

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**COMPARACIÓN ENTRE EL CONCRETO ASFÁLTICO Y EL
CONCRETO HIDRÁULICO EN PAVIMENTOS
AEROPORTUARIOS**

TESIS
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR

Bach. CHUI-KAN CÓRDOVA, TRICIA PIERINA

Bach. LLERENA DE LOS RÍOS, JOSE LUIS

Asesor: M. Sc. Ing. HUAMÁN GUERRERO, NÉSTOR WILFREDO

LIMA - PERÚ

2020

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres y a mi hermana por su apoyo incondicional para alcanzar mis metas y sueños. Este logro es para ustedes porque me apoyaron y creyeron en mí.

Tricia Pierina Chui-kan Córdova

La presente investigación está dedicada a mis padres, a mi abuela María y a mis hermanas por su amor y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de los años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta donde estoy ahora, todos mis logros van para ustedes.

José Luis Llerena De Los Ríos

AGRADECIMIENTO

A nuestro asesor M. Sc. Ing. Néstor W. Huamán Guerrero por su apoyo y guía en todo el desarrollo de nuestra investigación.

Tricia Chui-kan y José Luis Llerena

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Formulación del problema	4
1.2.1 Problema general	4
1.2.2 Problemas específicos	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Importancia y justificación del estudio.....	4
1.5 Limitaciones del estudio	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes del estudio de investigación.....	6
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema	6
2.2.1 Investigaciones nacionales	6
2.2.2 Investigaciones internacionales	7
2.3 Definición de términos básicos	8
2.3.1 Definición de un pavimento	8
2.3.2 Diferencia entre pavimentos de carretera y pavimentos aeroportuarios	9
2.3.3 Pavimentos en aeropuertos.....	10
2.3.3.1 Pavimentos de concreto asfáltico.....	10
2.3.3.2 Pavimentos de concreto hidráulico	12
2.3.4 Ingeniería de aeropuertos	13

2.3.5	Elementos de un aeropuerto	13
2.3.5.1	Pista de aterrizaje	13
2.3.5.2	Pista de rodaje o carreteo.....	15
2.3.5.3	Plataformas	16
2.3.5.4	Edificio de terminal.....	17
2.4	Factores a considerar en el diseño de pavimentos aeroportuarios.....	18
2.4.1	Tráfico de aeronaves	18
2.4.2	Estudio de suelos	19
2.4.3	Consideraciones de las aeronaves	21
2.4.4	Aeronave de cálculo.....	22
2.4.5	Determinación de las salidas anuales equivalentes.....	23
2.5	Metodología FAA.....	24
2.5.1	Método FAA para pavimento de concreto asfáltico	27
2.5.2	Método FAA para pavimento de concreto hidráulico.....	28
2.6	Análisis de Costo-Eficiencia	32
2.7	Fallos de pavimentos aeroportuarios	33
2.7.1	Fallos en pavimentos de concreto asfáltico	33
2.7.2	Fallos en pavimento de concreto hidráulico	46
2.8	Evaluación de pavimentos en FAARFIELD	58
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS		61
3.1	Hipótesis.....	61
3.1.1	Hipótesis general.....	61
3.1.2	Hipótesis específicas	61
3.2	Variables	61
3.2.1	Relación entre variables	61
3.2.1.1	Variable independiente.....	61
3.2.1.2	Variable dependiente.....	61

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	62
4.1 Tipo y método de la investigación.....	62
4.1.1 Tipo de la investigación	62
4.1.2 Método de la investigación.....	62
4.2 Población de estudio	62
4.3 Diseño muestral.....	62
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	62
4.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos	62
4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	63
4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos.....	63
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN	64
5.1. Aeropuertos de concreto hidráulico	64
5.2. Diseños de los pavimentos por la metodología FAA	64
5.2.1 Diseño de pavimento de concreto asfáltico	67
5.2.1.1 Metodología AC 150/5320-6D	67
5.2.1.2 Metodología AC 150/5320-6F:	73
5.2.2 Diseño de pavimento de concreto hidráulico	85
5.2.2.1 Metodología AC 150/5320-6D:.....	85
5.2.2.2 Metodología AC 150/5320-6F.....	95
5.3 Evaluación de los pavimentos	105
5.4 Conclusiones de investigaciones de pavimentos aeroportuarios.....	112
5.5 Análisis de diseño de los pavimentos	116
5.6 Análisis de presupuesto.....	118
5.7 Análisis de fallas de los pavimentos.....	122
5.8 Análisis de la evaluación estructural	124
5.9 Análisis de resultados	124
5.10 Contrastación de hipótesis.....	125

5.10.1 Hipótesis específica 1.....	125
5.10.2 Hipótesis específica 2.....	125
5.10.3 Hipótesis específica 3.....	126
5.10.4 Hipótesis específica 4.....	127
5.10.5 Hipótesis general	127
CONCLUSIONES	128
RECOMENDACIONES	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
ANEXOS.....	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Factor de conversión de trenes de aterrizaje.	23
Tabla N°2: Comparación de métodos de la FAA.	25
Tabla N°3: Factor de corrección para un tráfico mayor a 25,000	27
Tabla N°4: Espesor mínimo de las capas – Pavimentos de concreto asfáltico.	28
Tabla N°5: Espesor mínimo de las capas – Pavimentos Rígido.	31
Tabla N°6: Salidas Anuales.	66
Tabla N°7: Tráfico Promedio Anual.....	67
Tabla N°8: Tráfico Promedio Anual.....	68
Tabla N°9: Salida aeronave afectado al factor de trenes de aterrizaje.	69
Tabla N°10: Salidas anuales equivalentes.	70
Tabla N°11: Descripción de las secciones.	74
Tabla 12: Espesor mínimo de las capas del margen – Pavimento Flexible.....	83
Tabla N°13: Condiciones en que no se requiere una capa de cimentación.	86
Tabla N°14: Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 8”	88
Tabla N°15: Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 10”.....	90
Tabla N°16: Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 12”.....	92
Tabla N°17: Comparación económica de alternativas propuestas.	93
Tabla N°18: Comparación económica de alternativas propuestas.	102
Tabla N°19: Espesor mínimo de las capas del margen – Pavimento rígido	103
Tabla N°20: Comparación de resultados de espesores – Pavimento de concreto asfáltico..	116
Tabla N°21: Comparación de resultados de los espesores de borde– Pavimento de concreto asfáltico.	117
Tabla N°22: Comparación de resultados de los espesores – Pavimento de concreto hidráulico.....	117

