (en servicio) cumpla o exceda la fuerza usada en el diseño. La resistencia de aceptación usualmente es la medida de la resistencia a la flexión del concreto a los 28 días; sin embargo, la resistencia a largo plazo normalmente se incrementa en por lo menos 5% más que la medida a los 28 días.

¹² Fórmula obtenida de la circular FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos. 2016

3. TRÁFICO AÉREO

Tal como se mencionó, el aeropuerto de Pisco ha sido usado como una base aérea; es decir, atendía básicamente aeronaves militares. Por tal motivo, es necesario realizar un estudio del tráfico aéreo teniendo en cuenta las diversas aeronaves que podrán aterrizar o despegar del aeropuerto en mención.

A continuación, se muestra una tabla con los datos con los modelos de aviones más significativos, el número de salidas de los mismos y el peso de despegue:

Tabla 15. Salidas Anuales. Fuente: Datos proporcionados para la presente tesis

AERONAVE	SALIDAS	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)
AIRBUS A319-132	5,043	75,500.00	166,449.01
AIRBUS A320-233	69	77,000.00	169,755.94
AIRBUS A321-231	2,400	93,500.00	206,132.21
AIRBUS A330-200	94	230,000.00	507,063.20
ANTONOV AN-26-100	698	25,000.00	55,115.57
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27,000.00	59,524.81
BOEING B727-200	9	95,028.00	209,500.88
BOEING B737-200	2,756	49,190.00	108,445.39
BOEING B747-200	300	378,000.00	833,347.35
BOEING B747-400	165	397,000.00	875,235.18
BOEING B757-200	517	115,680.00	255,030.74
BOEING B767-200ER	68	179,170.00	395,002.23
BOEING B767-300F	40	186,880.00	411,999.88
BOEING B767-400	3,100	204,120.00	450,007.57
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209,000.00	460,766.13
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263,320.00	580,521.23
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273,300.00	602,523.36
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286,000.00	630,522.07

Es necesario realizar una estimación para poder determinar el número de salidas anuales promedio. Dado que la vida útil de los pavimentos de un aeropuerto es en su mayoría de 20 años según la FAA, se considera este periodo como el periodo de diseño. Mediante la siguiente fórmula se estima el tráfico anual promedio durante el periodo de diseño mencionado.

$$T_{prom} = \frac{T_i * [(1 + r) - 1]}{y * r}$$

Donde: T_i : Tráfico inicial

T_{prom} : Tráfico anual promedio

Y : Periodo de diseño en años

r : Razón de crecimiento anual del tráfico

El tráfico inicial ha sido presentado en la tabla 15. Por otro lado, se estima que la razón de crecimiento anual de tráfico igual a 7% según el Plan Maestro del Aeropuerto de Pisco (Ref. 1).

Según lo mencionado, se tendrá la siguiente tabla con el pronóstico del tráfico anual promedio durante 20 años.

Tabla 16. Tráfico Promedio Anual. Fuente: Propia

AERONAVE	TRÁFICO INICIAL	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL
AIRBUS A319-132	5,043	75,500.00	166,449.01	10,337.01
AIRBUS A320-233	69	77,000.00	169,755.94	141.43
AIRBUS A321-231	2,400	93,500.00	206,132.21	4,919.46
AIRBUS A330-200	94	230,000.00	507,063.20	192.68
ANTONOV AN-26-100	698	25,000.00	55,115.57	1,430.74
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27,000.00	59,524.81	157.83
BOEING B727-200	9	95,028.00	209,500.88	18.45
BOEING B737-200	2,756	49,190.00	108,445.39	5,649.18
BOEING B747-200	300	378,000.00	833,347.35	614.93
BOEING B747-400	165	397,000.00	875,235.18	338.21
BOEING B757-200	517	115,680.00	255,030.74	1,059.73
BOEING B767-200ER	68	179,170.00	395,002.23	139.38
BOEING B767-300F	40	186,880.00	411,999.88	81.99
BOEING B767-400	3,100	204,120.00	450,007.57	6,354.30
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209,000.00	460,766.13	47.14
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263,320.00	580,521.23	69.69
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273,300.00	602,523.36	225.48
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286,000.00	630,522.07	96.34

4. ESTUDIO DE SUELOS

El presente capítulo comprenderá el estudio de suelos tanto de la subrasante como el de las canteras, de donde se obtendrá el material para la construcción de la base y subbase de los pavimentos.

- **Estudio de la subrasante**

El estudio de la subrasante es fundamental para la realización del diseño de pavimentos, ya que en base a esta se sabrá cuán resistente es el terreno de la zona, de manera que el espesor de las capas de los pavimentos estará en función de las propiedades de la subrasante.

Los datos obtenidos se mencionan a continuación:

“El suelo de la sub-rasante está formado por una arcilla de mediana plasticidad, ligeramente húmeda, color marrón {CL / A-7-5 (2)} la cual tiene un CBR igual a 14 a una compactación del 95% de la densidad máxima del ensayo Próctor Modificado ($wop = 13.6\%$, máximo $gd = 1.96 \text{ gr/cm}^3$).”¹³

Con los datos mencionados, siguiendo la regla descrita en el ítem 2.3.2, se tiene que $CBR_{diseño} = 14 \times 85\% = 12\%$

- **Estudio de canteras**

Se ha tenido que realizar el estudio de canteras, de lo cual se han obtenido los siguientes datos:

“El material de base será piedra chancada tipo B el cual tiene un CBR = 112 a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado ($wop = 7.1\%$, máximo $gd = 2.22 \text{ gr/cm}^3$. y el material de sub-base arena mal graduada (SM / A-2-4) cual tiene un CBR = 40 a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado ($wop = 9.6\%$, máximo $gd = 1.71 \text{ gr/cm}^3$).” (Ref. 13)

¹³ Datos proporcionados para la presente tesis

5. GEOMETRÍA DEL ÁREA DE MOVIMIENTO

Se empleará la geometría del área de movimiento del Aeropuerto Internacional de Pisco, la cual se adjunta en los planos GE-01 y GE-02 ubicados en el anexo 4 de la presente tesis.

6. METODO DE LA FAA – AC 150/5320-6D

6.1. DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Tal como se mencionó en el segundo capítulo, es necesario calcular la aeronave de diseño para la presente metodología, la cual será aquella que requiera mayor espesor del pavimento. Se evaluarán cada una de las aeronaves mostradas en el capítulo 3, con la salida anual correspondiente.

Dado que en el tráfico promedio anual correspondiente a cada aeronave es menor a 25,000; no será necesario multiplicar el valor del espesor por un factor de corrección (tabla 26). De este modo, se tendrá la siguiente tabla:

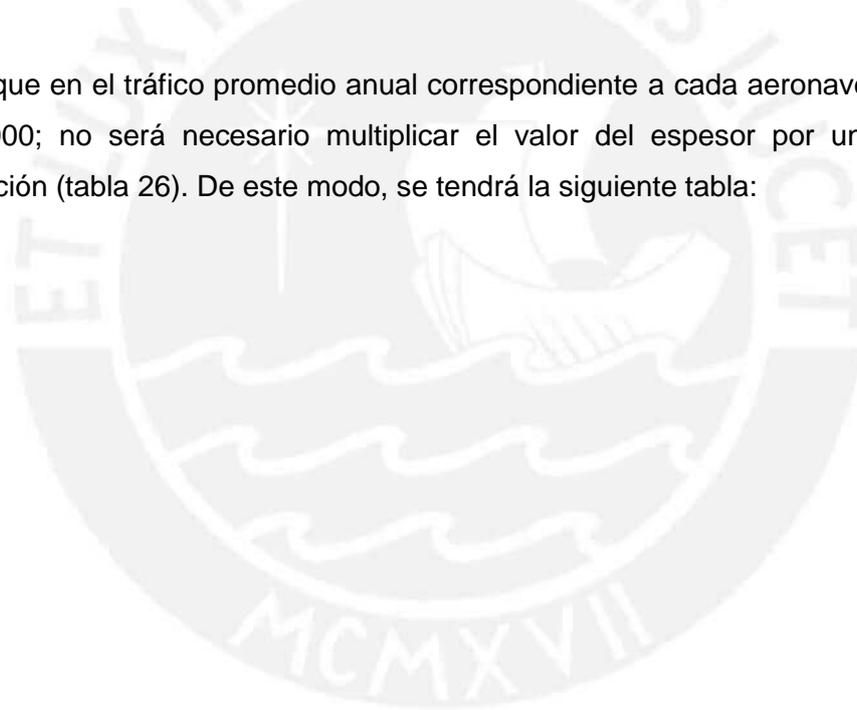


Tabla 17. Cálculo de Aeronave de Diseño. Fuente: Propia

AERONAVE	TRÁFICO INICIAL	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	5,043	75,500.00	166,449.01	10,337.01	DUAL	22
AIRBUS A320-233	69	77,000.00	169,755.94	141.43	DUAL	18
AIRBUS A321-231	2,400	93,500.00	206,132.21	4,919.46	DUAL	24.5
AIRBUS A330-200	94	230,000.00	507,063.20	192.68	DUAL TANDEM	21
ANTONOV AN-26-100	698	25,000.00	55,115.57	1,430.74	DUAL	10.3
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27,000.00	59,524.81	157.83	DUAL	10.4
BOEING B727-200	9	95,028.00	209,500.88	18.45	DUAL	22.4
BOEING B737-200	2,756	49,190.00	108,445.39	5,649.18	DUAL	17.8
BOEING B747-200	300	378,000.00	833,347.35	614.93	WIDE BODY	25.3
BOEING B747-400	165	397,000.00	875,235.18	338.21	WIDE BODY	25.6
BOEING B757-200	517	115,680.00	255,030.74	1,059.73	DUAL TANDEM	18.3
BOEING B767-200ER	68	179,170.00	395,002.23	139.38	DUAL TANDEM	21.5
BOEING B767-300F	40	186,880.00	411,999.88	81.99	DUAL TANDEM	21.8
BOEING B767-400	3,100	204,120.00	450,007.57	6,354.30	DUAL TANDEM	26.6
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209,000.00	460,766.13	47.14	DUAL TANDEM	24.8
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263,320.00	580,521.23	69.69	WIDE BODY	23.8
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273,300.00	602,523.36	225.48	WIDE BODY	24.3
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286,000.00	630,522.07	96.34	WIDE BODY	24.8

El mayor valor de espesor obtenido es el correspondiente a la aeronave Boeing B767-400, el cual es de 26.6 pulgadas. Por tanto, se concluye que dicha aeronave será la de diseño.

El segundo paso será determinar las salidas anuales equivalentes en función a la aeronave de cálculo. Para ello, será necesario realizar la conversión según los trenes de aterrizaje mediante el factor contenido en la tabla 25. Asimismo, se debe tener en

cuenta la conversión según las cargas de las aeronaves, planteada por la ecuación

$$\text{descrita en el capítulo 2: } \log R_1 = \log R_2 \times \frac{W_2^{\frac{1}{2}}}{W_1}$$

En este caso, dado que la aeronave de cálculo es Boeing B767-400, con un peso de despegue de 450,007.57 lb, el valor de W_1 se calculará de la siguiente manera:

$$W_1 = \left(\frac{450,007.57}{8} \right) * 95\% = 53,438.4 \text{ lb}$$

Se divide el peso de despegue entre 8 debido a que la aeronave de diseño tiene un tren de aterrizaje dual tándem, y se multiplica por 95% debido a la hipótesis de la FAA mencionada en el segundo capítulo, donde se plantea que el tren principal soporta 95% del peso bruto. Asimismo, cabe resaltar que en caso de aeronaves de fuselaje ancho, se considerará un peso de despegue de 300,000 lb.

De esta manera se tendrán las siguientes tablas:

Tabla 18. Salida aeronave afecto al factor de trenes de aterrizaje. Fuente: Propia

AERONAVE	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	FACTOR DE CONVERSIÓN SEGÚN TRENES	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL CORREGIDO
AIRBUS A319-132	166,449.01	10,337.01	DUAL	0.6	6,202.21
AIRBUS A320-233	169,755.94	141.43	DUAL	0.6	84.86
AIRBUS A321-231	206,132.21	4,919.46	DUAL	0.6	2,951.68
AIRBUS A330-200	507,063.20	192.68	DUAL TANDEM	1	192.68
ANTONOV AN-26-100	55,115.57	1,430.74	DUAL	0.6	858.45
ANTONOV AN-32B (AN-32)	59,524.81	157.83	DUAL	0.6	94.70
BOEING B727-200	209,500.88	18.45	DUAL	0.6	11.07
BOEING B737-200	108,445.39	5,649.18	DUAL	0.6	3,389.51
BOEING B747-200	833,347.35	614.93	WIDE BODY	1	614.93
BOEING B747-400	875,235.18	338.21	WIDE BODY	1	338.21
BOEING B757-200	255,030.74	1,059.73	DUAL TANDEM	1	1,059.73
BOEING B767-200ER	395,002.23	139.38	DUAL TANDEM	1	139.38
BOEING B767-300F	411,999.88	81.99	DUAL TANDEM	1	81.99
BOEING B767-400	450,007.57	6,354.30	DUAL TANDEM	1	6,354.30
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	460,766.13	47.14	DUAL TANDEM	1	47.14
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	580,521.23	69.69	WIDE BODY	1	69.69
MCDONNELL DOUGLAS MD11	602,523.36	225.48	WIDE BODY	1	225.48
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	630,522.07	96.34	WIDE BODY	1	96.34

Tabla 19. Salidas anuales equivalentes. Fuente: Propia

AERONAVE	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL CORREGIDO	CARGA POR LLANTA (lb)	SALIDAS ANUALES EQUIVALENTES
AIRBUS A319-132	166,449.01	10,337.01	6,202.21	39,531.64	2,836.41
AIRBUS A320-233	169,755.94	141.43	84.86	40,317.04	73.79
AIRBUS A321-231	206,132.21	4,919.46	2,951.68	48,956.40	3,417.56
AIRBUS A330-200	507,063.20	192.68	192.68	60,213.76	266.30
ANTONOV AN-26-100	55,115.57	1,430.74	858.45	13,089.95	36.46
ANTONOV AN-32B (AN-32)	59,524.81	157.83	94.70	14,137.14	13.51
BOEING B727-200	209,500.88	18.45	11.07	49,756.46	16.66
BOEING B737-200	108,445.39	5,649.18	3,389.51	25,755.78	402.53
BOEING B747-200	833,347.35	614.93	614.93	30,284.90	125.74
BOEING B747-400	875,235.18	338.21	338.21	30,284.90	80.17
BOEING B757-200	255,030.74	1,059.73	1,059.73	30,284.90	189.41
BOEING B767-200ER	395,002.23	139.38	139.38	46,906.51	102.07
BOEING B767-300F	411,999.88	81.99	81.99	48,924.99	67.79
BOEING B767-400	450,007.57	6,354.30	6,354.30	53,438.40	6,354.51
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	460,766.13	47.14	47.14	54,715.98	49.35
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	580,521.23	69.69	69.69	35,625.00	31.99
MCDONNELL DOUGLAS MD11	602,523.36	225.48	225.48	35,625.00	83.42
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	630,522.07	96.34	96.34	35,625.00	41.66
SALIDAS ANUALES EQUIVALENTES					14,189.31

Una vez que se sabe el valor de las salidas anuales equivalentes (14,189.31), se podrá calcular el espesor de las capas de pavimento flexible. Es posible obtener el espesor de las zonas críticas directamente de los ábacos.

6.1.1. DISEÑO DE LA SECCIÓN

- **Cálculo del espesor de total del pavimento estructural**

Tal como se mencionó en el segundo capítulo, será necesario estabilizar la capa base y subbase (teniendo en cuenta que el peso de la aeronave de diseño es mayor a 100,000 lb), a excepción de que el CBR de la base sea igual o mayor que 100, y que el CBR de la capa subbase sea igual o mayor 35. Los

materiales a emplear en el pavimento en mención tendrá un CBR de la base igual a 112, y de la subbase de 40. Por tanto, no será necesario estabilizar las capas.

Los valores necesarios para poder obtener el espesor del pavimento mediante el uso de los ábacos serán los siguientes:

- CBR de diseño de la subrasante: 12%
- Aeronave de cálculo: B 767-400
- Peso bruto de aeronave de cálculo: 450,007.6
- Salidas anuales equivalentes: 14,189.31

Con los datos mostrados, el espesor del pavimento total obtenido es de 34"

- **Espesor de la carpeta asfáltica**

Para hallar el espesor de la carpeta asfáltica, es necesario usar de referencia la aeronave de mayor peso dentro del tráfico aéreo. En este caso, será el B747-400, con un peso igual a 875,235.18 lb. Del ábaco correspondiente (figura 6 de Anexo 1), se obtendrá el valor del espesor igual a 5".