Tabla N°23: Comparación de resultados de los espesores del borde – Pavimento de concreto hidráulico.	118
Tabla N°24: Dimensiones del Pavimento de concreto asfáltico.	119
Tabla N°25: Presupuesto de pavimento de concreto asfáltico de la pista de aterrizaje.	119
Tabla N°26: Dimensiones del Pavimento de concreto hidráulico.....	120
Tabla N°27: Presupuesto de pavimento de concreto hidráulico de la pista de aterrizaje.....	120
Tabla N°28: Comparación de presupuestos – variación en porcentaje.	121
Tabla N°29: Resultados de evaluación de las pruebas de pavimento de concreto asfáltico.	124
Tabla N°30: Resultados de evaluación de las pruebas de pavimento de concreto hidráulico.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Sección típica de un pavimento de concreto asfáltico.....	11
Figura N°2: Sección típica transversal de un pavimento rígido.....	12
Figura N°3: Geometría de la anchura de pista.	14
Figura N°4: Calles de rodaje en las plataformas.	15
Figura N°5: Conceptos sobre las plataformas en la terminal de pasajeros.	18
Figura N°7: Gráfico CDF del Software FAARFIELD v 1.42	26
Figura N°8: Efecto de la capa de cimentación sobre k.....	30
Figura N°9: Sección de pavimento flexible – margen crítico	72
Figura N°10: Sección de pavimento flexible.	73
Figura N°11: Ventana de inicio del software FAARFIELD v 1.42	74
Figura N°12: Sección del pavimento previo – Pavimento de concreto asfáltico - FAARFIELD v 1.42.....	75
Figura N°13: Tráfico de aeronaves - FAARFIELD v 1.42.....	76
Figura N°14: Tráfico de aeronaves - FAARFIELD v 1.42.....	77
Figura N°15: Ejemplo de tren de aterrizaje de aeronave 2D/D1 - FAARFIELD v 1.42.....	78
Figura N°16: Design Running de los espesores - FAARFIELD v 1.42	79
Figura N°17: Espesores de las capas del pavimento de concreto asfáltico - FAARFIELD v 1.42.....	80
Figura N°18: Gráfico CDF de aeronaves - FAARFIELD v 1.42.....	81
Figura N°19: Tráfico de aeronaves con tasa de crecimiento anual 1% - FAARFIELD v 1.42.....	82
Figura N°20: Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje - FAARFIELD v 1.42.....	82
Figura N°21: Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje - FAARFIELD v 1.42.....	83
Figura N°22: Aeronaves de mayor demanda de espesor de pavimento - FAARFIELD v 1.42.....	84

Figura N°23: Espesores de las capas del margen del pavimento de concreto asfáltico - FAARFIELD v 1.42.....	85
Figura N°24: Determinación de k.....	87
Figura N°25: Sección Área Crítica para 8” de base.	89
Figura N°26: Sección Área Crítica para 10” de base.	91
Figura N°27: Sección Área Crítica para 12” de base.	93
Figura 27: Sección pavimento de concreto hidráulico.	94
Figura N°28: Sección del pavimento de concreto hidráulico.....	96
Figura N°29: Espesor de losa de concreto con base de 8” – FAARFIELD v 1.42.	98
Figura N°30: Gráfica CDF de las aeronaves con base de 8” – FAARFIELD v 1.42.....	98
Figura N°31: Espesor de losa de concreto con base de 10” – FAARFIELD v 1.42.	99
Figura 32: Gráfica CDF de las aeronaves con base de 10” – FAARFIELD v 1.42.....	99
Figura N°33: Espesor de losa de concreto con base de 12” – FAARFIELD v 1.42.	100
Figura N°34: Gráfica CDF de las aeronaves con base de 12” – FAARFIELD v 1.42..	101
Figura N°35: Espesor del margen de la pista de aterrizaje con base de 8” – FAARFIELD v 1.42.....	102
Figura N°36: Sección del pavimento de concreto hidráulico	103
Figura N°37: Aeronaves que generan mayor demanda en el pavimento – FAARFIELD v 1.42.....	104
Figura N°38: Espesor del margen de la losa de concreto – FAARFIELD v 1.42.....	105
Figura N°39: Piel de cocodrilo severidad baja.....	35
Figura N°40: Piel de cocodrilo severidad media.....	35
Figura N°41: Piel de cocodrilo severidad alta.....	36
Figura N°42: Exudación.	36
Figura N°43: Agrietamiento en bloque de severidad baja.....	37
Figura N°44: Agrietamiento en bloque de severidad media.....	37
Figura N°45: Agrietamiento en bloque de severidad alta.....	38
Figura N°46: Forma de medición de la ondulación.....	38

Figura N°47: Depresión de severidad alta	39
Figura N°48: Erosión por chorro de turbina	39
Figura N°49: Fisura por reflexión de juntas de severidad media	40
Figura N°50: Deterioro por derrame de combustible	40
Figura N°51: Parche de severidad baja.....	41
Figura N°52: Parche de severidad alta.....	41
Figura N°53: Parche de severidad alta.....	42
Figura N°54: Peladura de severidad alta.....	42
Figura N°55: Ahuellamiento de severidad media	43
Figura N°56: Ahuellamiento de severidad alta	43
Figura N°57: Pavimento de concreto asfáltico expuesto a losa de hormigón. Severidad baja.....	44
Figura N°58: Pavimento de concreto asfáltico expuesto a losa de hormigón. Severidad alta.....	44
Figura N°59: Fisura por deslizamiento	45
Figura N°60: Hinchamiento de severidad media	45
Figura N°61: Estallido	47
Figura N°62: Rotura de esquina, severidad media	47
Figura N°63: Fisuras L/T/D severidad media	48
Figura N°64: Fisuras L/T/D severidad alta	48
Figura N°65: Fisura de durabilidad “D” severidad media	49
Figura N°66: Fisura de durabilidad “D” severidad alta.....	49
Figura N°67: Fallo en el sellado de juntas de severidad alta	50
Figura N°68: Parcheo menor de severidad media	50
Figura N°69: Parcheo menor de severidad alta	51
Figura N°70: Parcheo mayor de severidad media	51
Figura N°71: Parcheo mayor de severidad alta	52
Figura N°72: Pérdida repentina.....	52

Figura N°73: Bombeo	53
Figura N°74: Desprendimiento superficial, severidad media	53
Figura N°75: Desprendimiento superficial, severidad alta	54
Figura N°76: Asentamientos de severidad media	54
Figura N°77: Asentamientos de severidad alta	55
Figura N°78: Losa cuarteada, severidad media.....	55
Figura N°79: Losa cuarteada, severidad alta.....	56
Figura N°80: Fisuras por contracción.....	56
Figura N°81: Desprendimiento, severidad media	57
Figura N°82: Desprendimiento, severidad alta	57
Figura N°83: Desprendimiento de esquina, severidad media	58
Figura N°84: Desprendimiento de esquina, severidad alta.....	58
Figura N°85: Estructura del pavimento de concreto asfáltico a evaluar – FAARFIELD v. 1.42.....	106
Figura N°86: Tráfico de aeronaves – número de salidas anuales duplicadas – FAARFIELD v. 1.42.....	107
Figura N°87: Resultados de la evaluación Prueba 1 del pavimento de concreto asfáltico – FAARFIELD v. 1.42.....	108
Figura N°88: Resultados de la evaluación Prueba 3 del pavimento de concreto asfáltico – FAARFIELD v. 1.42.....	109
Figura N°89: Resultados de la evaluación Prueba 1 pavimento de concreto hidráulico – FAARFIELD v. 1.42.....	110
Figura N°90: Resultados de la evaluación Prueba 1 pavimento de concreto hidráulico – FAARFIELD v. 1.42.....	111
Figura 93: Resultados de la evaluación Prueba 1 pavimento de concreto hidráulico – FAARFIELD v. 1.42.....	111

RESUMEN

Como sabemos nuestro país es uno de los destinos turísticos más solicitados actualmente, vemos esto en el incremento del tráfico aéreo año tras año, por este motivo es necesario tener un sistema aeroportuario funcional. Por lo tanto, este presente trabajo tiene como objetivo general comparar el desempeño de los pavimentos de concreto asfáltico y de concreto hidráulico, basándonos en investigaciones anteriores.

Esta investigación fue de tipo descriptiva y aplicada con una metodología de tipo análisis deductivo.