- **Espesor de la capa subbase**

El cálculo del espesor de la capa subbase se obtendrá mediante los ábacos al igual que el cálculo del espesor total del pavimento. La diferencia radica en que el CBR a emplear será el de la capa subbase, es decir 40%.

Con los datos mencionados, se obtiene por medio del ábaco correspondiente (figura 9 de Anexo 1) que el espesor de la capa base y la carpeta asfáltica será de 14". Por tanto, el espesor de la capa subbase será la diferencia entre el espesor total del pavimento y el espesor obtenido; es decir, 20".

- **Espesor de la capa base**

Se sabe que el espesor total del pavimento es 34", el de la capa subbase es de 20" y de la carpeta asfáltica de 5". De manera que el espesor de la capa base será igual a la diferencia entre 14" y 5"; es decir, 9", el cual corresponde a un valor mayor al mínimo exigido por la norma para la aeronave de diseño (8").

De esta manera, se tiene la siguiente sección de pavimento estructural crítico:

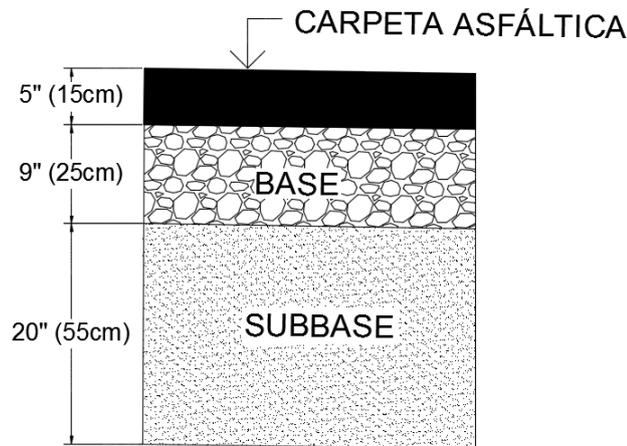


Figura 25. Sección de pavimento flexible - zona crítica.
Fuente: Propia

- **Espesor del borde de la pista de aterrizaje**

La circular AC 150/5320 6D (Ref. 5) permite la reducción del espesor de la carpeta asfáltica y de la base en la sección de la pista de aterrizaje, de manera que en zonas donde se requiera pavimento pero el tráfico es improbable, tal como los extremos a lo largo de la pista de aterrizaje, podrá tener un espesor más reducido de las capas mencionadas. Para ello, es necesario multiplicar el valor del espesor de la capa base por 0.7.

De esta manera, el espesor de la capa base se reducirá hasta un valor de 0.7×9 ; es decir, 6.3". Por otro lado, la FAA indica que la carpeta asfáltica se reducirá hasta un valor mínimo de 2 pulgadas.

Asimismo, para mantener nivelada la sección, el espesor de la capa subbase será igual a la diferencia entre el espesor total del pavimento y los espesores obtenidos de las otras capas: $34 - 6.3 - 2 = 25.7$ " (65.3)

Finalmente, la circular también menciona el ancho (25' o 7.6m) que deberá respetar cada una de las partes de la transición del espesor de las capas, dado que el ancho de la pista del Aeropuerto de Pisco es igual a 45m, la sección correspondiente al borde del extremo de la pista será igual a 7.3m.

A continuación, se muestra un esquema de la sección de la pista de aterrizaje que resume los datos calculados:

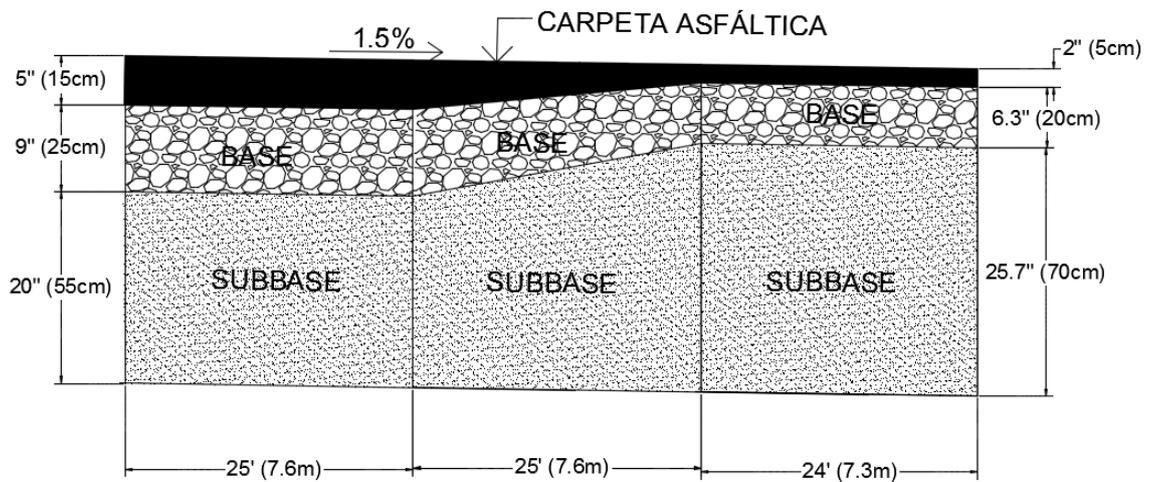


Figura 26. Sección pavimento flexible. Fuente: Propia

6.2. DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO

Para realizar el diseño del pavimento rígido, es necesario establecer distintos espesores en la capa subbase, de manera que se compare el espesor de la capa de concreto necesaria, y analizar los distintos diseños obtenidos de manera que prevalezca el más adecuado.

Tal como se mencionó, los ábacos utilizados para el diseño de pavimentos rígidos se basan en la hipótesis de carga de bordes de junta, en donde la carga es tangente a la junta. Por ello, estas curvas también dependerán de la dirección del tren de aterrizaje de las aeronaves.

“En el caso de los trenes de aterrizaje de rueda simple y de ruedas gemelas, representa el caso de tensión máxima cuando el tren se coloca paralelo a la junta. Los trenes de bogie no producen la tensión máxima cuando se emplazan paralelamente a la junta. La colocación del bogie en ángulo agudo con relación al borde de la junta producirá la tensión máxima” (OACI, 1983)

Es necesario tener los valores de entrada de la resistencia del concreto a la flexión, módulo del terreno de fundación, peso bruto de la aeronave de cálculo y salidas anuales equivalentes.

Se utilizará una resistencia del concreto a la flexión de 50 kg/cm², ya que con esta se construyó el pavimento de la plataforma del Aeropuerto Internacional de Pisco.

Las condiciones en las que no es necesario colocar una capa de cimentación están representadas en la siguiente tabla:

Tabla 20. Condiciones en que no se requiere una capa de cimentación. Fuente: OACI. Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III, Pavimentos. Canadá, 1983

Clasificación del suelo	Buen avenamiento		Mal avenamiento	
	Sin heladas	Con heladas	Sin heladas	Con heladas
GW	X	X	X	X
GP	X	X	X	
GM	X			
GC	X			
SW	X			

Dado que el suelo de la subrasante está formado por una arcilla de mediana plasticidad (CL), no cumple con las condiciones mostradas, por tanto se requiere capa de cimentación.

El valor de K se puede obtener de la fórmula $K = \left[\frac{1500 \times CBR}{26} \right]^{0.7788}$ ¹⁴, donde CBR=12, se obtiene que el valor de K es igual a 162.9 pci.

Como se mencionó en la anterior sección, no es necesario estabilizar la capa subbase; sin embargo, se ha considerado el uso del material designado para la base (P-209) para que sea colocado bajo la losa de concreto. De esta manera, se empleará el primer cuadro de la Figura 21 (agregado árido machacado homogéneo). Con el uso de dicho material, se logrará que el espesor de la losa de concreto sea menor, ya que la resistencia de dicho material es mayor al P-154.

Los espesores de la capa subbase a establecer para analizar el diseño más económico que cumpla con las solicitudes son 8, 10 y 12 pulgadas.

¹⁴ Fórmula obtenida de la circular FAA AC 150/5320-6E. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos

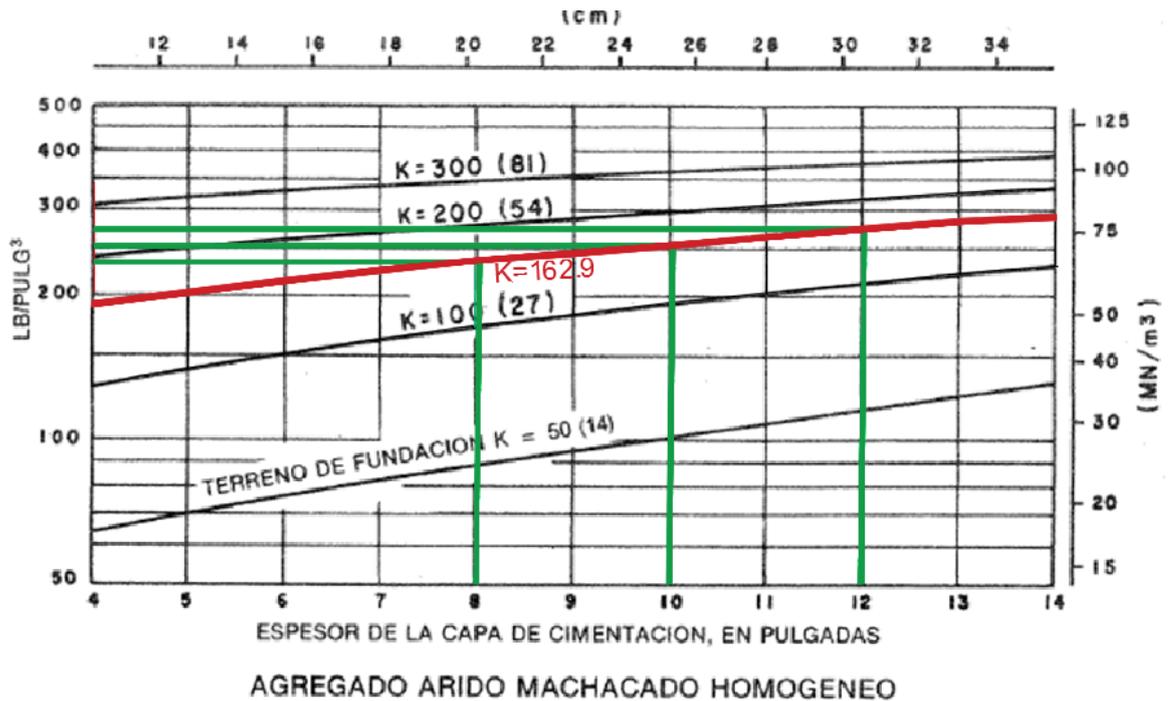


Figura 27. Determinación de k. Fuente: OACI, Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III, Pavimentos. Canadá, 1983

6.2.1. DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO PARA UN ESPESOR DE LA SUBBASE IGUAL A 8"

De la figura 27 se puede hallar el valor del módulo de reacción de la subrasante, con los siguientes datos de entrada:

- Espesor del cemento: 8"
- Módulo de reacción de la subrasante: 162.9 pci

Obteniéndose el valor de $k = 234$ pci

- **Determinación de la aeronave de cálculo**

Se determinará el espesor requerido para cada aeronave presentada en el tránsito aéreo, en función a su peso de despegue, salidas anuales, tren de aterrizaje y la dirección de los mismos.

Tabla 21. Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 8". Fuente: Propia

AERONAVE	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	75,500.00	166,449.01	10,337.01	DUAL	14.9
AIRBUS A320-233	77,000.00	169,755.94	141.43	DUAL	12.9
AIRBUS A321-231	93,500.00	206,132.21	4,919.46	DUAL	16.1
AIRBUS A330-200	230,000.00	507,063.20	192.68	DUAL TANDEM	16.3
ANTONOV AN-26-100	25,000.00	55,115.57	1,430.74	DUAL	7.1
ANTONOV AN-32B (AN-32)	95,028.00	59,524.81	157.83	DUAL	7.2
BOEING B727-200	397,000.00	209,500.88	18.45	DUAL	14.2
BOEING B737-200	115,680.00	108,445.39	5,649.18	DUAL	11.6
BOEING B747-200	115,680.00	833,347.35	614.93	WIDE BODY	13
BOEING B747-400	179,170.00	875,235.18	338.21	WIDE BODY	14
BOEING B757-200	186,880.00	255,030.74	1,059.73	DUAL TANDEM	11.7
BOEING B767-200ER	186,880.00	395,002.23	139.38	DUAL TANDEM	16.2
BOEING B767-300F	204,120.00	411,999.88	81.99	DUAL TANDEM	17
BOEING B767-400	209,000.00	450,007.57	6,354.30	DUAL TANDEM	19
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	263,320.00	460,766.13	47.14	DUAL TANDEM	12.9
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	273,300.00	580,521.23	69.69	WIDE BODY	13.9
MCDONNELL DOUGLAS MD11	286,000.00	602,523.36	225.48	WIDE BODY	14
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	93,500.00	630,522.07	96.34	WIDE BODY	14.5

De la tabla 21, se muestra que el mayor espesor es el requerido por la aeronave B767-400, al igual que en el caso de diseño de pavimentos flexibles. Por tanto, la aeronave de diseño es la mencionada.

El número de salidas equivalentes es de 14,189.31, el cálculo de esta se muestra en la sección 6.1

- **Determinación del espesor de la losa de concreto**

Con el ábaco correspondiente a la aeronave B-767 (figura 9 del anexo 2), se halla el espesor de la losa de concreto con los siguientes datos de entrada:

- Aeronave de diseño: B767-400
- Dirección crítica: Ángulo agudo a la junta
- Peso bruto de aeronave de diseño: 450,007.57
- Salidas equivalentes: 14,189.31

- Módulo de reacción de la subbase (k): 234 pci
- Resistencia del concreto a la flexión: 50 kg/cm² (711.2 psi)

Se ha considerado como dirección crítica el ángulo agudo a la losa debido a que para el tren de aterrizaje dual tándem, esta es la dirección que produce la mayor tensión. En caso de los trenes de aterrizaje single y dual, la tensión máxima se produce cuando la dirección es en paralelo o perpendicular.

De esta manera, se obtiene que el espesor de la losa de concreto será igual a 20.2”.

Se tendrá la siguiente sección del pavimento:



Figura 28. Sección Área Crítica para 8” de base. Fuente: Propia

6.2.2. DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO PARA UN ESPESOR DE LA SUBBASE IGUAL A 10”

De la figura 27 se puede hallar el valor del módulo de reacción de la subrasante, con los siguientes datos de entrada:

- Espesor del cemento: 10”
- Módulo de reacción de la subrasante: 162.9 pci

Obte Fuente: Propia

- **Determinación de la aeronave de cálculo**

Se determinará el espesor requerido para cada aeronave presentada en el tránsito aéreo, en función a su peso de despegue, salidas anuales, tren de aterrizaje y la dirección crítica de los mismos.

Tabla 22. Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 10”. Fuente: Propia

AERONAVE	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	75,500.00	166,449.01	10,337.01	DUAL	14.6
AIRBUS A320-233	77,000.00	169,755.94	141.43	DUAL	12.8
AIRBUS A321-231	93,500.00	206,132.21	4,919.46	DUAL	15.8
AIRBUS A330-200	230,000.00	507,063.20	192.68	DUAL TANDEM	16.2
ANTONOV AN-26-100	25,000.00	55,115.57	1,430.74	DUAL	6.9
ANTONOV AN-32B (AN-32)	95,028.00	59,524.81	157.83	DUAL	7
BOEING B727-200	397,000.00	209,500.88	18.45	DUAL	13.6
BOEING B737-200	115,680.00	108,445.39	5,649.18	DUAL	11.2
BOEING B747-200	115,680.00	833,347.35	614.93	WIDE BODY	12.9
BOEING B747-400	179,170.00	875,235.18	338.21	WIDE BODY	13.9
BOEING B757-200	186,880.00	255,030.74	1,059.73	DUAL TANDEM	11.5
BOEING B767-200ER	186,880.00	395,002.23	139.38	DUAL TANDEM	16
BOEING B767-300F	204,120.00	411,999.88	81.99	DUAL TANDEM	16.9
BOEING B767-400	209,000.00	450,007.57	6,354.30	DUAL TANDEM	18.8
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	263,320.00	460,766.13	47.14	DUAL TANDEM	12.6
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	273,300.00	580,521.23	69.69	WIDE BODY	13.7
MCDONNELL DOUGLAS MD11	286,000.00	602,523.36	225.48	WIDE BODY	13.8
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	93,500.00	630,522.07	96.34	WIDE BODY	14.3

De la tabla 22, se muestra que el mayor espesor es el requerido por la aeronave B767-400, al igual que en el caso de diseño de pavimentos flexibles. Por tanto, la aeronave de diseño es la mencionada.

- **Determinación del espesor de la losa de concreto**

Con el ábaco correspondiente a la aeronave B-767 (figura 9 de anexo 2), se halla el espesor de la losa de concreto con los siguientes datos de entrada:

- Aeronave de diseño: B767-400
- Tren de aterrizaje: Dual Tandem
- Dirección crítica: Ángulo agudo a la junta

- Peso bruto de aeronave de diseño: 450,007.57
- Salidas equivalentes: 14,189.31
- Módulo de reacción de la subbase (k): 250 pci
- Resistencia del concreto a la flexión: 50 kg/cm² (711.2 psi)

De esta manera, se obtiene que el espesor de la losa de concreto es de 19.7”.

Se tendrá la siguiente sección del pavimento:



Figura 29. Sección Área Crítica para 10” de subbase (valores en pulgadas).
Fuente: Propia

6.2.3. DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO PARA UN ESPESOR DE LA SUBBASE IGUAL A 12”

De la figura 27 se puede hallar el valor del módulo de reacción de la subrasante, con los siguientes datos de entrada:

- Espesor del cemento: 10”
- Módulo de reacción de la subrasante: 162.9 pci

Obteniéndose el valor de $k = 271$ pci

- **Determinación de la aeronave de cálculo**

Se determinará el espesor requerido para cada aeronave presentada en el tránsito aéreo, en función a su peso de despegue, salidas anuales, tren de aterrizaje y la dirección crítica de los mismos.

Tabla 23. Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 12”. Fuente: Propia

AERONAVE	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	75,500.00	166,449.01	10,337.01	DUAL	14.4
AIRBUS A320-233	77,000.00	169,755.94	141.43	DUAL	12-Jul
AIRBUS A321-231	93,500.00	206,132.21	4,919.46	DUAL	15.6
AIRBUS A330-200	230,000.00	507,063.20	192.68	DUAL TANDEM	16
ANTONOV AN-26-100	25,000.00	55,115.57	1,430.74	DUAL	6.8
ANTONOV AN-32B (AN-32)	95,028.00	59,524.81	157.83	DUAL	7
BOEING B727-200	397,000.00	209,500.88	18.45	DUAL	13.4
BOEING B737-200	115,680.00	108,445.39	5,649.18	DUAL	11.1
BOEING B747-200	115,680.00	833,347.35	614.93	WIDE BODY	12.8
BOEING B747-400	179,170.00	875,235.18	338.21	WIDE BODY	13.8
BOEING B757-200	186,880.00	255,030.74	1,059.73	DUAL TANDEM	11.4
BOEING B767-200ER	186,880.00	395,002.23	139.38	DUAL TANDEM	15.8
BOEING B767-300F	204,120.00	411,999.88	81.99	DUAL TANDEM	16.7
BOEING B767-400	209,000.00	450,007.57	6,354.30	DUAL TANDEM	18.6
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	263,320.00	460,766.13	47.14	DUAL TANDEM	12.5
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	273,300.00	580,521.23	69.69	WIDE BODY	13.5
MCDONNELL DOUGLAS MD11	286,000.00	602,523.36	225.48	WIDE BODY	13.6
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	93,500.00	630,522.07	96.34	WIDE BODY	14.1

De la tabla 23, se muestra que el mayor espesor es el requerido por la aeronave B767-400, al igual que en el caso de diseño de pavimentos flexibles. Por tanto, la aeronave de diseño es la mencionada.

- **Determinación del espesor de la losa de concreto**

Con el ábaco correspondiente a la aeronave B-767 (figura 9 de anexo 2), se halla el espesor de la losa de concreto con los siguientes datos de entrada:

- Aeronave de diseño: B767-400
- Tren de aterrizaje: Dual Tandem
- Dirección crítica: Ángulo agudo a la junta
- Peso bruto de aeronave de diseño: 450,007.57
- Salidas equivalentes: 14,189.31
- Módulo de reacción de la subbase (k): 271 pci

- Resistencia del concreto a la flexión: 50 kg/cm² (711.2 psi)

De esta manera, se obtiene que el espesor de la losa de concreto es de 19.6”.

Se tendrá la siguiente sección del pavimento:



Figura 30. Sección Área Crítica para 12" de subbase. Fuente: Propia

6.2.4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE SECCIONES CALCULADAS

Se considera que el precio de la base granular es de S/. 69.97 por m³ y el de la losa de concreto de S/. 431.24 por m³.

Se denomina:

- Alternativa 1: sección conformada por 8” (20cm) de base y 21” (55cm) de losa de concreto
- Alternativa 2: sección conformada por 10” (25cm) de base y 20” (50cm) de losa de concreto
- Alternativa 3: sección conformada por 12” (30cm) de base y 20” (50cm) de losa de concreto.

De esta manera, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 24. Comparación económica de alternativas propuestas. Fuente: Propia

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Precio base por metro cuadrado	S/. 13.99	S/. 17.49	S/. 20.99
Precio de concreto por metro cuadrado	S/. 237.18	S/. 215.62	S/. 215.62
Total	S/. 251.18	S/. 233.11	S/. 236.61

Por tanto, la alternativa más económica y la seleccionada será alternativa 2.

6.2.5. DISEÑO DE LA SECCIÓN

De la misma manera en que fue calculado para el caso diseño de pavimento flexible, es necesario determinar la sección requerida. Se utilizará dicha sección para la pista de aterrizaje, calles de rodaje y plataforma.

Tal como fue calculado en la anterior sección, se empleará un pavimento conformado por 10" de subbase estabilizada y 19.7" de losa de concreto (Fig. 6.9).

- **Espesor del borde de la pista de aterrizaje**

Al igual que en el diseño del pavimento flexible, en el diseño del pavimento rígido se puede realizar la reducción de la capa de la superficie del pavimento, para ello es necesario multiplicar el valor del espesor de la losa de concreto por 0.7.

De esta manera, el espesor de la losa de concreto se reducirá hasta un valor de 0.7×20 ; es decir, 14".

Asimismo, para mantener nivelada la sección, el espesor de la capa subbase será igual a la diferencia entre el espesor total del pavimento y los espesores obtenido de la losa de concreto: $30 - 14 = 16$ "

A continuación, se muestra un esquema de la sección de la pista de aterrizaje que resume los datos calculados:

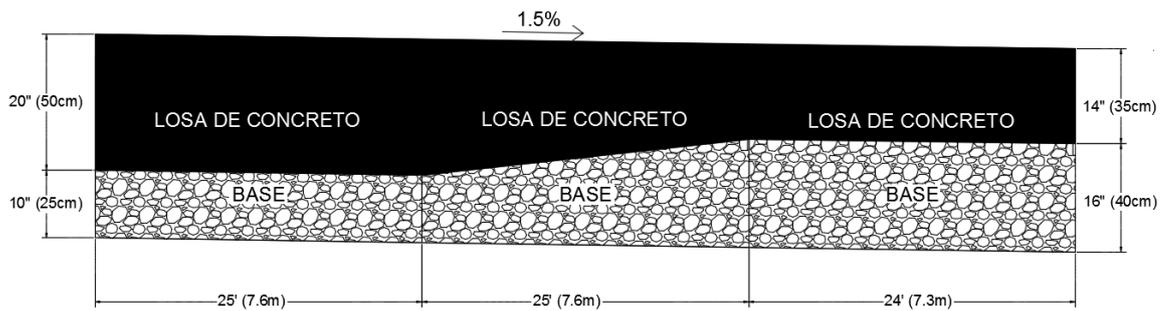


Figura 31. Sección pavimento rígido. Fuente: Propia

6.2.6. DISEÑO DE JUNTAS

- **Tipo de juntas**

Tal como se mencionó en el segundo capítulo, se hará uso de las juntas de expansión, construcción y de contracción.

- **Juntas de expansión:** se utilizará las juntas tipo A
- **Juntas de contracción:** se utilizará juntas de contracción tipo F (dowel) y H (dummy) donde corresponda
- **Juntas de construcción:** se utilizará juntas de construcción tipo D (dowel)

- **Espaciado de juntas**

Dado que la base no es estabilizada, se deberá emplear la tabla 1, en la cual se indica el espaciamiento máximo de juntas para pavimento rígido. De esta se obtiene que el espaciamiento transversal y longitudinal máximo es igual a 25' o 7.6m. Por ello, se ha considerado un espaciamiento de juntas de 6.50m.

- **Barras en Juntas**

Se emplearán dowels en las juntas para proporcionar transferencia de carga y para prevenir el desplazamiento vertical relativo. El tamaño, longitud y espaciado de los mismos deben ser tal que resistan los esfuerzos cortantes y de flexión, es por ello que se tendrá como referencia para las dimensiones la tabla 4, de la cual se tienen las siguientes características:

- Diámetro: 1 ½"
- Longitud: 20" (0.51m)
- Espaciado: 18" (0.45m)

7. METODO DE LA FAA – AC 150/5320-6F

Para realizar el diseño según la circular AC 150/5320-6F, es necesario hacer uso del programa FAARFIELD (versión 1.41), el cual es un software de la FAA empleado específicamente para la realización de diseño de pavimentos de aeropuertos.

Dicho software tiene en cuenta para el tráfico de aeronaves el factor CDF, usado para un conjunto diverso de aviones, de manera que no es necesario realizar la conversión equivalente según la aeronave de diseño, tal como se hizo en el anterior capítulo.

Los datos de entrada requeridos para el uso de FAARFIELD son:

- Tipo de material de las capas
- Resistencia de la subrasante
- Tráfico de aeronaves
- Peso bruto de las aeronaves
- Razón de crecimiento anual

Los datos que se obtienen de FAARFIELD son el espesor de las capas, así como el valor del CDF de cada aeronave dentro del tráfico.

7.1. DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Al iniciar el diseño en el programa, se tendrá que elegir un tipo de sección, cuya definición de cada etiqueta se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 25. Descripción de las secciones. Fuente: Data Entry, flexible pavement design. Federal Aviation Administration. Estados Unidos, 2012

Nombre de la sección	Tipo de Pavimento
ACAggregate	Nuevo pavimento flexible en base conformada por agregados
AConFlex	HMA superpuesta en pavimento flexible
AConRigid	HMA superpuesta en pavimento rígido
NewFlexible	Nuevo pavimento flexible sobre base estabilizada
NewRigid	Nuevo pavimento rígido sobre base estabilizada
PCConFlex	PCC sobre pavimento flexible
PCConRigid	PCC no unido al pavimento rígido

En este caso, se escogerá la opción ACAggregate. Luego, se deberá seleccionar el tipo de material a emplear según el capítulo 4. *ESTUDIO DE SUELOS*, de manera que cumpla las características de la sección elegida.

7.1.1. SELECCIÓN DE MATERIAL

Las características de los materiales mencionados a continuación se encuentran en el Anexo 3 de la presente tesis.

- **Carpeta Asfáltica:** se diseñará con el tipo de material P-401 Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA Surface).
- **Capa base:** dado que el material a utilizar según el estudio de canteras es piedra chancada, de un CBR mayor a 100%, no será necesario estabilizar la capa. Por tanto, se empleará el material P-209.
- **Capa subbase:** el material a utilizar según el estudio de canteras es arena mal graduada, de un CBR mayor a 35%, no será necesario estabilizar la subbase. Por tanto, se empleará el material P-154, cuyas características han sido descritas en la tabla.

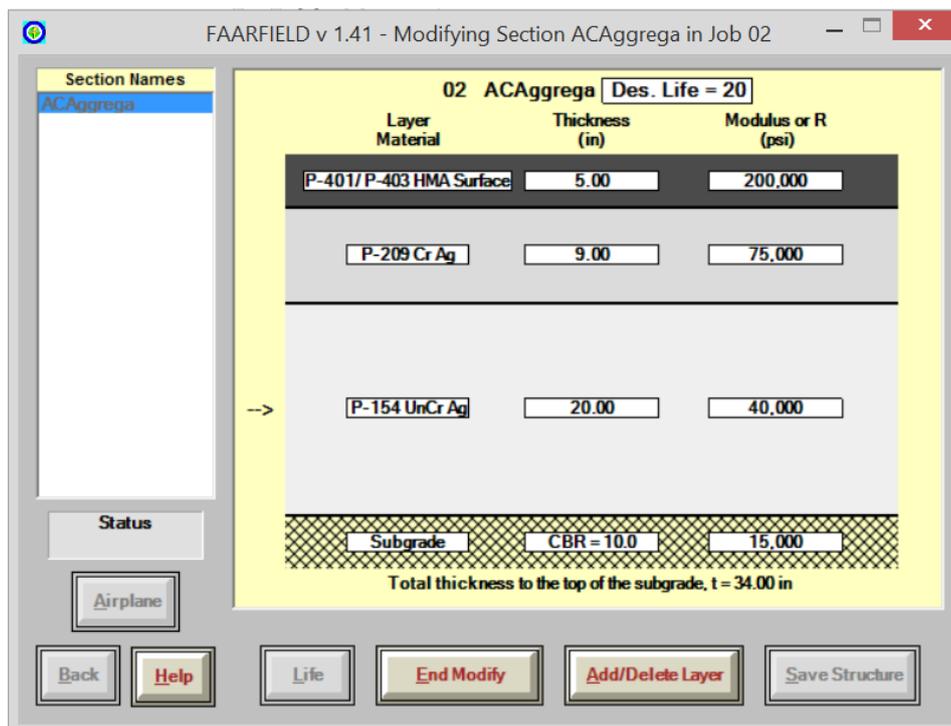


Figura 32. Sección del pavimento previo – Pavimento Flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

En la figura 32 se muestra la selección de materiales mencionados, se han colocado los espesores de cada capa según los resultados obtenidos en el anterior capítulo. Asimismo, se ha colocado el valor del CBR de la subrasante mencionado en el capítulo 4. *ESTUDIO DE SUELOS*.

El software FAARFIELD tiene predeterminado el valor del módulo de cada material; sin embargo, permite la variación de los materiales compuestos parcialmente por asfalto (P-401, P-403) o cemento (P-501, P-306 y P-304). El módulo de los materiales P-209 y P-154, son determinados internamente en el programa.

7.1.2. REGISTRO DE TRÁFICO AÉREO EN FAARFIELD

Una vez que se tiene definido el tipo de material a emplear en cada capa, se ingresará el tráfico de aeronave, para ello se seleccionará el grupo de aeronave, y luego la aeronave, ubicada dentro de la biblioteca de aviones; se repetirá este proceso hasta que todas las aeronaves incluidas en el capítulo 3. TRÁFICO AÉREO hayan sido ingresadas. Asimismo, se deberá ingresar las salidas anuales de cada aeronave y la razón de crecimiento anual, el peso bruto de

estas son ingresadas automáticamente por el programa, y pueden ser modificados siempre y cuando esté dentro del rango de variación (-40% y +25% del peso bruto registrado en el programa)

Se está utilizando un valor de 7% para la razón anual de crecimiento tal como se indicó en el capítulo 3.

Airplane Name (23)	Gross Taxi Weight (lbs)	Annual Departures	% Annual Growth
B767-400	450,008	3,100	7.00
L-1011	460,766	23	7.00
DC10-30/40	580,521	34	7.00
DC10-30/40 Belly	580,521	34	7.00
MD11	602,523	110	7.00
MD11Belly	602,523	110	7.00
MD11ER	630,522	47	7.00
MD11ER Belly	630,522	47	7.00

Figura 33. Registro de Tráfico Aéreo en FAARFIELD – Pavimento Flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Tal como se muestra en la figura 33, algunas aeronaves pueden aparecer en la lista dos veces, como por ejemplo MD11ER y MD11ER Belly, esto es debido a que el programa registra el tren de aterrizaje de la aeronave de esta manera, mediante la primera registra el tren de aterrizaje de cada puntal, y mediante el segundo el del centro, de modo que se trata cada registro de la aeronave de manera independiente; sin embargo, el peso bruto y las salidas anuales se encuentran enlazados. En la siguiente figura se muestra el tren de aterrizaje de cada una, los cuales son una parte del tren de aterrizaje de la aeronave original.