Debido a la cantidad de diseños realizados para la construcción de nuevos pavimentos aeroportuarios en el país, de los cuales se ha observado que ambos tipos de pavimento son adecuados para la circulación de aeronaves. Sin embargo, existen características que son necesarias conocer para un correcto análisis de diseño y construcción. Para ello, se utilizó como guía principal las metodologías establecidas por la FAA y los manuales de la OACI. Se realizó un diseño para ambos tipos de pavimento, se analizaron los costos de su construcción, las fallas que se presentan en ambos concretos y una evaluación de los pavimentos haciendo uso del programa FAARFIELD.

Se concluyó que, al aumentar el número de salidas anuales para evaluar el diseño inicial, FAARFIELD nos muestra resultados similares en cuanto a la cantidad de vida útil; sin embargo, los resultados del deterioro del concreto asfáltico son relativamente mayores al del concreto hidráulico. Por lo que, se deduce que ambos pavimentos son capaces de soportar el tráfico para el cual fueron diseñados y posibles aumentos de carga.

Palabras clave: pavimento de concreto asfáltico, pavimento de concreto hidráulico, valor CDF, valor de k.

ABSTRACT

As we know, our country is one of the most popular tourist destinations today, we see this in the increase in air traffic year after year, for this reason it is necessary to have a functional airport system. Therefore, this investigation has the general objective of comparing the performance of asphalt concrete and hydraulic concrete pavements, based on previous research.

This research was descriptive and applied with a deductive analysis type methodology.

Due to the number of designs made for the construction of new airport pavements in the country, of which it has been observed that both types of pavement are suitable for the circulation of aircraft. However, there are characteristics that are necessary to know for a correct design and construction analysis. For this, the methodologies established by the FAA and the ICAO manuals were used as the main guide. A design was made for both types of pavement, the costs of their construction, the failures that occur in both concretes and an evaluation of the pavements using the FAARFIELD program were analyzed.

It was concluded that, by increasing the number of annual departures to evaluate the initial design, FAARFIELD shows us similar results in terms of the amount of useful life; however, the deterioration results for asphalt concrete are relatively higher than for hydraulic concrete. Therefore, it follows that both pavements are capable of supporting the traffic for which they were designed and possible increases in load.

Keywords: asphalt concrete pavement, hydraulic concrete pavement, CDF value, k value,

INTRODUCCIÓN

La presente investigación titulada “Comparación entre el concreto asfáltico y concreto hidráulico en pavimentos aeroportuarios”, tiene como objetivo analizar ambos tipos de material en cuanto a su función técnica y económica. Basándonos en investigaciones anteriores de los últimos años, se evalúan los pavimentos aeroportuarios considerando su diseño, fallas, presupuesto y evaluación estructural. De esta manera, se podrá hacer la comparación de ambos tipos de concreto. En Perú el concreto asfáltico es el más utilizado en pavimentos aeroportuarios debido a su sencilla construcción y a su menor costo; sin embargo, en los últimos años se ha dado como recomendación el uso del concreto hidráulico debido a su mayor tiempo de vida útil y su menor número de reparaciones.

Esta investigación está dividida en cinco capítulos, en el primer capítulo se desarrolla la problemática de la investigación, sus objetivos y la justificación del estudio.

En el segundo capítulo, se desarrolla el marco teórico en el cual nos enfocamos en los antecedentes de los pavimentos aeroportuarios, definiciones de términos básicos, elementos de un aeropuerto, factores para el diseño y la presentación de las metodologías para el diseño de ambos pavimentos, teoría de costo-eficiencia de la FAA, fallos en los pavimentos aeroportuarios y concepto de evaluación estructural en FAARFIELD.

El tercer capítulo describe el sistema de hipótesis, hipótesis principal y específicas, en las cuales se analiza si las hipótesis establecidas se pueden demostrar con los resultados de la investigación, así como también la variable dependiente e independiente y su relación entre ellas.

En el cuarto capítulo se muestra la metodología de la investigación, se describe el tipo y método de la misma, la población de estudio, diseño muestral, técnicas e instrumentos de recolección de datos, sus tipos e instrumentos, criterios de validez y confiabilidad.

En el quinto capítulo hacemos la presentación y el análisis de la investigación, presentando la situación actual de los casos de pavimento de concreto hidráulico, procedimiento de un diseño de ambos pavimentos bajo la metodología de la FAA y su diseño en el software FAARFIELD, la evaluación estructural de ambos pavimentos en el

programa, conclusiones de investigaciones en las que hemos basado este trabajo, análisis de resultados en ambos tipos de pavimento con relación al diseño, análisis de presupuesto, de fallas más frecuentes y la contrastación de las hipótesis establecidas en el tercer capítulo. Después de presentar y analizar los puntos mencionados, se observan los resultados de los análisis para llegar a las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Los pavimentos aeroportuarios están diseñados para cumplir la demanda de tráfico aéreo, dependiendo del tipo de aeronave se deberían cumplir los estándares establecidos por la FAA (Federal Aviation Administration), de esta manera tenemos al pavimento de concreto asfáltico y al pavimento de concreto hidráulico como los diseños más discutidos en cuanto a su comportamiento, durabilidad, proceso constructivo y ámbito económico, ocasionando el análisis comparativo de la mejor opción en cuanto a los puntos ya mencionados.

Podemos observar en trabajos de investigación anteriores respecto a este tema, que se muestran las fallas del concreto asfáltico viejo en la pista de aterrizaje y se realiza un estudio para el diseño de un nuevo pavimento. En el cual, se establece el diseño de ambos pavimentos y se comparan con el fin de dar la opción más viable del caso.

Se sabe que, el pavimento de concreto asfáltico y el de concreto hidráulico tienen la misma función de repartir las cargas de tal forma que sea una estructura capaz de ser transitada sin colapsar ni fallar. El pavimento asfáltico recibe y reparte las cargas a cada una de las capas de éste, es decir, la carga aumenta de área al pasar a la siguiente capa de tal manera que la última capa resulta ser la menos cargada. Por el contrario, el pavimento rígido reparte las cargas en la losa de concreto hidráulico. Cabe mencionar que ambos métodos cumplen con soportar el peso de las aeronaves.

Se ha visto que el tiempo de vida útil del concreto asfáltico es menor y conlleva a un mayor costo para su rehabilitación. Normalmente los pavimentos son diseñados para cumplir un tiempo de vida de 10 a 20 años, que generalmente no se llega a cumplir. Lo cual se debería evaluar, si cumple o no, los requisitos mínimos establecidos por la FAA y la OACI.

Teniendo en cuenta que ambos pavimentos van a necesitar un diseño preciso para soportar el tráfico aéreo durante toda su vida útil se deben tomar en cuenta los procedimientos de investigaciones anteriores para diseño, reconocer las fallas que puedan sufrir y el análisis de presupuesto para una mejor elección de material.

En investigaciones anteriores, se establece al pavimento asfáltico como solución más económica para su construcción. En ellas también se precisa que se debe realizar más estudios de pavimentos aeroportuarios ya que nos limitamos sólo a las investigaciones de diseño.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es el desempeño del pavimento de concreto asfáltico y de concreto hidráulico en pavimentos aeroportuarios?

1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cómo se diseñan los pavimentos aeroportuarios usando de las metodologías de la FAA?
- b) ¿Cuánto es la variación de presupuesto de ambos tipos de pavimentos aeroportuarios?
- c) ¿Qué tipos de fallas se presentan en los pavimentos aeroportuarios?
- d) ¿Cuál es la variación estructural que poseen los pavimentos aeroportuarios?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Comparar el desempeño del pavimento de concreto asfáltico y del concreto hidráulico en pavimento aeroportuarios, basándonos en investigaciones anteriores.