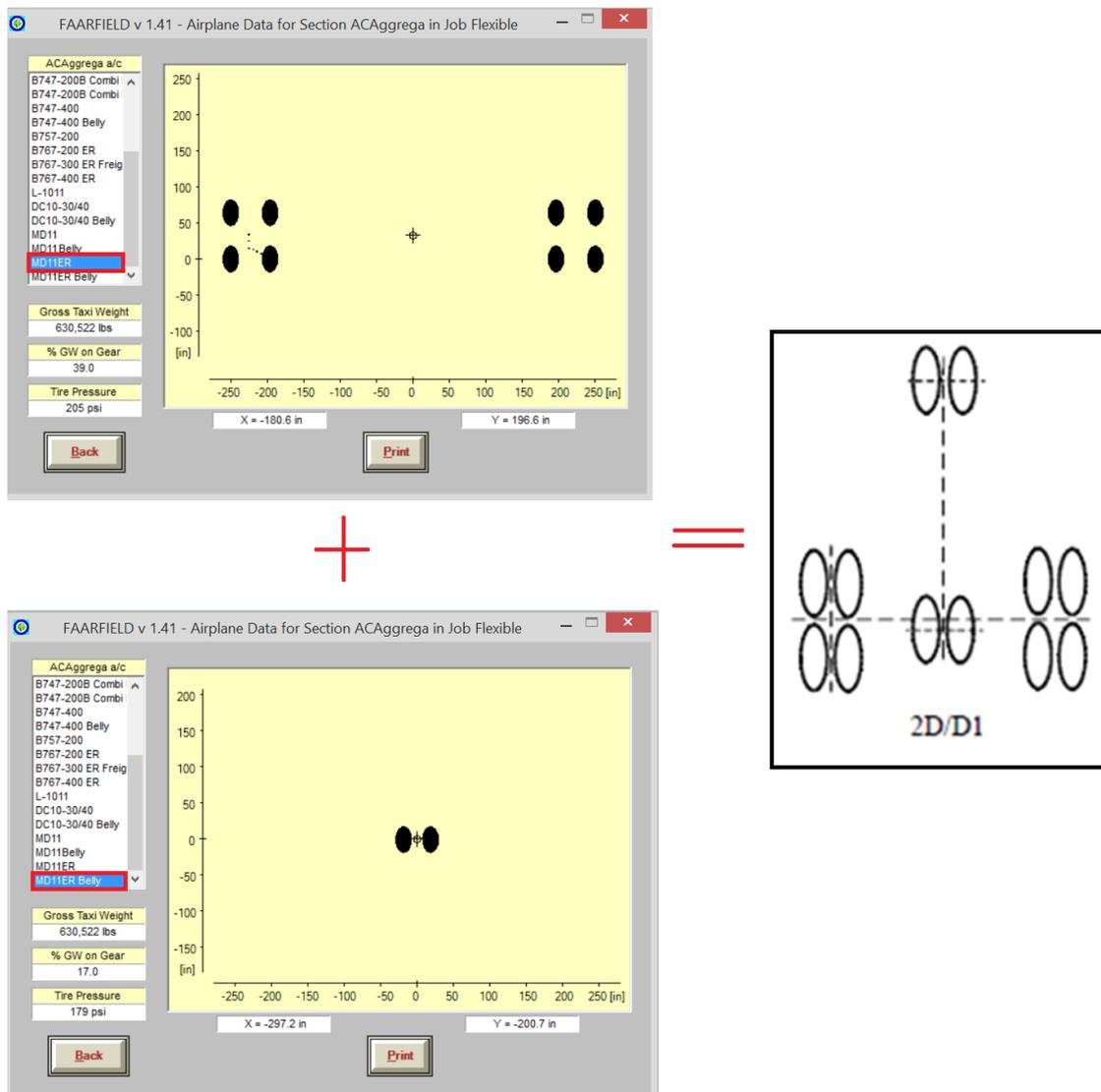


Figura 34. Ejemplo registro de tren de aterrizaje de aeronave 2D/D1 – Pavimento Flexible. Fuente: Propia

7.1.3. CÁLCULO DE ESPESOR DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO

Una vez ingresado los datos mencionados, se podrá diseñar la estructura. FAARFIELD por defecto ajusta una capa del pavimento según el tipo de sección; sin embargo, se puede habilitar para ajustar no necesariamente la capa predeterminada.

Tabla 26. Capa a ser ajustada. Fuente: Data Entry, flexible pavement design. Federal Aviation Administration. Estados Unidos, 2012

Nombre de la sección	Capa a ser ajustada
ACAggregate	P-154 Subbase
AConFlex	P-401
AConRigid	P-401
NewFlexible	P-209 Subbase
NewRigid	P-501 superficie
PConFlex	P-501
PConRigid	P-501

En este caso, la capa a ser ajustada será la subbase, el programa ajustará la capa de diseño hasta que el valor del CDF llegue a 1.0. Asimismo, se ha considerado una vida útil de diseño igual a 20 años.

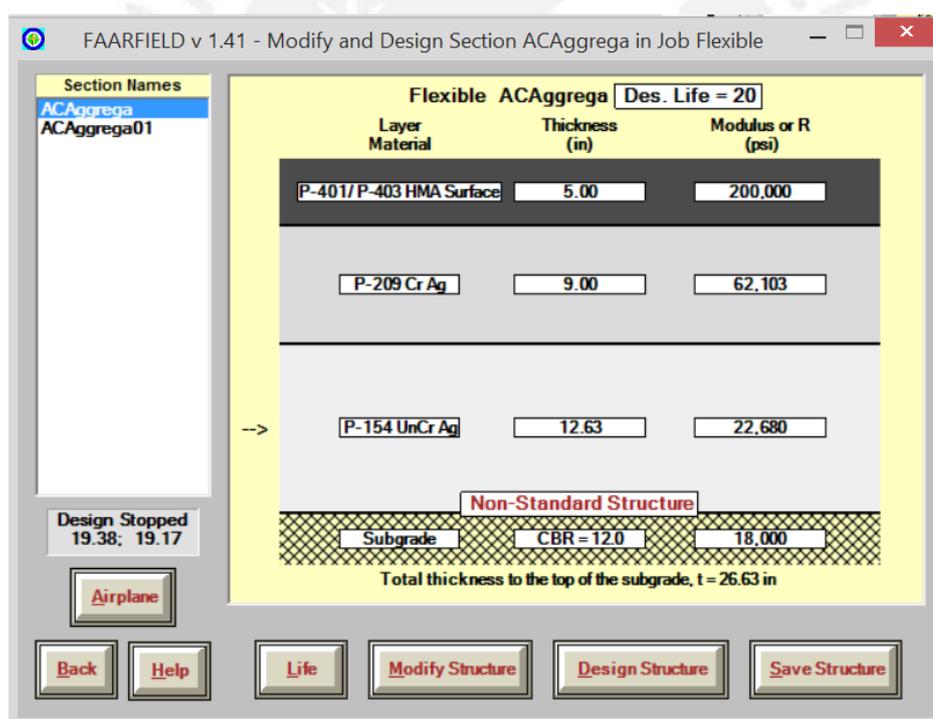


Figura 35. Espesores de las capas de pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

La sección muestra el mensaje *Not-Standard Structure* debido a que, al tener el tráfico aéreo cargas mayores a 100,000 lbs, se debería colocar una subbase y base estabilizada; sin embargo, en este caso no será necesario ya que el valor del

CBR de la subbase es mayor a 35 y el de la base mayor a 100. Se aprecia que el valor del espesor de la subbase obtenido es menor al calculado en el anterior capítulo, esto es debido a las diferencias de diseño que cada uno de los métodos considera.

En la siguiente figura se muestra la contribución en el valor del CDF de las aeronaves más representativas.

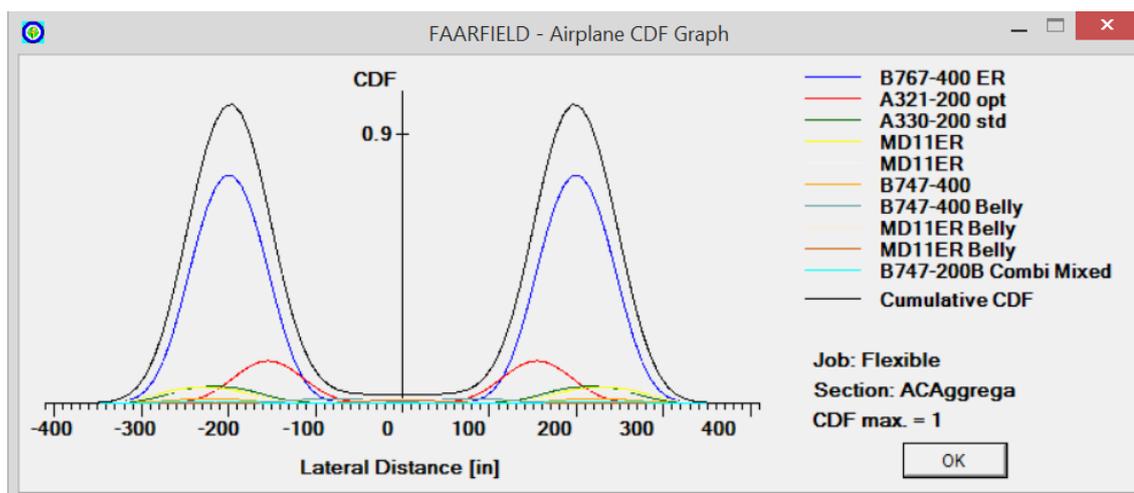


Figura 36. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Tal como se muestra, la aeronave cuyo aporte es el más significativo (0.79) es la BOEING B767-400, la cual fue determinada en el anterior método como la aeronave de diseño.

- **Espesor del borde de la pista de aterrizaje**

De manera análoga a la anterior metodología, la circular vigente también permite una sección de grosor variable para la pista de aterrizaje, tanto en la capa base como en la carpeta asfáltica, considerando que se debe mantener el mismo espesor del pavimento para que la sección sea nivelada. Según la FAA (Ref. 6), esta reducción se calcula considerando una tasa de crecimiento anual del tráfico igual a 1%, de esta manera se tendrá los siguientes espesores:

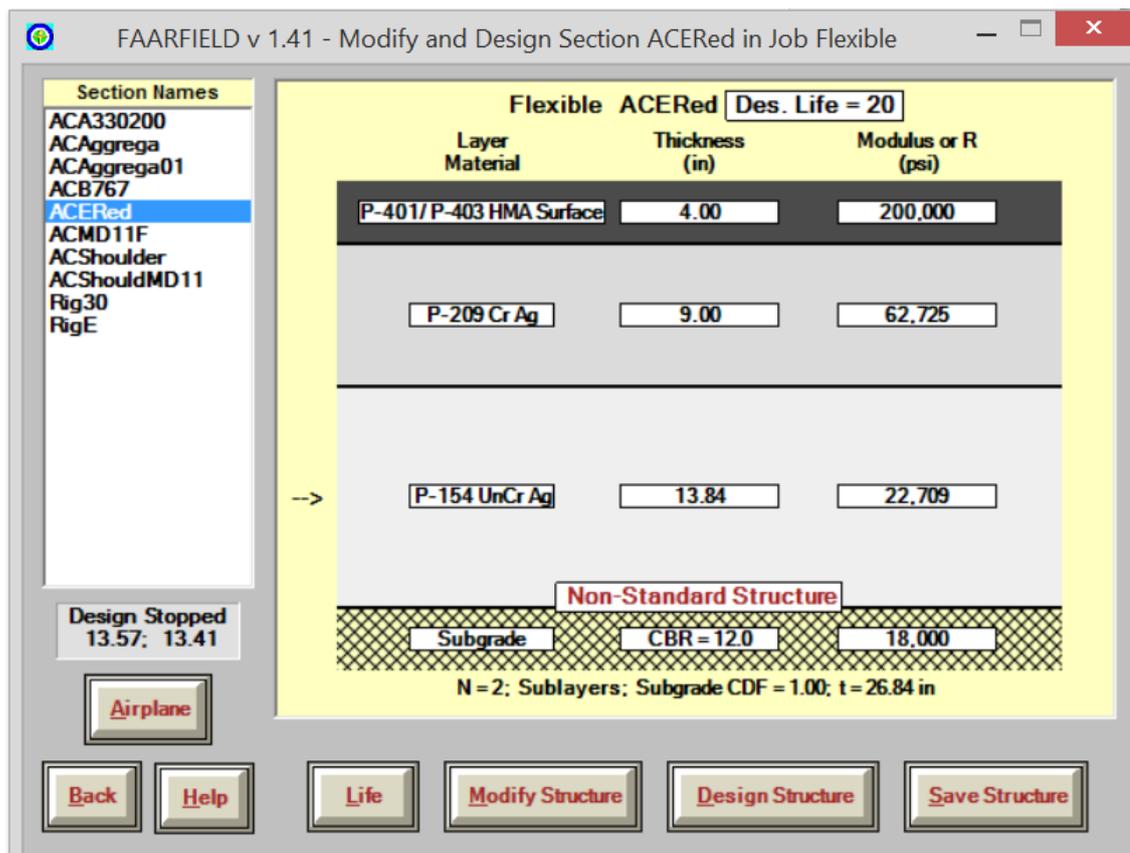


Figura 37. Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje del pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

En este caso, el espesor de la capa base se ha mantenido, debido a que si se consideraba un menor espesor en esta capa, el de la capa subbase hubiese aumentado con lo que la sección no mantendría el espesor total del pavimento. Se ha considerado una reducción de la carpeta asfáltica hasta el valor mínimo permitido.

Con ello, se tendrá la siguiente sección del pavimento:

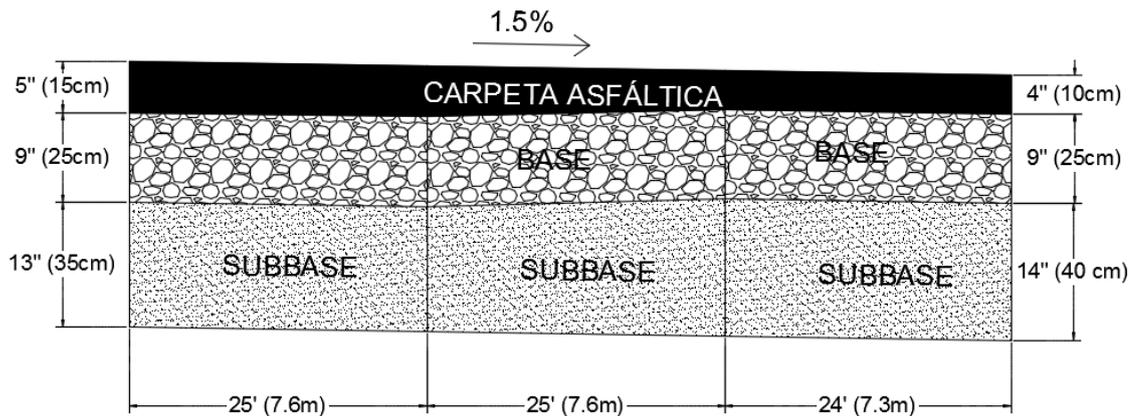


Figura 38. Sección del Pavimento Flexible. Fuente: Propia

La FAA considera que se deberá tener un ancho de la pista del espesor al 100% en los 25 pies de la sección, la zona de transición también será de 25 pies y, dado que el ancho de la pista del Aeropuerto de Pisto es de 45m, la dimensión restante será de 24 pies.

7.1.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE AMBAS METODOLOGÍAS

Una vez que se ha calculado el espesor de las capas del pavimento flexible mediante las metodologías de las circulares AC 150/5320-6D y AC 150/5320-6F, se procede a realizar el comparativo entre ambos resultados:

Tabla 27. Comparativo de los resultados – Pavimento flexible de espesor al 100%. Fuente: Propia

METODOLOGÍA	ESPELOR DE SUBBASE (cm)	ESPELOR DE BASE (cm)	ESPELOR DE CARPETA ASFÁLTICA (cm)
AC 150/5320-6D	55	25	15
AC 150/5320-6F	35	25	15
VARIACIÓN (%)	36.36%	0.00%	0.00%

Como se muestra, el espesor que ha variado es el de la subbase (36.36%), esto es debido a que en el diseño mediante FAARFIELD se consideró variar únicamente dicha capa y mantener los otros dos espesores según el anterior diseño.

Tabla 28. Comparativo de los resultados – Espesor reducido. Fuente: Propia

METODOLOGÍA	ESPESOR DE SUBBASE (cm)	ESPESOR DE BASE (cm)	ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA (cm)
AC 150/5320-6D	70	20	5
AC 150/5320-6F	40	25	10
VARIACIÓN (%)	42.86%	-25.00%	-100.00%

La sección correspondiente a la reducción de espesores presenta una mayor variación en comparación de la sección del pavimento estructural, esto es debido a que en la circular vigente se consideran valores mínimos de los espesores de las capas, los cuales son mayores a la anterior circular. Asimismo, la circular vigente presenta un método más conservador al anterior para la reducción del pavimento.

7.1.5. CÁLCULO DEL ESPESOR DEL MARGEN

El margen de la pista está diseñado de manera que se puedan situar en él de manera ocasional aeronaves y vehículos de mantenimiento, es por ello que en su diseño se considera un total de 15 pases del avión más exigente de todo el tráfico aéreo considerado. Para realizar el diseño del margen de los pavimentos, se deberá crear un nuevo archivo en FAARFIELD con los mismos materiales del anterior diseño. El espesor de las capas deberán cumplir los requisitos mínimos indicados en la siguiente tabla.

Tabla 29. Espesor mínimo de las capas del margen - Pavimento Flexible. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016

Capa	Ítem	Espesor mínimo, pulgadas (mm)
Carpeta Asfáltica	P-401, P-403	4.0 (100)
Base de Agregados	P-209, P-208	6.0 (160)
Subbase	P-154	4.0 (100)

Una vez que se haya creado la nueva sección, se deberá determinar cuál es la aeronave que mayor espesor de pavimento demanda (independientemente al número de salidas anuales consideradas en el tráfico). Para ello, se ingresará todas las aeronaves de la combinación de tráfico con 1200 salidas anuales. Luego, se hará click en el botón “Life”, y se verificará cuáles son las aeronaves con un

mayor valor de CDF. En la figura 39 se muestra el gráfico donde se indican cuáles son estas aeronaves.

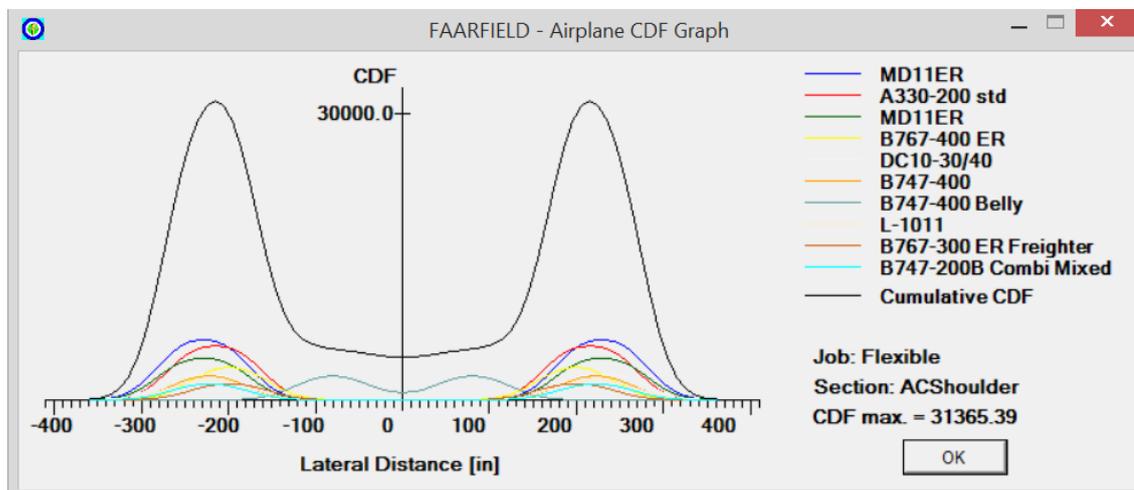


Figura 39. Aeronaves que mayor espesor de pavimento demandan. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

De la figura 39, se tiene que las aeronaves con mayor CDF son MCDONNELL DOUGLAS MD11 (6,301.10), AIRBUS A330-200 (5,656.94), MCDONNELL DOUGLAS MD11-F (4,3611.45) y BOEING B767-400 (3,386.05). Por tanto, se evaluará cuál de ellas es la más demandante.

Para ello, se borrará toda la combinación de aeronaves ingresada, excepto por la aeronave a ser evaluada. Se cambiará el valor de salidas anuales a 1 y se modificará el periodo de diseño a 15 años, de manera que se diseñe el pavimento por un total de salidas de 15 de la aeronave más demandante (tal como se indicó). Una vez que todos los datos de entrada hayan sido ingresados, se procederá a diseñar la sección del pavimento. Se repetirá este proceso para las 4 aeronaves mencionadas.

Luego de que se evaluaron las 4 aeronaves, se constató que la que mayor valor de espesor de pavimento solicitaba era la MCDONNELL DOUGLAS MD11-F, por ello, el espesor obtenido de la carpeta asfáltica y de la base diseñado para esta aeronave, considerando las salidas anuales igual a 1 y un periodo de diseño igual a 15 años, será el espesor de las capas del margen.

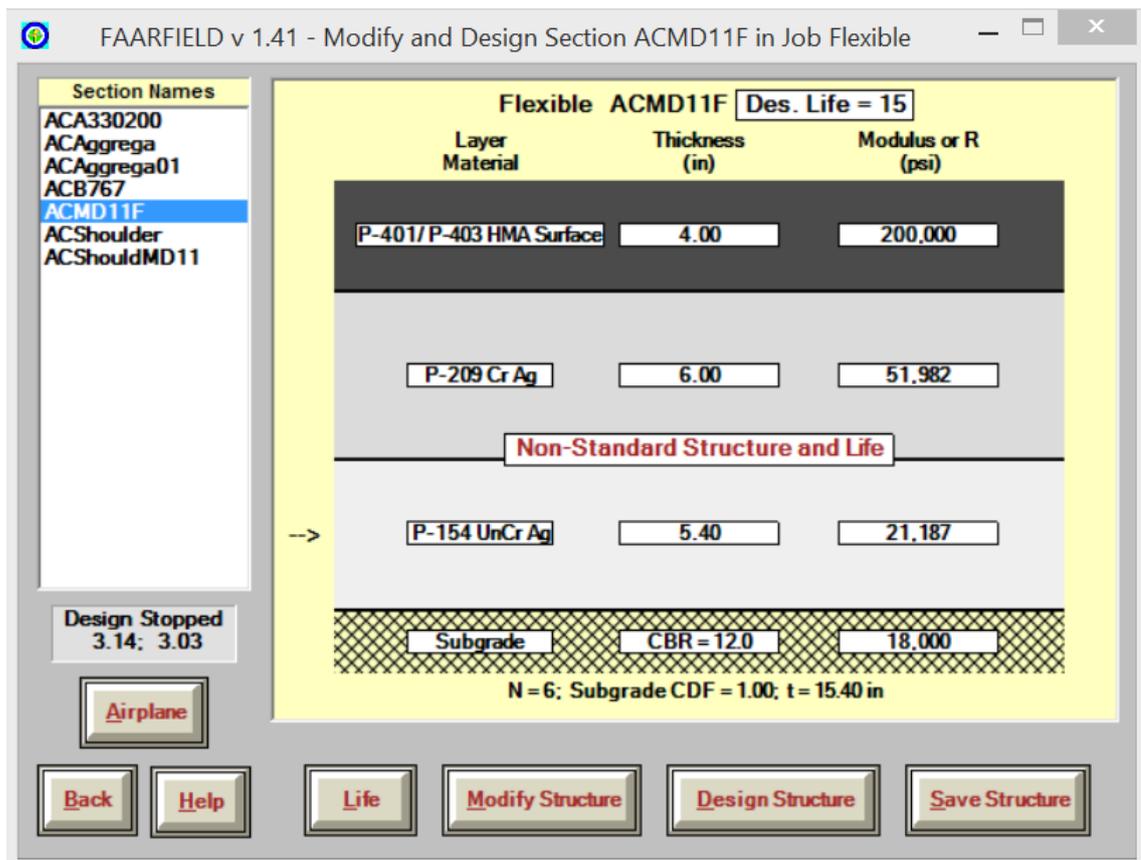


Figura 40. Espesor de las capas del margen del pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

7.2. DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO

La sección que se utilizará para el diseño del pavimento rígido es la sección NewRigid, cuya descripción se encuentra en la tabla 25. Se eliminará la base estabilizada de la estructura predeterminada de la sección en el software, y se empleará una capa granular en su reemplazo.

7.2.1. SELECCIÓN DE MATERIAL

Las características de los materiales mencionados a continuación se encuentran en el Anexo 3 de la presente tesis.

- **Losa de concreto:** se empleará el material P-501 PCC Surface, descrito en el anexo 3.

- **Base:** tal como se mencionó en el capítulo 2, se puede considerar el uso de una capa subbase como reemplazo de la capa base únicamente en caso de que el diseño de pavimento sea para aeronaves cuyo peso sea igual o menor a 30,000 libras o 13,610 kg, dado que no es el caso, se empleará la base granular P-209.

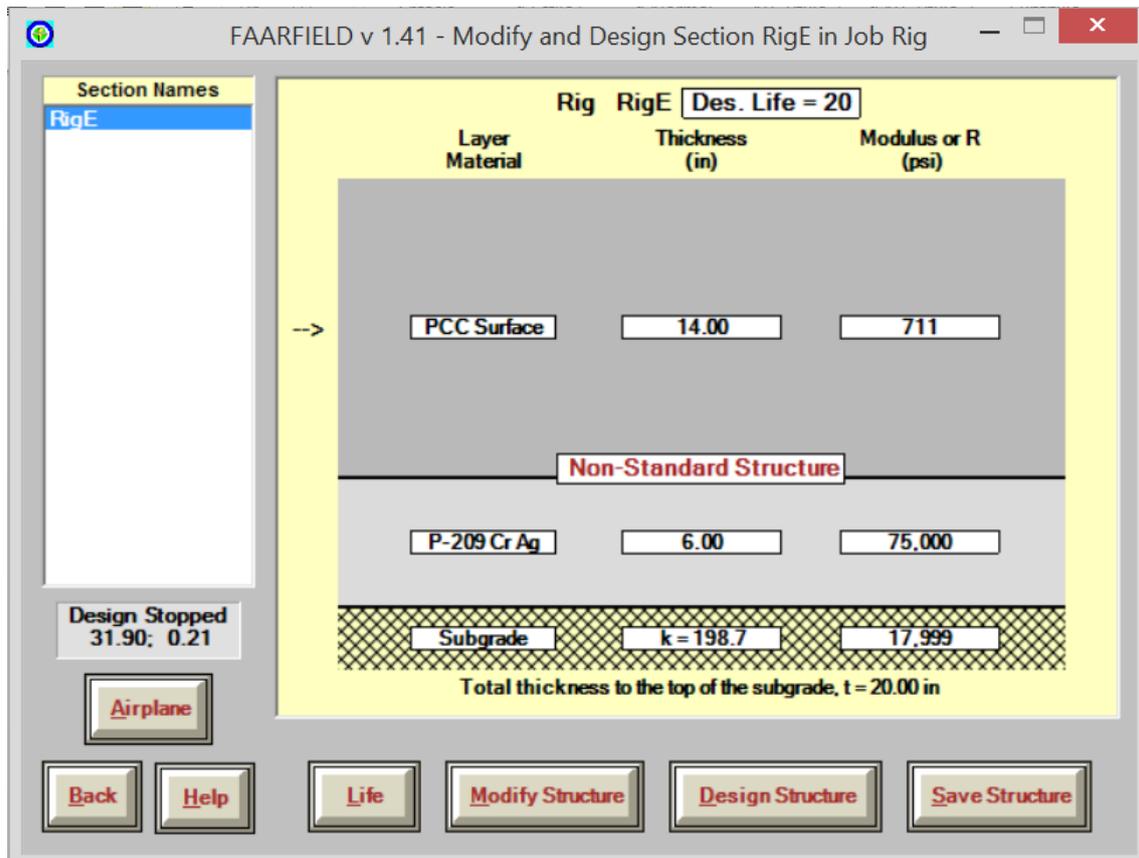


Figura 41. Selección del material – Pavimento Rígido. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

En la figura 41 se muestra la selección de materiales mencionados, los espesores se encuentran predeterminados en el programa. El valor de K de la subrasante se debe colocar, y es el que corresponde según el suelo con el que se ha estado diseñando siguiendo la relación indicada en el ítem 2.4.2.1 *Diseño de Pavimento Rígido*, la cual es:

$$K = 28.6926 \times CBR^{0.7788}, \text{ k en pci}$$

Considerando que el valor de CBR de diseño de la subrasante es 12%, se tiene que K es igual a 198.7 pci, Asimismo, se sabe que el valor de la resistencia del concreto a la flexión en este diseño es 50 kg/cm² (711.2 psi).

7.2.2. REGISTRO DE TRÁFICO AÉREO EN FAARFIELD

Dado que el tráfico aéreo para el diseño del pavimento rígido es el mismo tráfico con el que se realizó el diseño del pavimento flexible, el registro de tráfico aéreo será el mostrado en el ítem 7.1.2.

7.2.3. CÁLCULO DEL ESPESOR DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO

Para realizar el cálculo del espesor de las capas del pavimento, se usará un procedimiento similar al empleado para el diseño de pavimento rígido según la metodología de la circular AC 150/5320-6D; es decir, considerando tres distintos diseños: el primero con espesor de base a 8", el segundo con espesor de base igual a 10" y el tercero con espesor de base igual a 12".

En este caso, la capa a ser ajustada será la losa de concreto, según la tabla 26, el programa ajustará la capa de diseño hasta que el valor del CDF llegue a 1.0. Asimismo, se ha considerado una vida útil de diseño igual a 20 años.

- **Cálculo del espesor de la losa de concreto para un espesor de base igual a 8"**

Se colocará el espesor de 8" en la capa base de la estructura en el software y se procederá a diseñar, teniendo como resultado la siguiente sección:

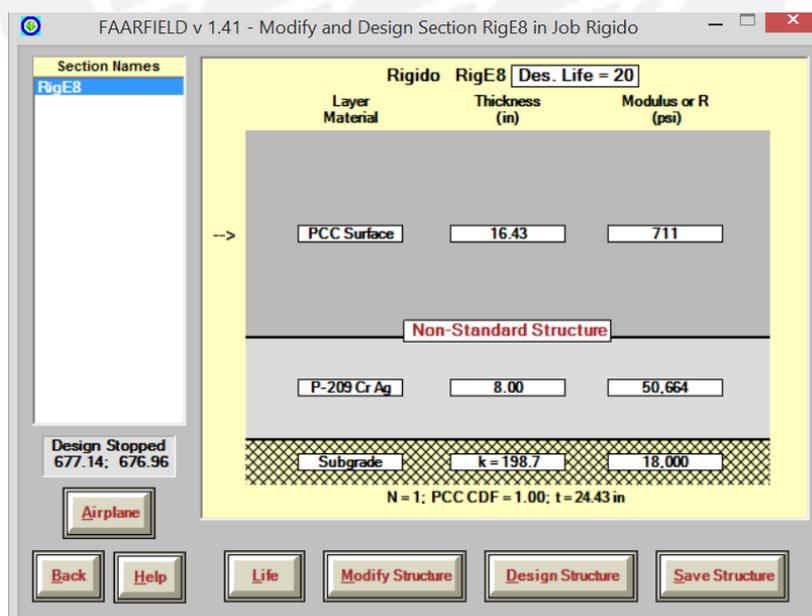


Figura 42. Espesores de las capas de pavimento rígido – espesor de la base igual a 8". Fuente: Software FAARFIELD 1.41

La sección muestra el mensaje *Not-Standard Structure* debido a que, al tener el tráfico aéreo cargas mayores a 100,000 lbs, se debería colocar una base estabilizada; sin embargo, en este caso no será necesario ya que el valor del CBR de la base es mayor a 100. Se aprecia que el valor del espesor de la losa btenido es menor al calculado en el anterior capítulo, esto es debido a las diferencias de diseño que cada uno de los métodos considera.

En la siguiente figura se muestra la contribución en el valor del CDF de las aeronaves más representativas.

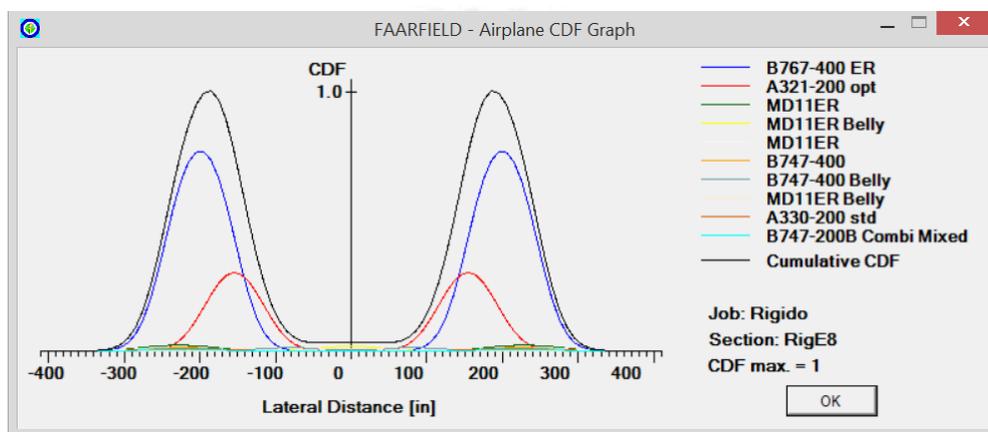


Figura 43. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Tal como se muestra, la aeronave cuyo aporte es el más significativo (0.73) es la BOEING B767-400, la cual fue determinada en el anterior método como la aeronave de diseño.