1.3.2 Objetivos específicos

- e) Explicar el diseño de los pavimentos aeroportuarios según la metodología AC 150/5320-6D de la FAA y el software FAARFIELD.
- f) Realizar un análisis de costo y presupuesto de ambos tipos de pavimentos.
- g) Identificar las fallas que se producen para ambos tipos de pavimentos aeroportuarios.
- h) Realizar una evaluación estructural de los pavimentos en el software FAARFIELD.

1.4 Importancia y justificación del estudio

Como sabemos, los aeropuertos son parte fundamental de un país en pleno desarrollo económico. Para darnos una idea de este crecimiento, según el diario

Gestión: “el tráfico aéreo de pasajeros a nivel internacional en Perú fue de 5’224,777 pasajeros de enero a mayo del 2019, lo que representó un incremento de 7.7% respecto a similar periodo del 2018, cuando se movilizaron 4’851,014 pasajeros, señaló la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC)”.

Los pavimentos aeroportuarios en el Perú son diseñados para un determinado tiempo de vida útil, el cual en muchos casos no llega a cumplir. Esto ocurre en la mayoría de aeropuertos del país, en algunos casos se ha tomado como problemas o fallas el tipo de suelo; sin embargo, se ha demostrado que las fallas que presentan se generan debido a las cargas a las que son sometidas diariamente.

Lamentablemente nuestro país no cuenta con un manual para la construcción de pavimentos netamente aeroportuarios, es por este motivo que nos vemos en la obligación de investigar un sin número de manuales, tesis, papers, entre otros. Para así, hacer un resumen del desempeño de un pavimento aeroportuario.

En el presente trabajo trataremos de explicar didácticamente el funcionamiento de un pavimento aeroportuario, para que así, futuras generaciones de colegas tengan la curiosidad de ahondar en este tema. Generando una discusión de qué tipo de pavimento utilizar y del por qué nuestros pavimentos no pueden ser igual de buenos que los que vemos en pistas de aterrizaje internacionales.

1.5 Limitaciones del estudio

La presente tesis es una investigación básica, realizada en base a investigaciones anteriores nacionales e internacionales, apoyándonos en manuales internacionales y en su mayoría libros de este tema en específico. Los resultados que se presentarán más adelante serán netamente en base a estudios ya realizados en el país. De esta manera se harán los análisis de los distintos casos que se conoce hasta el momento de pavimentos aeroportuarios que será ayuda para futuros ingenieros interesados en el tema y puedan utilizar esta investigación para la respectiva consideración de ambos tipos de pavimentos y llevar a cabo una mejor solución para futuros diseños en las distintas áreas del aeródromo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio de investigación

Según estudios realizados en el Perú, los pavimentos de concreto asfáltico son los más usados en aeropuertos debido a que presenta la misma función de repartir las cargas de las aeronaves a un menor costo en su construcción. Sin embargo, las tesis nacionales, en las que se presenta el caso de rehabilitación de pistas de aterrizaje construidas de pavimento de concreto asfáltico realizan todo el estudio de suelo y presentan a ambos tipos de pavimentos como solución para la nueva estructura de la pista. En estas investigaciones se plantea al pavimento de concreto hidráulico como una mejor solución para evitar daños a temprana vida útil. Por lo que, nos lleva a tener un registro de diseños estudiados de este tipo de pavimento sin seguir haciendo una mayor investigación de la misma.

El Perú cuenta con 21 aeropuertos con vuelos comerciales, de los cuales 4 poseen pavimentos de concreto hidráulico. Estos son; el Aeropuerto Internacional Coronel FAP Francisco Secada Vignetta de Iquitos, la cual presenta toda su estructura de pavimento de concreto hidráulico; el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez de Lima, inicialmente construido de pavimento de hormigón y ahora presenta sólo la plataforma; el Aeropuerto Internacional Rodríguez Ballón de Arequipa, presenta parte de la plataforma; el Aeropuerto Internacional Padre Aldamiz de Puerto Maldonado, la pista y plataforma de hormigón.

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 Investigaciones nacionales

Roel Rondo, K. A. (2018). *Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco* (Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú). Repositorio SUNEDU.

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

(p. 1)

Guzmán y Ulloa (2015). *Evaluación estructural, superficial y funcional del pavimento de la pista principal aeropuerto de Pisco: Renán Elías Olivera* (Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma). Repositorio SUNEDU.

El objetivo principal de esta tesis es: “Explicar los elementos de la evaluación estructural, superficial y funcional del pavimento de la pista principal del aeropuerto de Pisco Renán Elías Olivera, para cumplir con la norma establecida por las FAA”. (p.2)

Delgado y Quispe (2012). *Diseño del pavimento de un aeropuerto* (Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú). Repositorio SUNEDU.

“Los objetivos principales se detallan a continuación: diseñar el pavimento del área de movimiento de un aeropuerto, ubicado en Punta Hermosa, utilizando el método de la FAA; determinar la mejor alternativa entre el pavimento rígido y pavimento flexible y realizar un estudio de costo y presupuesto para la alternativa más conveniente”. (p.3)

Camarena Campos, K.A. (2018). *Implementación de un sistema de gestión de pavimentos para el área de movimiento de aeropuertos* (Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería). Repositorio SUNEDU.

El objetivo general es: “Proponer un plan de M&R que garantice cumplir con el ciclo de vida de diseño de un pavimento, preservando un adecuado nivel de servicio”. (p.3)

2.2.2 Investigaciones internacionales

Gil Herlvar, A. (2016). *Conservación de pavimentos aeroportuarios, aplicación caso práctico: reparación de la calle de rodaje (taxiway) en la base aérea de Getafe (Madrid)* (Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid).

http://oa.upm.es/44317/1/Tesis_master_Alejandro_Gil_Helvar.pdf

“el objetivo de este Trabajo Fin de Máster es precisamente el de dar los primeros pasos para que en un futuro próximo se disponga de un texto

amplio pero específico sobre la materia de los pavimentos aeroportuarios que facilite el aprendizaje de los alumnos y la práctica profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos”. (p.2)

Bórquez Bertrán, M. E. (2014) *Diseño de la estructura de pavimento de la pista del aeródromo de Panguipulli (Chile)* (Tesis de grado, Universidad Austral de Chile).

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcib736d/doc/bmfcib736d.pdf>

“Tiene como objetivo diseñar la estructura de pavimento del aeródromo de Panguipulli, determinando el espesor total de la estructura de pavimento junto a los espesores individuales de las capas de mezcla en caliente, base y subbase, basado en análisis de suelos realizado en el aeródromo de Panguipulli y normativas de diseño utilizadas por el Ministerio de Obras Públicas”

García Saldivar, G. (2014) *Diseño de pavimentos para aeropistas (Ciudad Universitaria)* (Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México).

“Realizar el diseño de distintas estructuras de pavimento capaces de resistir las cargas presentes en una aeropista perteneciente a un aeropuerto en el que se llevan a cabo un número importante de movimiento al año, así como obtener la resistencia relativa de cada uno de estos diseños.”