- **Cálculo del espesor de la losa de concreto para un espesor de base igual a 10”**

Se colocará el espesor de 10” en la capa base de la estructura en el software y se procederá a diseñar, teniendo como resultado la siguiente sección:

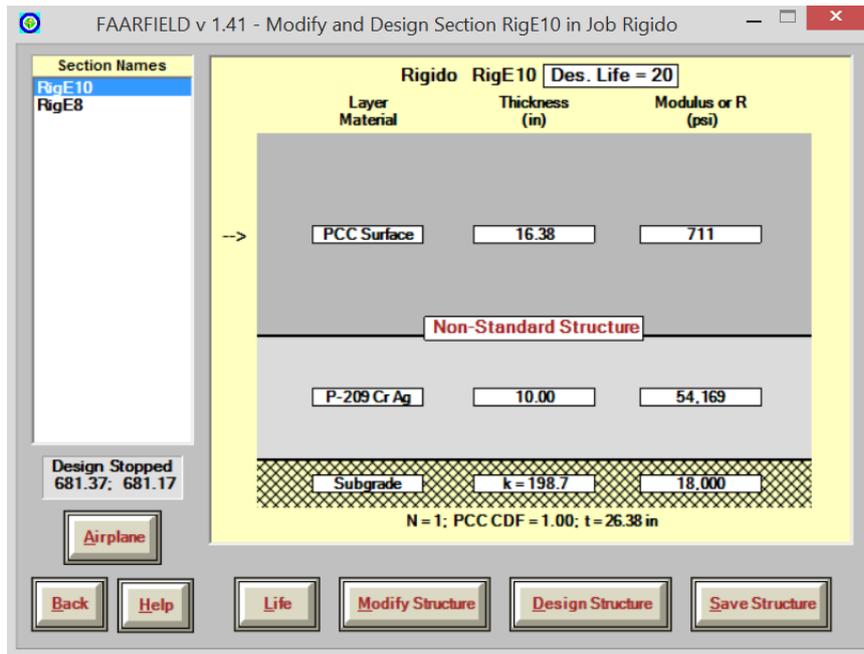


Figura 44. Espesores de las capas de pavimento rígido – espesor de la base igual a 10". Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Se muestra que el espesor de la losa de concreto ha disminuido en un 0.30% a comparación de la anterior sección (espesor de base igual a 8").

En la siguiente figura se muestra la contribución en el valor del CDF de las aeronaves más representativas.

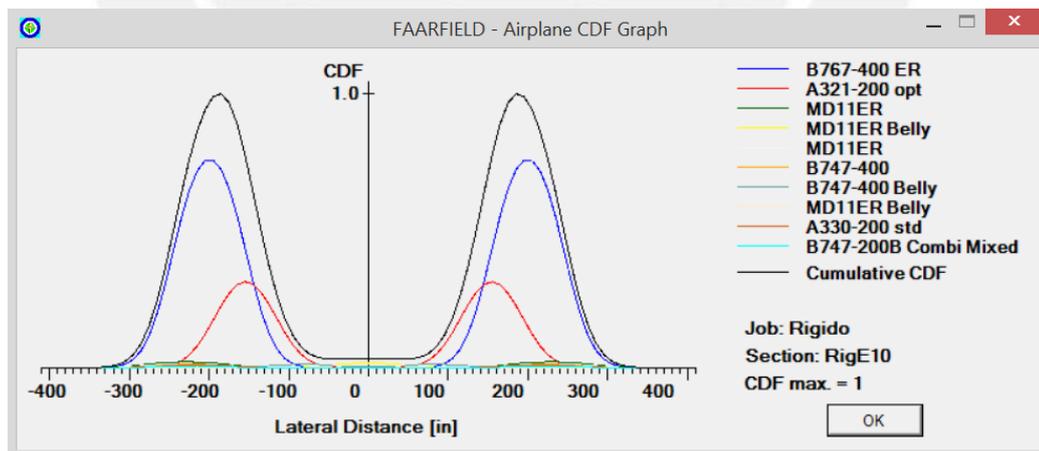


Figura 45. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Tal como se muestra, la aeronave cuyo aporte es el más significativo (0.72) es la BOEING B767-400, la cual fue determinada en el anterior método como la aeronave de diseño.

- Cálculo del espesor de la losa de concreto para un espesor de base igual a 12”

Se colocará el espesor de 12” en la capa base de la estructura en el software y se procederá a diseñar, teniendo como resultado la siguiente sección:

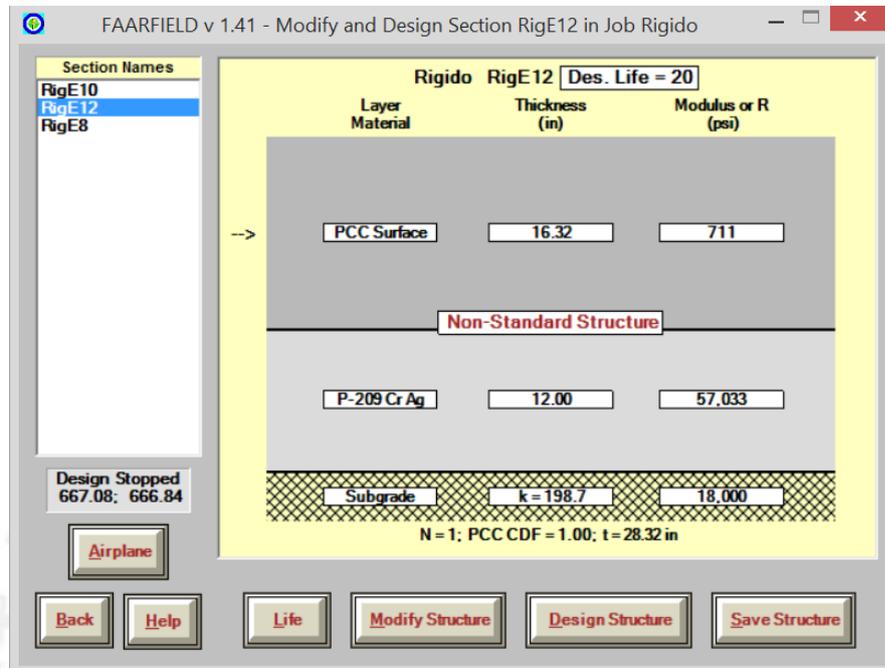


Figura 46. Espesores de las capas de pavimento rígido – espesor de la base igual a 12”. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Se muestra que el espesor de la losa de concreto ha disminuido en un 0.67% y 0.37% a comparación de las anteriores secciones (espesor de base igual a 12” y 10” respectivamente).

En la siguiente figura se muestra la contribución en el valor del CDF de las aeronaves más representativas.

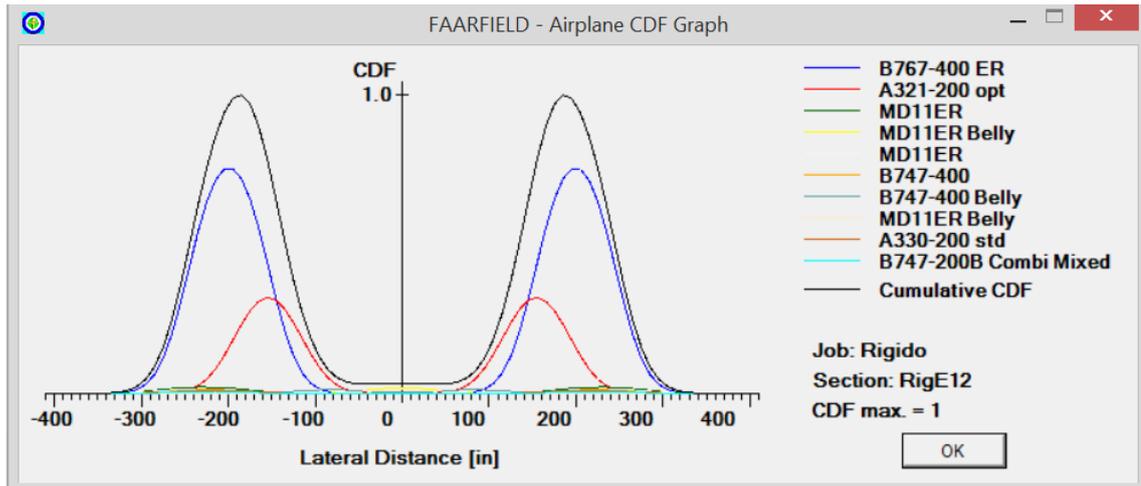


Figura 47. Contribución de las aeronaves en el CDF. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Tal como se muestra, la aeronave cuyo aporte es el más significativo (0.72) es la BOEING B767-400, la cual fue determinada en el anterior método como la aeronave de diseño.

- **Análisis económico de las secciones calculadas**

Se considera que el precio de la base granular es de S/. 69.97 por m³ y el de la losa de concreto de S/. 431.24 por m³.

Se denomina:

- Alternativa 1: sección conformada por 8" (20cm) de base y 17" (45cm) de losa de concreto
- Alternativa 2: sección conformada por 10" (25cm) de base y 17" (45cm) de losa de concreto
- Alternativa 3: sección conformada por 12" (30cm) de base y 17" (45cm) de losa de concreto.

De esta manera, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 30. Comparación económica de alternativas propuestas. Fuente: Propia

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Precio base por metro cuadrado	S/. 13.99	S/. 17.49	S/. 20.99
Precio de concreto por metro cuadrado	S/. 194.06	S/. 194.06	S/. 194.06
Total	S/. 208.05	S/. 211.55	S/. 215.05

Por tanto, la alternativa más económica y la seleccionada será Alternativa 1.

- **Espesor del borde de la pista de aterrizaje**

En este caso también se calculará el espesor del borde de la pista de aterrizaje, considerando una reducción en la losa de concreto. Tal como se realizó en el caso del diseño de pavimento flexible, esta reducción se calcula considerando una tasa de crecimiento anual del tráfico igual a 1%. Asimismo, para considerar una sección variable, se busca como mínimo una reducción en la losa de 0.5" (16"), y compensar el espesor del pavimento aumentando la dimensión de la base.

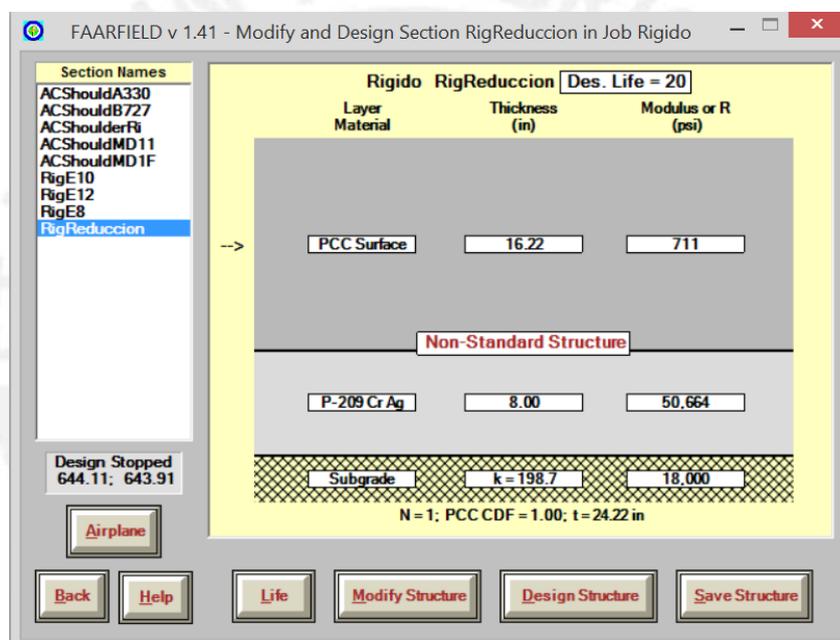


Figura 48. Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje del pavimento flexible. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

Tal como se muestra, el espesor de la losa de concreto ha disminuido pero no de manera significativa, por lo que la sección se mantendrá uniforme en todo el ancho de la pista de aterrizaje.

Con ello, se tendrá la siguiente sección del pavimento:

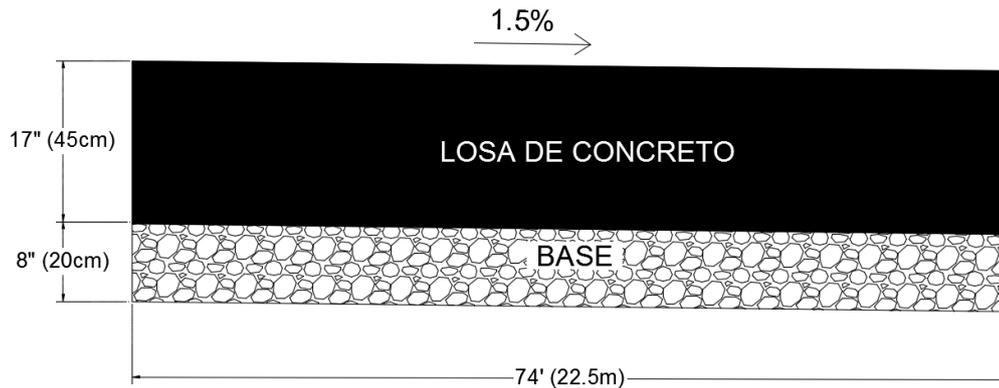


Figura 49. Sección del Pavimento Rígido. Fuente: Propia

7.2.4. DISEÑO DE JUNTAS

En el presente diseño de juntas de pavimento rígido se tendrá consideración con el espesor de la losa del pavimento y la subbase del mismo.

- **Tipos de juntas**

- **Juntas de aislamiento:** se usará el tipo de junta A, ya que no hay ningún impedimento para el engrosamiento del pavimento.
- **Juntas de contracción:** se usará la junta de contracción tipo C (dowels) y D (dummy), en donde corresponda, ya que se tiene un espesor del pavimento mayor a 9".
- **Juntas de construcción:** se usará la junta de contracción tipo E (dowels) ya que los pavimentos servirán a aviones de un peso bruto mayor a 30,000 libras.

- **Espaciado de juntas**

Se ha considerado la tabla 5 debido a que el pavimento no cuenta con subbase estabilizada. Dado que la losa tiene un espesor igual a 16.4", se tiene que el espesor máximo de las juntas será igual a 20' (6.1m). Por ello, se ha considerado un espaciado de juntas de 5.50m.

- **Barras en Juntas**

Se emplearán dowels en las juntas para proporcionar transferencia de carga y para prevenir el desplazamiento vertical relativo. El tamaño, longitud y

espaciado de los mismos deben ser tal que resistan los esfuerzos cortantes y de flexión, es por ello que se tendrá como referencia para las dimensiones la tabla 4, de la cual se tienen las siguientes características:

- Diámetro: 1 ½"
- Longitud: 20" (0.51m)
- Espaciado: 18" (0.45m)

A continuación, a modo de ejemplo se muestra una sección correspondiente a la calle de rodaje paralela a la pista, acceso y pista de aterrizaje. Se ha considerado acero embebido en losas no rectangulares.



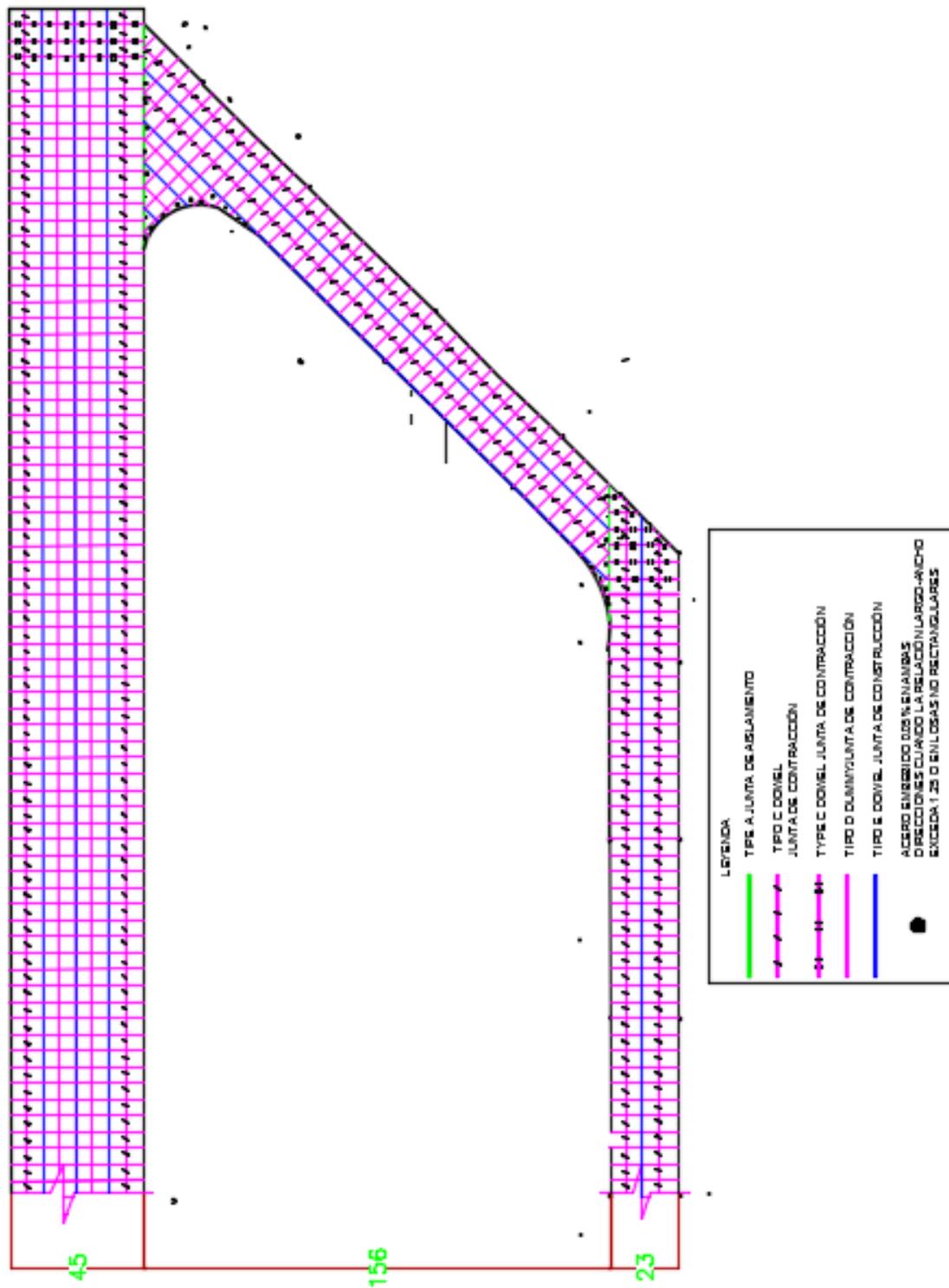


Figura 50. Patr3n de juntas de un 3rea de los pavimentos (longitud en m). Fuente: Propia

7.2.5. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE AMBAS METODOLOGÍAS

Una vez que se ha calculado el espesor de las capas del pavimento rígido mediante las metodologías de las circulares AC 150/5320-6D y AC 150/5320-6F, se procede a realizar el comparativo entre ambos resultados:

Tabla 31. Comparativo de los resultados – Pavimento rígido estructural. Fuente: Propia

Metodología	Espesor de base (cm)	Espesor de losa de concreto (cm)
AC 150/5320-6D	25	50
AC 150/5320-6F	20	45
Variación (%)	20.00%	10.00%

En este caso, se muestra que ha habido una variación en el espesor de ambas capas. El espesor de la capa base ha variado debido a que en el anterior diseño (metodología AC 150/5320-6D) se consideró el uso de la alternativa 2, en la cual el pavimento estaba diseñado con un espesor de base igual a 10”, mientras que en el diseño de la metodología se usó la alternativa 1, en la cual el pavimento estaba diseñado con un espesor de base igual a 8”. Por otro lado, se muestra que el espesor de la capa de losa de concreto también ha variado, lo cual se debe a los diferentes conceptos que manejan ambas metodologías, lo cual se indica en la tabla 27.

Tabla 32. Comparativo de los resultados – Franja nivelada. Fuente: Propia

Metodología	Espesor de base (cm)	Espesor de losa de concreto (cm)
AC 150/5320-6D	40	35
AC 150/5320-6F	20	45
Variación (%)	50.00%	-28.57%

Tal como se muestra, la sección correspondiente a la franja nivelada presenta una mayor variación en comparación de la sección del pavimento estructural, esto es debido a las diferencias de diseño que cada uno de los métodos considera.

7.2.6. CÁLCULO DEL ESPESOR DEL MARGEN

El procedimiento para calcular el espesor del margen y franja nivelada del pavimento rígido es análogo al realizado para el diseño del pavimento flexible. Para ello, se creará un nuevo archivo en FAARFIELD con los mismos materiales

del anterior diseño. El espesor de las capas deberán cumplir los requisitos mínimos indicados en la siguiente tabla.

Tabla 33. Espesor mínimo de las capas del margen – Pavimento Flexible. Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos: 2016

Capa	Ítem	Espesor mínimo, pulgadas (mm)
Losa de Concreto	P-501	6.0 (150)
Base de Agregados	P-209, P-208	6.0 (150)
Subbase (en caso sea necesaria)	P-154	4.0 (100)

Una vez que se haya creado la nueva sección, se deberá determinar cuál es la aeronave que mayor espesor de pavimento demanda (independientemente al número de salidas anuales consideradas en el tráfico). Para ello, se ingresará todas las aeronaves de la combinación de tráfico con 1200 salidas anuales. Luego, se hará click en el botón “Life”, y se verificará cuáles son las aeronaves con un mayor valor de CDF. En la figura 51 se muestra el gráfico donde se indican cuáles son estas aeronaves.

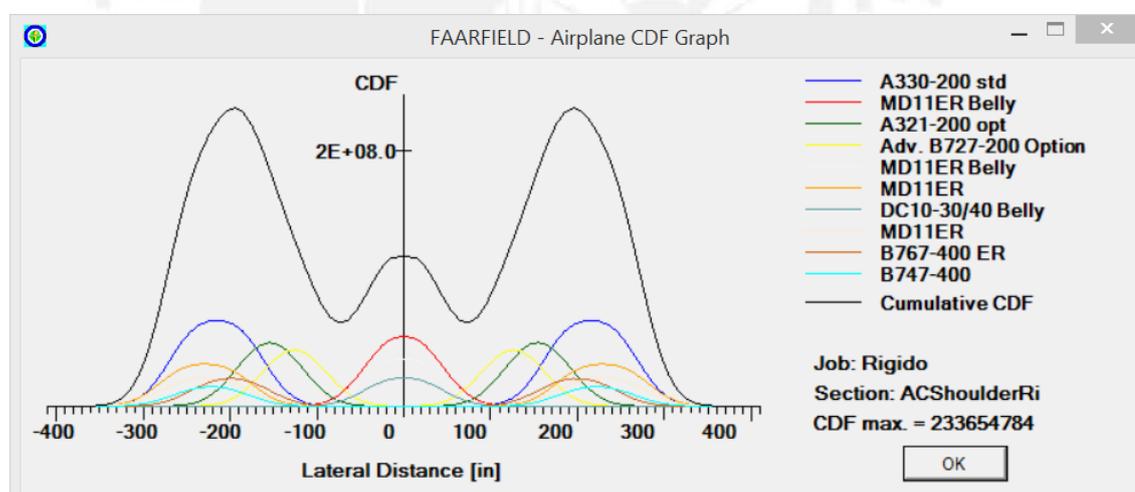


Figura 51. Aeronaves que mayor espesor de pavimento demandan. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

De la figura 51, se tiene que las aeronaves con mayor CDF son AIRBUS A330-200, MCDONNELL DOUGLAS MD11, MCDONNELL DOUGLAS MD11-F y BOEING B727-200. Por tanto, se evaluará cuál de ellas es la más demandante.

Para ello, se borrará toda la combinación de aeronaves ingresada, excepto por la aeronave a ser evaluada. Se cambiará el valor de salidas anuales a 1 y se modificará el periodo de diseño a 15 años, de manera que se diseñe el pavimento por un total de salidas de 15 de la aeronave más demandante. Una vez que todos los datos de entrada hayan sido ingresados, se procederá a diseñar la sección del pavimento. Se repetirá este proceso para las 4 aeronaves mencionadas.

Luego de que se evaluaron las 4 aeronaves, se constató que la que mayor valor de espesor de pavimento solicitaba era la MCDONNELL DOUGLAS MD11-F (al igual que en el diseño de pavimento flexible), por ello, el espesor obtenido de la losa de concreto y de la base (espesor mínimo señalado en la tabla 29) diseñado para esta aeronave, considerando las salidas anuales igual a 1 y un periodo de diseño igual a 15 años, será el espesor de las capas del margen.

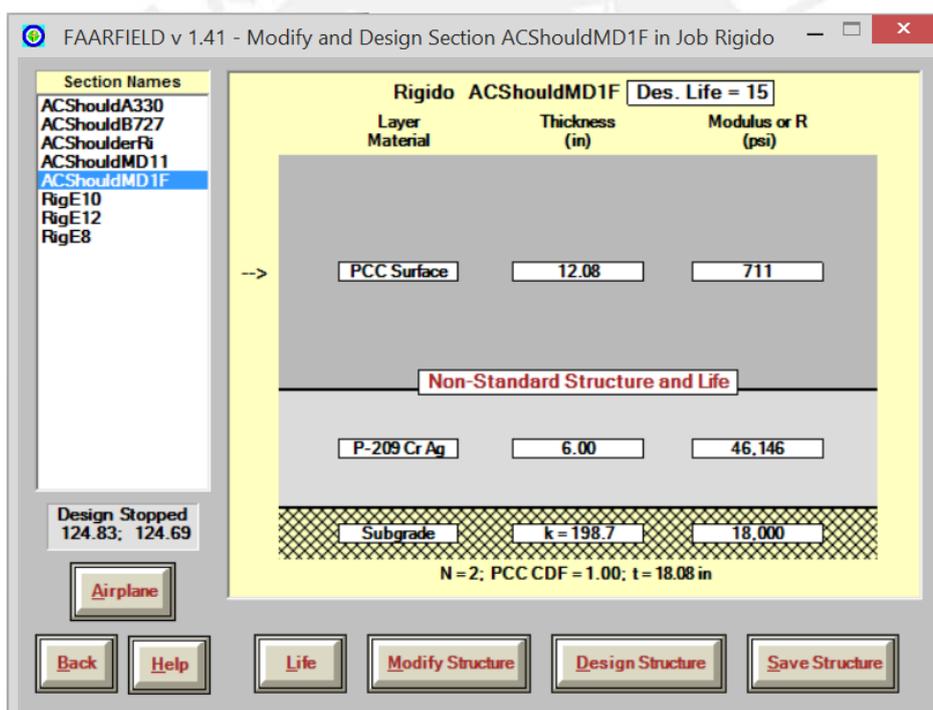


Figura 52. Espesor de la base y carpeta asfáltica del margen del pavimento. Fuente: Software FAARFIELD 1.41

8. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realizará el análisis económico del pavimento flexible y rígido obtenido mediante la circular AC 150/5320-6F, luego de haber realizado la verificación con los ábacos.

Asimismo, se realizará la comparación entre ambos presupuestos para la construcción del pavimento estructural de la pista de aterrizaje, de manera que se pueda determinar y elegir la alternativa más económica.

8.1. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Partida:	1.01 Excavación a nivel de la subrasante						
Rendimiento	m ³ /día M.O.:	570.00	EQ	570.00	Costo unitario directo por m ³		5.18
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		1	0.0140	24.34	0.34
Operario		hh		1	0.0140	18.72	0.26
Peón		hh		1	0.0140	13.99	0.20
							0.80
Equipos							
Herramientas manuales		%mo			5.0000	0.57	0.03
Tractor de orugas de 190-240 HP		hm		1	0.0140	310.88	4.35
							4.38
Partida:	1.02 Apilamiento de material procedente de la excavación						
Rendimiento	m ³ /día M.O.:	650.00	EQ	650.00	Costo unitario directo por m ³		4.27
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.1	0.0012	24.34	0.03
Operario		hh		1	0.0123	18.72	0.23
Peón		hh		1	0.0123	13.99	0.17
							0.43
Equipos							
Herramientas manuales		%mo			5	0.32	0.02
Tractor de orugas de 190-240 HP		hm		1	0.0123	310.88	3.82
							3.84
Partida:	1.03 Eliminación de material excedente procedente de las excavaciones						
Rendimiento	m ³ /día M.O.:	480.00	EQ	480.00	Costo unitario directo por m ³		6.96
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.1	0.0017	24.34	0.04
Operario		hh		1	0.0167	18.72	0.31
							0.35
Equipos							
Herramientas manuales		%mo			5	0.26	0.01
Cargador frontal CAT-930		hm		1	0.0167	250	4.18
Camión volquete de 15m ³		hm		1	0.0167	145	2.42
							6.61

Partida:	1.04 Conformación de la subrasante						
Rendimiento	m ² /día M.O.:	1,200.0000	EQ	1,200.0000	Costo unitario directo por m ²		10.81
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.2	0.0013	24.34	0.03
Operario		hh		4	0.0267	18.72	0.50
Peón		hh		8	0.0533	13.99	0.75
							1.28
Material							
Agua puesta en obra		m ³		0.4320		10	4.32
							4.32
Equipos							
Herramientas manuales		%mo			10	0.48	0.05
Rodillo liso vibratorio autopropulsado		hm		2	0.0133	188.69	2.52
Motoniveladora 180-200 HP		hm		2	0.0133	198.98	2.65
							5.22

Partida:	2.01 Subbase Granular						
Rendimiento	m ³ /día M.O.:	462.0000	EQ	462.0000	Costo unitario directo por m ³		55.22
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		1	0.0173	24.34	0.42
Peón		hh		4	0.0693	13.99	0.97
							1.39
Material							
Agua puesta en obra		m ³		0.1200		38.94	4.67
Material de subbase		m ³		1.2500		32.70	40.88
							45.55
Equipos							
Herramientas manuales		%mo			5	1.47	0.07
Rodillo liso vibratorio autopropulsado		hm		1	0.0173	203.88	3.53
Motoniveladora de 145-150 HP		hm		1	0.0173	270.41	4.68
							8.28

Partida:	2.02 Base Granular						
Rendimiento	m ³ /día M.O.:	396.0000	EQ	396.0000	Costo unitario directo por m ³		69.97
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		1	0.0202	24.34	0.49
Peón		hh		4	0.0808	13.99	1.13
							1.62
Material							
Agua puesta en obra		m ³		0.1200		38.94	4.67
Material de Base		m ³		1.2500		43.20	54.01
							58.68
Equipos							
Rodillo liso vibratorio autopropulsado		hm		1	0.0202	203.88	4.12
Motoniveladora 145-150 HP		hm		1	0.0202	270.41	5.46
Herramienta Manuales		%mo			5.0000	1.71	0.09
							9.67

Partida:	2.02.01 Concreto premezclado con resistencia a flexión 50 kg/cm ²						
Rendimiento	m ³ /día M.O.:	400.0000	EQ	400.0000	Costo unitario directo por m ³		431.24
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		1	0.0200	24.34	0.49
Peón		hh		3	0.0600	13.99	0.84
							1.33
Material							
Concreto premezclado con resistencia a flexión 50 kg/cm ²		m ³		1.0000		418.64	418.64
							418.64
Equipos							
Herramientas manuales		%mo			5.0000	1.33	0.07
Minicargador 70 HP		hm		1	0.0200	63.19	1.26
Pavimentadora de concreto		hm		1	0.0200	497.38	9.95
							11.28

Partida:	2.02.02 Acabado de pavimento						
Rendimiento	m ² /día M.O.:	650.000	EQ	650.000	Costo unitario directo por m ²		4.10
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.2	0.0025	24.34	0.06
Operario		hh		2	0.0400	18.72	0.34
Peón		hh		4	0.0492	13.99	0.69
							1.09
Material							
Manta de yute		m ²		1.4000	2.12	2.97	2.97
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5	0.92	0.05	0.05

Partida:	2.02.03 Encofrado y desencofrado						
Rendimiento	m ² /día M.O.:	14.0000	EQ	14.0000	Costo unitario directo por m ²		70.89
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.4	0.2286	24.34	5.56
Operario		hh		2	1.1429	18.72	21.39
Peón		hh		2	1.1429	13.99	15.99
							42.95
Material							
Alambre negro N° 16		kg		0.1000	3.5	0.35	0.35
Desmoldante		kg		0.4000	25	10.00	10.00
Estacas de madera		und		4.0000	0.9	3.60	3.60
Triplay de 19 mm para encofrado		pln		0.1200	100.67	12.08	12.08
							26.03
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5	38.35	1.92	1.92

Partida:	2.02.04 Curado con agua						
Rendimiento	m ² /día M.O.:	100.0000	EQ	100.0000	Costo unitario directo por m ²		4.02
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.1	0.0080	24.34	0.19
Peón		hh		1	0.0800	13.99	1.12
							1.31
Material							
Agua puesta en obra		m ³		0.0100	38.94	0.39	0.39
Manta de yute		m ²		1.0000	2.12	2.12	2.12
							2.51
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5	1	0.05	0.05
Motobomba (7HP)		día		1	0.01	15	0.15
							0.20