2.3 Definición de términos básicos

2.3.1 Definición de un pavimento

Para Montejo (2002), un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (p. 1)

También nos indica qué características de acuerdo a su funcionamiento debe reunir un pavimento (p. 2):

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

2.3.2 Diferencia entre pavimentos de carretera y pavimentos aeroportuarios

El autor Yang H. Huang (2004), nos dice que:

Los pavimentos aeroportuarios son generalmente más gruesos que los pavimentos de las carreteras y requieren mejores materiales de superficie, porque la carga y la presión de los neumáticos de las aeronaves son mucho mayores que de los vehículos de carretera. Los mecanismos para diseñar los pavimentos pueden ser usados se trate de aeropuertos o de carreteras, sin embargo, se deben tomar algunas consideraciones:

“El número de repeticiones de carga en los pavimentos de aeródromos son menos recurrentes que en el de las carreteras”.

“El diseño de los pavimentos de carreteras está basado en el movimiento de 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”. (p.17)

2.3.3 Pavimentos en aeropuertos

Sobre los pavimentos exclusivamente en aeropuertos, Whitford R. K. (2003), señala que los pavimentos están diseñados y construidos para proveer superficies de viaje durables para todo clima, movimiento rápido de personas y mercancías con un nivel de comodidad aceptable para los usuarios. Estos requisitos de funcionalidad se logran mediante consideraciones cuidadosas durante las fases de diseño y construcción en los siguientes aspectos: selección del tipo de pavimento, selección del material que se va a utilizar en las diferentes capas del pavimento y el tratamiento del suelo de la subrasante, el diseño del espesor estructural de las capas del pavimento, el diseño de drenaje subterráneo para el sistema del pavimento, diseño del drenaje superficial, diseño geométrico y manejabilidad de la superficie del pavimento.

Merritt, F.; Kent, M. y Ricketts, J. (1999) señalan que los pavimentos aeroportuarios se construyen para soportar las cargas impuestas por el avión que utilice el aeropuerto y producir una superficie suave, adecuada para cualquier condición meteorológica. Los pavimentos de concreto hidráulico se recomiendan para áreas sujetas a un considerable derrame de combustible en las posiciones de operación o de servicio en plataformas, mientras que un pavimento asfáltico de bajo costo es adecuado para estabilizar un aérea sujeta a la erosión del chorro de los aviones. (p. 341)

2.3.3.1 Pavimentos de concreto asfáltico

Merritt, F.; Kent, M. y Ricketts, J. (1999) nos señala que este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

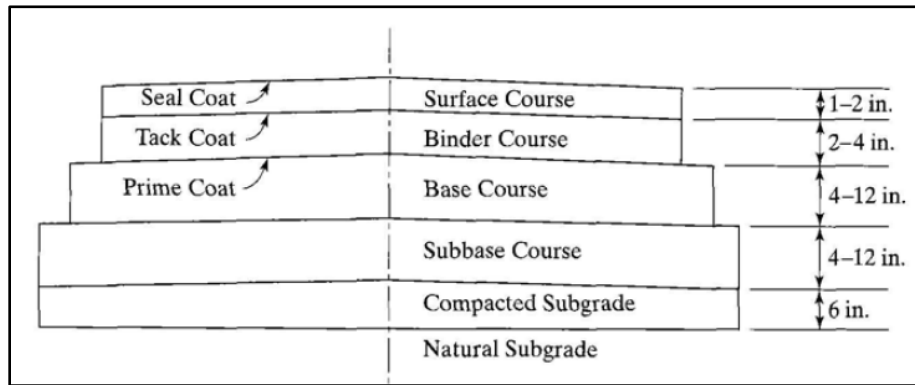


Figura N°1: Sección típica de un pavimento de concreto asfáltico

Fuente: "Pavement analysis and design", por Huang Y. (2004, p.9).

- Subrasante: ésta es el suelo subyacente que sirve como cimentación para un pavimento flexible. Puede ser suelo nativo o una capa de materiales prestados seleccionados que se compactan hasta una profundidad debajo de la superficie de la subbase.
- Subbase: es la capa entre la subrasante y la base. Por lo general, la subbase consiste en una capa compactada de material granular, tratado o no, o bien una capa de suelo tratado con un aditivo adecuado.
- Capa base: los materiales son variados para aprovechar los materiales locales y las prácticas de construcción. Cuando se usan agregados de alta calidad, los tratamientos de asfalto o cemento portland producen bases que son más eficaces que las bases no tratadas. De acuerdo con ello, la FAA reconoce una pulgada de ciertos materiales tratados para base, como equivalente a 1.5 in de materiales para base no tratados.
- Capa superficial: los requerimientos para esta capa son para proteger la base del agua superficial y proveer una superficie de rodaje tersa para aviones, dar espacio a cargas de tráfico, y resistir patinamiento, la abrasión al tráfico y desgaste a la intemperie. La superficie, generalmente, consta de dos capas bituminosas: una capa final de rodadura (carpeta) y una capa de ligazón. Por lo general, esta última contiene agregados más grandes y menos asfalto. La unión de estas

dos capas se puede mejorar mediante una capa de ligazón de emulsión de asfalto. La FAA recomienda un concreto asfáltico de grado denso, tendido en caliente y producido en una planta mezcladora central para la capa de trabajo de pavimentos flexibles. (p. 342 - 345)

2.3.3.2 Pavimentos de concreto hidráulico

Merritt, F.; Kent, M. y Ricketts, J. (1999): Por lo común un pavimento de este tipo consta de una losa de concreto de cemento portland que se apoya sobre una capa subbase (se puede omitir esta última capa, cuando el material de la subrasante es granular). La losa posee características de viga que le permiten extenderse de un lado a otro de las irregularidades en el material subyacente. Cuando se diseñan y construyen con propiedad, los pavimentos de concreto hidráulico proporcionan muchos años de servicio con un mantenimiento relativamente bajo.

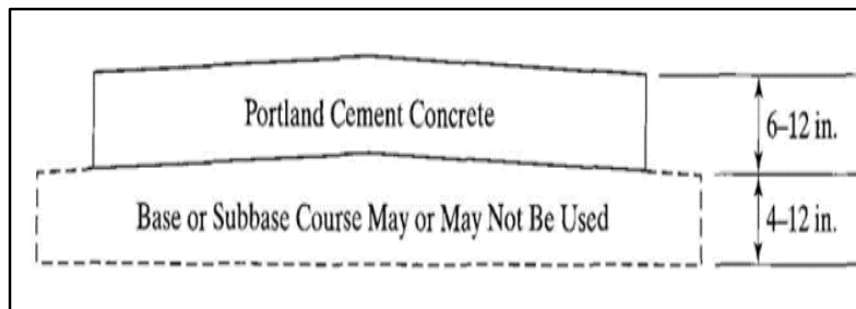


Figura N°2: Sección típica transversal de un pavimento rígido.

Fuente: “Pavement analysis and design”, por Huang Y. (2004, p.11).

- Subbase para un pavimento de concreto hidráulico: ésta consta de una o más capas compactadas de material granular o estabilizado colocadas entre la subrasante y la losa rígida. La subbase da lugar a un apoyo uniforme, estable y permanente para la losa de concreto. También puede incrementar el módulo de reacción, k , de la subrasante, reducir o impedir los efectos adversos de las heladas, proporcionar una plataforma de trabajo para el equipo durante la

construcción y prevenir el bombeo de los suelos de grano fino en las juntas, las grietas y los bordes de la losa rígida. (p. 345, 346)

2.3.4 Ingeniería de aeropuertos

Merritt, F.; Kent, M. y Ricketts, J. (1999), señala que la ingeniería de aeropuertos comprende el diseño y construcción de una amplia variedad de instalaciones para el aterrizaje, despegue, movimiento en tierra y estacionamiento de aeronaves; además del mantenimiento y reparación de las mismas, almacenamiento de combustible y manejo de pasajeros, equipajes y carga.