Partida:	2.02.05 Dowels Ø 1½ x .51m @ .45						
Rendimiento	kg/día M.O.:	250.0000	EQ	250.0000	Costo unitario directo por kg		5.32
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.1	0.0032	24.34	0.08
Operario		hh		1	0.0320	18.72	0.60
Oficial		hh		1	0.0320	15.54	0.50
Peón		hh		1	0.0320	13.99	0.45
							1.62
Material							
Fierro liso grado 60 fy=4200 kg/cm2		Kg		1.0500	3.45	3.62	3.62
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5.0000	1.53	0.08	0.08

Partida:	2.02.06 Junta de aislamiento						
Rendimiento	m/día M.O.:	200.0000	EQ	200.0000	Costo unitario directo por m		13.97
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.1	0.0040	24.34	0.10
Peón		hh		2	0.0800	13.99	1.12
							1.22
Material							
Sello elastomérico a base de silicona		gln		0.0132	309.68		4.09
Material de respaldo para selladores		m		1.0000	2.23		2.23
Tecnopor (1/2")		m ²		0.2000	3.72		0.74
							7.06
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5.0000	1.22		0.06
Costadora de pavimento inc. Disco		hm	25	1.0000	5.63		5.63
							5.69

Partida:	2.02.07 Junta de construcción						
Rendimiento	m/día M.O.:	200.0000	EQ	200.0000	Costo unitario directo por m		12.08
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.1	0.0040	24.34	0.10
Peón		hh		2	0.0800	13.99	1.12
							1.22
Material							
Sello elastomérico a base de silicona		gln		0.0095	309.68		2.94
Material de respaldo para selladores		m		1.0000	2.23		2.23
							5.17
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5.0000	1.22		0.06
Costadora de pavimento inc. Disco		hm	25	1.0000	5.63		5.63
							5.69

Partida:	2.02.08 Junta de contracción						
Rendimiento	m/día M.O.:	180.0000	EQ	180.0000	Costo unitario directo por m		12.85
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		0.1	0.0044	24.34	0.11
Peón		hh		2	0.0889	13.99	1.24
							1.35
Material							
Sello elastomérico a base de silicona		gln		0.0095	309.68		2.94
Material de respaldo para selladores		m		1.0000	2.23		2.23
							5.17
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5.0000	1.35		0.07
Costadora de pavimento inc. Disco		hm	25	1.1111	5.63		6.26
							6.32

Partida:	2.02.01 Imprimación Asfáltica						
Rendimiento	m ² /día M.O.:	4,500.0000	EQ	4,500.0000	Costo unitario directo por m ²		3.73
Descripción del Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
Capataz		hh		1	0.0018	24.34	0.04
Peón		hh		6	0.0107	13.99	0.15
							0.19
Material							
Asfalto líquido MC-30		l		1.2040	1.50		1.81
							1.81
Equipos							
Compresora Neumática 87 HP 250-330 PCM		hm	1.0000	0.0018	115.91		0.21
Minicargador 70 HP 0.5 YD		hm	1.0000	0.0018	102.81		0.18
Camión imprimador 210 HP 2000 GLN		hm	1.0000	0.0018	181.55		0.32
Herramientas manuales		%mo		5.0000	0.20		1.02
							1.73

Partida:	2.02.02 Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente					
Rendimiento	m ³ /día M.O.:	239.0000	EQ	239.0000	Costo unitario directo por m ³	241.03
Descripción del Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
Capataz	hh		1	0.0335	24.34	0.81
Operario	hh		1	0.0335	18.72	0.63
Peón	hh		6	0.2008	13.99	2.81
						4.25
Material						
Mezcla asfáltica en caliente	m ³		1.3000	166.61		216.60
						216.60
Equipos						
Pavimentadora sobre orugas 105 HP	hm	1.0000	0.0335	182.06		6.09
Rodillo neumático autopulsado 135 HP 9-26 TN	hm	1.0000	0.0335	166.14		5.56
Rodillo tandem vibratorio autopulsado 111-130 HP 9-11 TN	hm	1.0000	0.0335	246.71		8.26
Herramientas manuales	%mo		5.0000	5.35		0.27
						20.18

Fuente: Propia

8.2. PRESUPUESTO PAVIMENTO FLEXIBLE

Las dimensiones del pavimento flexible de la pista de aterrizaje se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 34. Dimensiones Pavimento Flexible de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia

	Espesor 1 (cm)	Espesor 2 (cm)	Longitud (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
Carpeta Asfáltica	15	10	3,020.00	45.00	135,900.00	17,032.80
Base	25	25	3,020.00	45.00	135,900.00	33,975.00
Subbase	35	40	3,020.00	45.00	135,900.00	50,917.20

A partir de estos valores y los análisis de precios unitarios calculados, se tendrá el presupuesto del pavimento estructural de la pista de aterrizaje:

Tabla 35. Presupuesto de Pavimento Flexible Estructural de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia

Ítem	Descripción	Und	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
1.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS				3,230,013.66
1.01	Excavación masiva a nivel de la subrasante	m ³	88,988.95	5.18	460,920.05
1.02	Apilamiento de material procedente de la excavación	m ³	115,685.64	4.27	494,135.58
1.03	Eliminación de material excedente procedente de las excavaciones	m ³	115,685.64	6.96	805,237.58
1.04	Conformación de la subrasante	m ²	135,900.00	10.81	1,469,720.45
2.00	PAVIMENTOS				9,801,475.64
2.01	Subbase del Pavimento	m ³	50,917.20	55.22	2,811,631.46
2.02	Base del Pavimento	m ³	33,975.00	69.97	2,377,130.40
2.03	Carpeta Asfáltica				4,612,713.78
2.03.01	Imprimación Asfáltica	m ²	135,900.00	3.73	507,325.77
2.03.02	Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente	m ³	17,032.80	241.03	4,105,388.01
COSTO TOTAL DIRECTO					13,031,489.30

8.3. PRESUPUESTO PAVIMENTO RÍGIDO

Las dimensiones del pavimento flexible de la pista de aterrizaje se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 36. Dimensiones Pavimento Rígido de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia

	Espesor (cm)	Longitud (m)	Ancho (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
PCC	45	3,020.00	45.00	135,900.00	61,155.00
Base	20	3,020.00	45.00	135,900.00	27,180.00

A partir de estos valores y los análisis de precios unitarios calculados, se tendrá el presupuesto del pavimento estructural de la pista de aterrizaje:

Tabla 37. Presupuesto de Pavimento Rígido Estructural de la Pista de Aterrizaje. Fuente: Propia

Ítem	Descripción	Und	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
1.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS				3,230,013.66
1.01	Excavación masiva a nivel de la subrasante	m ³	88,988.95	5.18	460,920.05
1.02	Apilamiento de material procedente de la excavación	m ³	115,685.64	4.27	494,135.58
1.03	Eliminación de material excedente procedente de las excavaciones	m ³	115,685.64	6.96	805,237.58
1.04	Conformación de la subrasante	m ²	135,900.00	10.81	1,469,720.45
2.00	PAVIMENTOS				44,543,769.33
2.02	Base del Pavimento	m ³	17,032.80	69.97	1,191,734.71
2.02	Concreto del pavimento				43,352,034.62
2.02.01	Concreto premezclado	m ³	70,798.61	431.24	30,531,481.58
2.02.02	Acabado de pavimento	m ²	135,900.00	4.10	557,550.45
2.02.03	Encofrado y desencofrado	m ²	135,900.00	70.89	9,634,519.84
2.02.04	Curado con agua	m ²	135,900.00	4.02	546,772.18
2.02.05	Dowels Ø 1½ x .51m @ .45	kg	251,585.64	5.32	1,338,658.99
2.02.06	Juntas de aislamiento	m	6,616.54	13.97	92,424.57
2.02.07	Juntas de construcción	m	27,540.00	12.08	332,669.98
2.02.08	Juntas de contracción	m	24,750.00	12.85	317,957.04
COSTO TOTAL DIRECTO					47,773,782.98

Se muestra que el monto de la construcción del pavimento rígido es considerablemente mayor al pavimento flexible; por lo que la alternativa más conveniente considerando únicamente la construcción de los pavimentos es la de pavimentos flexibles. Sin embargo, es conveniente que el área de la plataforma sea construida con pavimento rígido, debido a que en esta las

aeronaves se aparcarán durante un tiempo prolongado, y se abastecen de combustible, lo cual puede generar una gran deflexión y deterioro en la superficie del pavimento flexible al estar bajo cargas por cierto periodo y en contacto con derivados del petróleo.

Los detalles tanto de la pista de aterrizaje, calles de rodaje y plataforma se encuentran en el anexo 4.

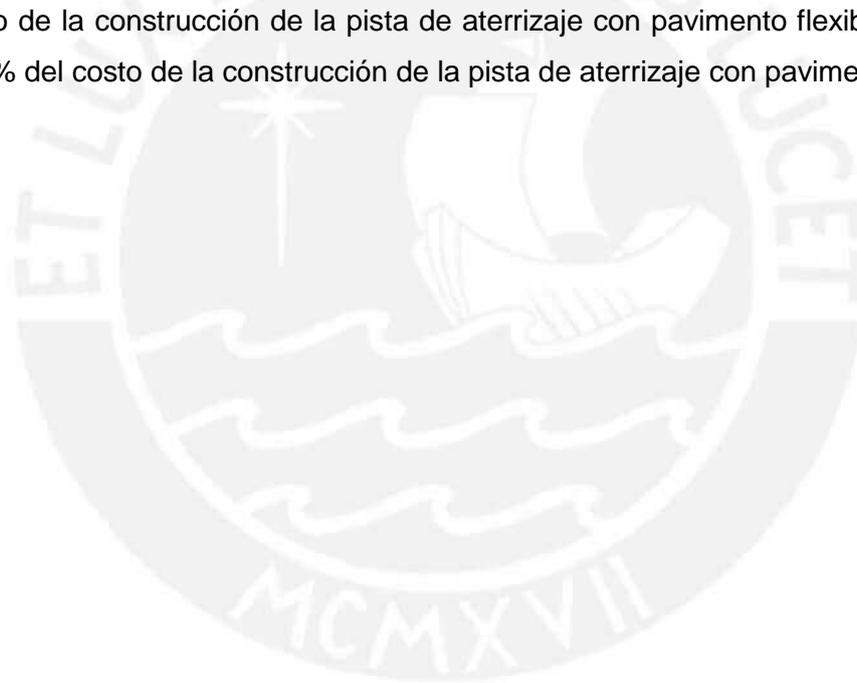
9. CONCLUSIONES

- La tasa de crecimiento media al año utilizada ha sido igual a 7%, el cual se obtuvo basándose en un pronóstico base. El pronóstico más bajo es igual al 5%, mientras que el más alto es igual al 9% según el Plan Maestro de Pisco. Lo cual demuestra el considerable crecimiento de tráfico, motivo por el cual es acertado la construcción de un aeropuerto en dicha zona.
- En la tabla 18 podemos apreciar la variación de las salidas anuales iniciales y corregidas según el tren de aterrizaje de cada aeronave analizada, de manera que aquellas aeronaves cuyo tren de aterrizaje es de menor magnitud a comparación de la aeronave de diseño tendrá un factor menor a 1, por tanto las salidas anuales corregidas será menor a las iniciales.
- En la tabla 19 podemos apreciar la variación de las salidas anuales iniciales y corregidas según el peso soportado por cada llanta de la aeronave, de manera análoga al caso anterior, si la carga por llanta es mayor a la de la aeronave de diseño, la salidas anual corregida será mayor ya que dicha aeronave es más representativa a comparación de la de diseño.
- El diseño del pavimento flexible según el método de la AC 150/5320 6D muestra que se puede reducir considerablemente el espesor de la capa base si es que se tiene un valor CBR de la capa subbase elevado. Sin embargo, el valor del espesor total será el mismo sea o no el pavimento estabilizado, ya que para hallarlo se toma en cuenta el valor CBR de la subrasante. Por otro lado, a diferencia del pavimento flexible, en el caso del pavimento rígido la estabilización de la base sí contribuye a la reducción del espesor total del pavimento.
- Una de las principales diferencias entre las metodologías empleadas en la presente tesis radica en el tráfico, ya que en la pasada circular consideraban una aeronave de cálculo y a partir de esta se realizaba el diseño, y en la presente circular se considera una diversidad de aviones, y se analiza el “daño” que cada uno de estos

causa en el pavimento. Sin embargo, muchas veces coincide la aeronave que más daño genera en el pavimento (mayor valor de CDF) con la aeronave de cálculo.

- La FAA recomienda el uso de ciertos materiales para la construcción de pavimentos para aeródromos, los cuales son indicados en la circular AC 150/5320-10G (actualmente vigente) los cuales tienen ciertas características predeterminadas a usar en el programa FAARFIELD. Estas se pueden modificar ligeramente dependiendo de las solicitudes del proyectista.
- El programa FAARFIELD, al ser un software iterativo, itera hasta llegar a un valor de las secciones que den un $CDF=1$.
- Los espesores de las capas halladas con el software FAARFIELD son menores a los calculados a través de los ábacos, una de las causas es que mediante el programa se busca optimizar la sección.
- Ambas circulares permiten una sección variable; sin embargo, la circular vigente es un poco más conservadora, ya que permite valores mínimos mayores a la anterior circular, y la variación de las capas a ser ajustadas han sido menores a comparación al resultado obtenido mediante la circular 150/5320-6D.
- Se muestra una mayor cercanía entre las dimensiones del pavimento rígido hallado por ambos métodos que las dimensiones del pavimento flexible de ambos métodos. Una de las causas es que, tal como se mencionó, el pavimento flexible en el método de la AC 150/5320-6D considera el CBR de la subrasante para hallar el valor total del espesor del pavimento.
- Los requisitos de la necesidad de una capa base en pavimentos rígidos son más rigurosos en la circular AC 150/5320-6F.
- El espesor total del margen del pavimento flexible es igual a 39cm; es decir, el 57% del espesor del pavimento flexible total.
- La relación entre K y el CBR de ambas metodologías ha variado, es por ello que en la primera se tiene que un valor de K igual a 162.9pci, mientras que en la segunda se tiene un valor igual a 198.7pci.
- El espesor total del margen del pavimento rígido es igual a 46 cm; es decir, el 73% del espesor del pavimento rígido total.
- El valor total del presupuesto del pavimento flexible sin considerar la reducción del grosor de la carpeta asfáltica es igual a S/.12,583,941.01, el cual es mayor en 3% al obtenido considerando sección variable. Sin embargo, se deberá considerar si este ahorro compensa el mayor costo en el proceso constructivo.

- Se ha considerado la alternativa del pavimento flexible para la construcción del pavimento, basándose únicamente en el costo de ejecución de esta obra; sin embargo, si se considera el mantenimiento de la misma, el pavimento flexible demanda una mayor intervención que el pavimento rígido.
- La plataforma puede estar constituida de pavimento flexible; sin embargo, es posible que hayan deflexiones en la misma, debido a que las aeronaves se estacionan por un tiempo considerable. Asimismo, en las plataformas se realiza el abastecimiento de combustible, con lo que la superficie del pavimento flexible podría dañarse al estar en contacto con derivados del petróleo.
- Se deberá realizar una transición entre la calle de rodaje y la plataforma, considerando que la primera está hecha de pavimento flexible y la segunda de pavimento rígido. Para ello, se ha seguido los detalles indicados en la figura 9. La sección se encuentra detallada en el plano GE-03 del anexo 4.
- El costo de la construcción de la pista de aterrizaje con pavimento flexible es igual al 26.5% del costo de la construcción de la pista de aterrizaje con pavimento rígido.



10. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

MONTEJO, Alonso

2006 Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño. Tomo I. Tercera edición. Colombia: Universidad Católica de Colombia

HUANG, Yang

2004 Pavement Analysis and Design. Segunda edición. University of Kentucky

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION

1978 AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION

2016 AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE AVIACIÓN CIVIL

2006 Manual de Diseño de aeródromos - Parte 1, Pistas. Tercera edición. Canadá

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE AVIACIÓN CIVIL

2006 Manual de Diseño de aeródromos - Parte 2, Calles de rodaje, plataforma y apartados de espera. Cuarta edición. Canadá

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE AVIACIÓN CIVIL

1983 Manual de Diseño de aeródromos - Parte 3, Pavimentos. Segunda edición. Canadá

OLCESE, Manuel

2009 Pavimentos - Apuntes del Curso. Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú

HORONJESS, R.

1975 Planificación y Diseño de Aeropuertos. Segunda edición. Estados Unidos. McGraw-Hill