Así pues, un aeropuerto típico tendrá edificios terminales y hangares, pavimentos para pistas de aterrizaje, rodajes y plataformas de estacionamiento de aviones; caminos, puentes y túneles para automóviles y andadores para peatones; zonas de estacionamiento de automóviles; estructuras de drenaje y tanques subterráneos de almacenamiento de combustible y agua. Señala también que los ingenieros de aeropuertos tienen la responsabilidad de determinar el tamaño y disposición de tales instalaciones para el funcionamiento eficaz, seguro y a bajo costo de un aeropuerto. (p.316)

2.3.5 Elementos de un aeropuerto

2.3.5.1 Pista de aterrizaje

OACI (2006), en vista de la función vital que desempeñan las pistas en lo que respecta a la seguridad y eficiencia del aterrizaje y despegue de las aeronaves, al proyectar esas instalaciones y servicios es imprescindible tener en cuenta las características operacionales y físicas de los aviones que habrán de utilizar las pistas.

Principales factores que intervienen en la determinación del emplazamiento, orientación y número de pistas:

- Las condiciones meteorológicas, sobre todo el coeficiente de utilización de la pista, determinado por la distribución de los vientos, y por la presencia de nieblas localizadas.
- La topografía del emplazamiento del aeródromo y del terreno circundante.

- El tipo y volumen del tránsito aéreo al que se habrá de prestar servicio, incluso los aspectos de control de tránsito aéreo.
- Cuestiones relacionadas con la performance de los aviones.
- Cuestiones relacionadas con el medio ambiente, principalmente el ruido.

Hasta donde lo permitan los demás factores, la pista principal debe estar orientada en la dirección del viento predominante. Todas las pistas deberían orientarse de modo que las zonas de aproximación y de despegue se encuentren libres de obstáculos y, preferentemente, de manera que las aeronaves no vuelen directamente sobre zonas pobladas.

El número de pistas debe ser suficiente para atender las necesidades del tránsito aéreo (número de llegadas y de salidas de aviones y mezcla de tipos de avión que habrán de atenderse por hora en las horas punta).

Dentro de los factores que influyen en los criterios relativos a la longitud de la pista de aterrizaje, tenemos los siguientes: características de performance y masas de operación de los aviones; condiciones meteorológicas, principalmente viento y temperatura en la superficie; características tales como pendiente y estado de la superficie; presión barométrica y limitaciones topográficas. (p. 8-12)

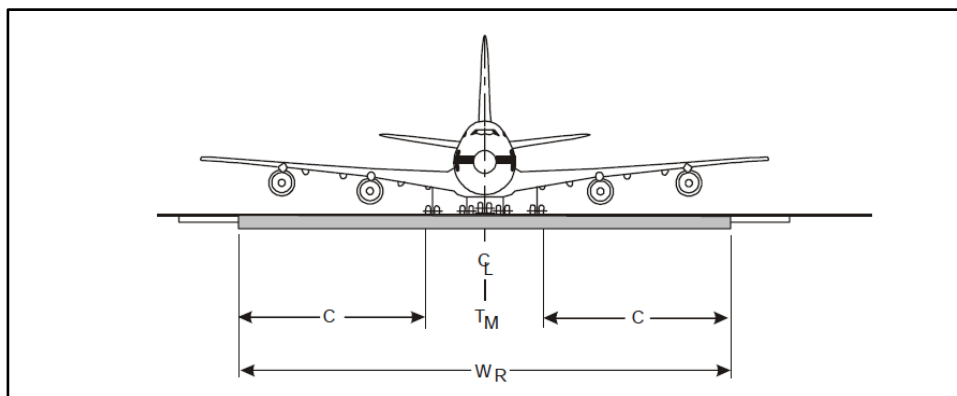


Figura N°3: Geometría de la anchura de pista.

Fuente: “Manual de diseño de aeródromos – Parte 1: Pistas”, por OACI. (2006, p. 51)

$$W_R = T_M + 2C$$

T_M = anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal

C = margen entre la rueda exterior y el borde de la pista

2.3.5.2 Pista de rodaje o carreteo

OACI (2005): Son un medio conveniente para que entren y salgan aviones de una pista. Por lo general son pistas pavimentadas que se enlazan entre sí y con plataformas para el estacionamiento de aviones.

La máxima utilización de la capacidad y eficacia de un aeródromo solo puede conseguirse logrando un equilibrio entre las necesidades de las pistas, terminales de pasajeros y mercancías, áreas de aparcamiento y servicio de aeronaves. Todos estos elementos están enlazados por un sistema de calles o pitas de rodaje. Por lo tanto, los componentes del sistema de pista de rodaje sirven para establecer el enlace con las funciones del aeródromo y son necesarias para alcanzar la utilización óptima del mismo.

El diseño del sistema de calles de rodaje debería ser tal que redujera al mínimo las restricciones a los movimientos de aeronaves entre las pistas y las plataformas. (p.8-10)

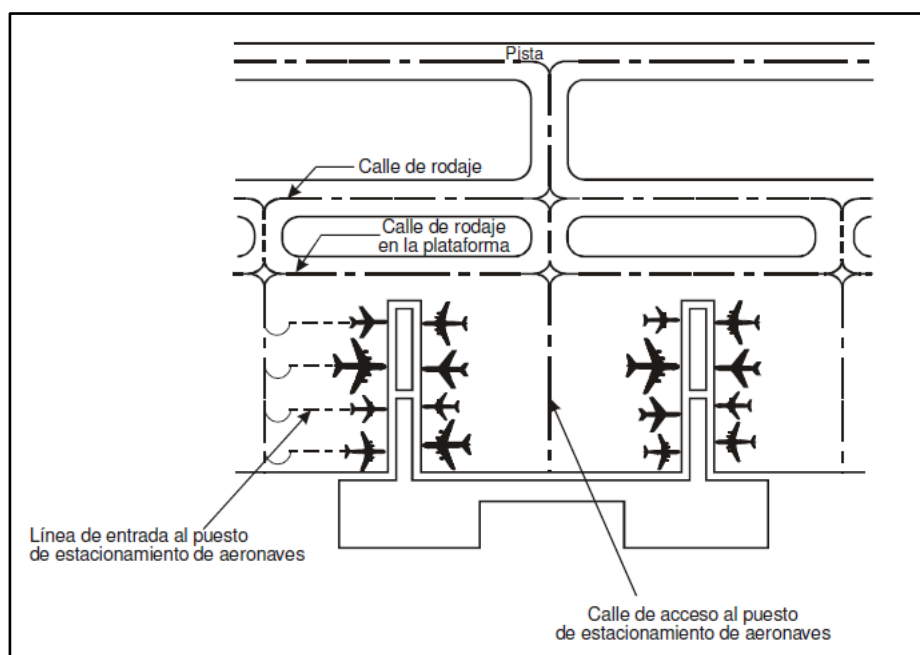


Figura N°4: Calles de rodaje en las plataformas.

Fuente: Manual de diseño de aeródromos – Parte 2: Calles de rodaje, plataformas y apartadores de espera. OACI. (2005, p. 11).

Los criterios para el diseño de pistas de rodaje son menos estrictos que los relativos a las pistas, ya que las velocidades de las aeronaves en las calles de rodaje son mucho más lentas que en las pistas. (p. 8)

2.3.5.3 Plataformas

OACI (2005), por plataforma se entiende una zona definida destinada a dar cabida a las aeronaves, para los fines de embarque o desembarque de pasajeros, correo o carga, abastecimiento de combustible, estacionamiento o mantenimiento. La plataforma suele estar pavimentada.

Dentro de los tipos de plataformas tenemos:

- Plataforma de la terminal de pasajeros: es una zona designada para las maniobras y estacionamiento de aeronaves que está situada junto a las instalaciones de la terminal de pasajeros o que ofrece fácil acceso a las mismas. Desde esta zona los pasajeros que salen de la terminal embarcan en la aeronave. Esta plataforma facilita el movimiento de pasajeros y se utiliza para el abastecimiento de combustible y mantenimiento de aeronaves, así como para el embarque y desembarque de carga, correo y equipaje.
- Plataforma de la terminal de carga: puede establecerse una plataforma distinta para las aeronaves que solo transportan carga y correo situada junto a un edificio terminal de carga. Es conveniente la separación de las aeronaves de carga y de pasajeros debido a los distintos tipos de instalaciones que cada una de ellas necesita en la plataforma y en la terminal.
- Plataforma de estacionamiento: en los aeropuertos puede necesitarse una plataforma de estacionamiento, además de la plataforma de la terminal, donde las aeronaves puedan permanecer estacionadas durante largos períodos. Éstas pueden utilizarse durante la parada-estancia de la tripulación o mientras se efectúa el servicio y mantenimiento periódico menor de aeronaves que se encuentran temporalmente fuera de servicio.

- Plataformas de servicio y de hangares: es una zona cubierta adyacente a un hangar de aeronaves en la que puede efectuarse el mantenimiento de aeronaves, mientras que una plataforma de hangar es una zona desde la cual las aeronaves entran y salen de un hangar de aparcamiento.
- Plataformas para la aviación general: para las aeronaves de la aviación general, utilizadas en vuelos de negocios o de carácter personal se necesitan varias categorías de plataformas a fin de atender las distintas actividades de la aviación general.

Como por ejemplo la plataforma temporal que son usados por aeronaves de estadía transitoria como lugar de estacionamiento temporal, así como para tener acceso a las instalaciones de abastecimiento de combustible, servicio de las aeronaves y transporte terrestre. (p. 63)

2.3.5.4 Edificio de terminal

OACI (2005), este es un elemento clave en cualquier distribución de terminal, en tamaño puede ser pequeño para aeropuertos con poca actividad o grande y complejo en terminales del sistema primario. La terminal debe planearse para atender el número de pasajeros de las horas pico que se prevé para los siguientes 10 años. La flexibilidad y la posibilidad de ampliaciones son requisitos de máxima importancia.

En terminales de aerolíneas pequeñas, toda la operación se realiza en un solo nivel. Las terminales grandes tienden a tener pasillos elevados para que los pasajeros que van a salir entren a la terminal en un segundo nivel y aborden su avión al mismo nivel, haciéndoles más fácil el traslado de ellos y de sus equipajes. (p. 81)

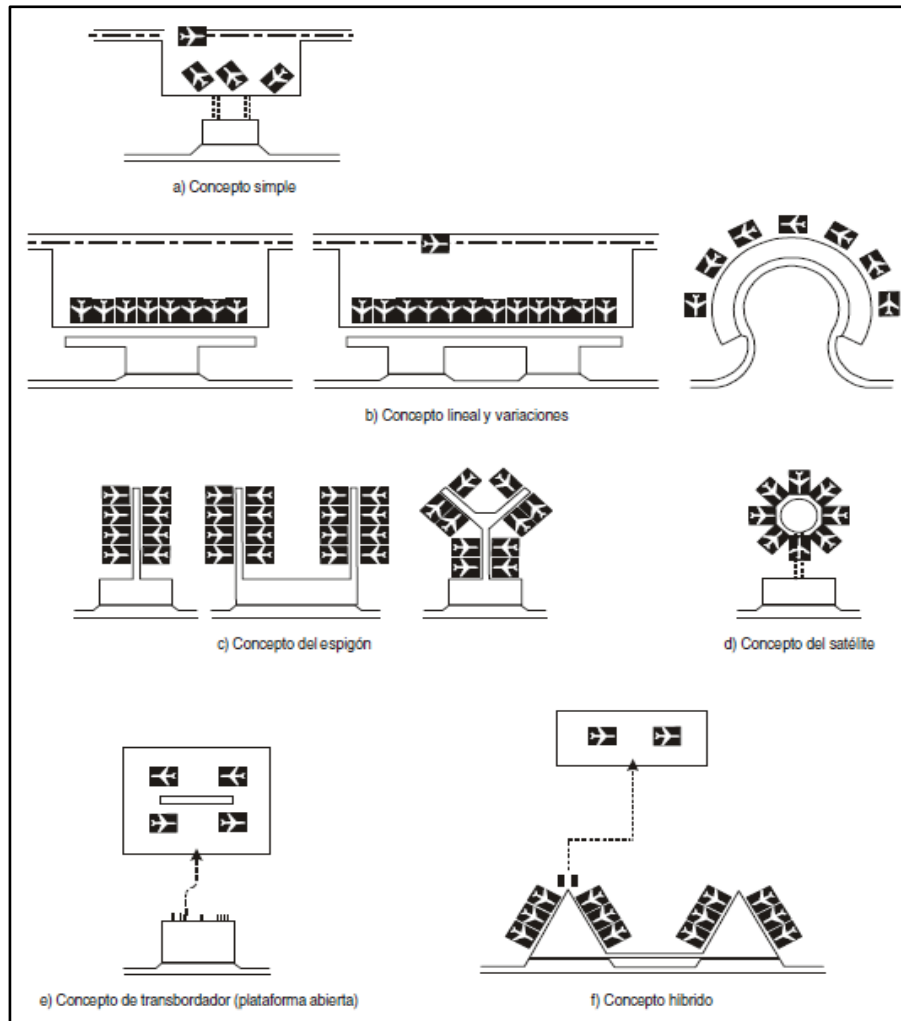


Figura N°5: Conceptos sobre las plataformas en la terminal de pasajeros.

Fuente: Manual de diseño de aeródromos – Parte 2: Calles de rodaje, plataformas y apartadores de espera. OACI. (2005, p. 68).

2.4 Factores a considerar en el diseño de pavimentos aeroportuarios

2.4.1 Tráfico de aeronaves

El estudio de tráfico de aeronaves influye directamente en el diseño de los espesores del pavimento. Este consta de recopilar el tráfico anual de las aeronaves por su peso, tipo de tren de aterrizaje y el número de salidas registradas.

Por lo general se debe tener la información de tráfico de años anteriores. De esta manera se podrá predecir y/o deducir las cargas a las que será sometida a futuro. Haciendo esto se evita que exista un deterioro temprano del pavimento ya que, si este estudio no se realiza de forma adecuada, se verán rápidamente fallas

superficiales perjudicando la seguridad circulatoria de los aviones y los costos respectivos al tener que solucionar los problemas que presente el pavimento.

2.4.2 Estudio de suelos

Como para toda estructura, obra civil, este estudio es de suma importancia debido a que es quien le dará el soporte a la estructura del pavimento que se construirá. Si el suelo tiene propiedades de resistencia baja, los espesores del pavimento tendrán que ser mayores. Otra solución sería, mejorar la calidad de la subrasante.

Según la FAA (AC 150/5320-6F, 2016), el estudio de suelos donde se apoyará la estructura de pavimento deberá considerar:

- Condiciones del suelo: Se debe evaluar el tipo y propiedad de los suelos que se utilizarán en el proyecto.
- Inspección y muestreo: exploración de las condiciones del subsuelo, para determinar la cantidad y extensión de los diferentes tipos de suelo.
- Ensayos de suelo: identificar los ensayos necesarios para caracterizar las propiedades del suelo para el proyecto.
- Ensayos de resistencia del suelo: para el diseño y evaluación del pavimento, los materiales de la subrasante se caracterizan por una adecuada resistencia o módulo de elasticidad.

Ensayos de resistencia de suelos:

Los ensayos de resistencia son necesarios para estudiar y predecir el comportamiento del suelo ante las cargas a la que será sometida. Para los pavimentos de concreto asfáltico, se mide la resistencia de la capa subrasante con el ensayo de Índice de Penetración California (CBR). En el caso de los pavimentos de concreto hidráulico, se hace uso del ensayo de Plate Bearing Test.

- Ensayo CBR, NTP 339.154 (ASTM D 1883): este ensayo es básicamente una prueba de penetración realizada a una velocidad de deformación constante. La carga necesaria para producir una penetración dada en el material bajo prueba se compara con la carga

requerida para producir la misma penetración en una piedra caliza triturada normalizada. El resultado se expresa como una relación de las dos cargas.

El CBR en laboratorio (ASTM D 1883), se realizan con materiales obtenidos en el lugar y remodelados a la densidad que se obtendrá durante la construcción. Las bases del pavimento tienden a alcanzar una saturación casi completa después de aproximadamente 3 años. La prueba de CBR debe realizar con un contenido de humedad que simule la condición de un pavimento que ha estado en servicio por un tiempo, por lo general, esto es lo que se conoce como CBR saturado. Los cambios estacionales e humedad también determinan el uso de un valor de diseño de CBR saturado, ya que el tráfico debe ser soportado durante períodos de alta humedad como el tiempo de deshielo de primavera.

Los ensayos de campo CBR o in-situ (ASTM D 4429) brindan información sobre los materiales de cimentación que han estado en funcionamiento durante varios años. Los materiales deben estar en su lugar durante un tiempo suficiente para permitir que la humedad alcance una condición de equilibrio, es decir, un relleno o terraplén que se ha construido y sobrecargado durante un largo período de tiempo antes de la construcción del pavimento.

- Ensayo Placa de Carga (Plate Bearing Test), AASHTO T 222: mide la capacidad de carga de la fundación del pavimento. El resultado, módulo de reacción de la subrasante (valor k) es una medida de la presión requerida para producir una deflexión unitaria en la base del pavimento.

El valor de k tiene las unidades libras por pulgada cúbica. Los ensayos de plato de carga se llevan a cabo en el campo en secciones de prueba construidas con las condiciones de humedad y compactación de diseño. Se requiere una corrección del valor k para simular las condiciones de humedad que pueden encontrarse en el pavimento en servicio. El tamaño de la placa o plato de carga estática es de una placa de 30 pulgadas (762 mm) de diámetro. Usar un

diámetro de placa más pequeño puede dar como resultado un mayor valor de k.

Ensayos Adicionales:

Según la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 2006), se deben realizar los siguientes ensayos para la determinación de propiedades físicas de los suelos:

- Análisis granulométrico, NTP 339.128 (ASTM D 422)
- Límite líquido, NTP.128(NTP 339.129)
- Índice plástico, NTP.128(NTP 339.129)
- Relación humedad-densidad: para el peso bruto de aeronaves de 30,000lb a más, se tiene que utilizar el método NTP 339.141 (ASTM D-1557), caso contrario se hará uso del método NTP 339.142 (ASTM D-698).

Según la FAA, debido a que el suelo presenta normalmente distintas secciones variables, existe una regla general para seleccionar el CBR que se usará en el diseño. Esta no dice que el valor del CBR de diseño tiene que ser similar o menor a 85% del CBR de la subrasante. Ésta es aplicada en ambas metodologías que presentaremos para el diseño de los pavimentos aeroportuarios.

2.4.3 Consideraciones de las aeronaves

Carga de aeronave:

Según las metodologías de la FAA, circulares AC 150/5320-6D y AC 150/5320-6F, el diseño de los pavimentos se hará según el peso bruto de las aeronaves. El peso bruto de las aeronaves es soportado por el 95% en los principales trenes de aterrizaje y el 5% restante lo soporta el tren de la punta o nariz. Según la OACI, se debe utilizar el peso máximo de despegue para el cálculo del espesor del pavimento.

Tren de aterrizaje:

Como ya se mencionó, el peso de la aeronave se distribuye según el tipo de configuración del tren de aterrizaje. Por lo tanto, se tiene que analizar el tren de

aterrizaje por su tipo y geometría. Para ello se considera que hay configuraciones típicas de estas para la distribución del peso de las aeronaves.

- Tren simple o Single Gear Aircraft: su geometría presenta una rueda a los costados y una en la nariz.
- Ruedas gemelas o Dual Gear Aircraft: geometría similar, pero considerando dos ruedas por puntal.
- Con bogie de cuatro ruedas o Dual Tándem Aircraft: su geometría es de dos por ruedas por puntal, seguido de dos ruedas adicionales por puntal.
- Con fuselaje ancho o Wide Body Aircraft

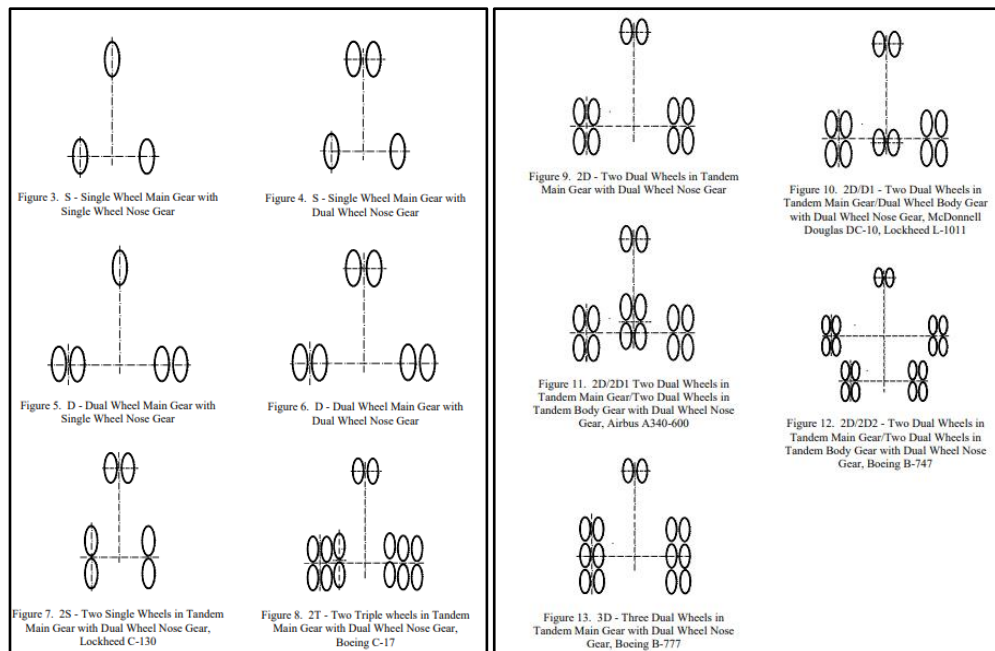


Figura N°6: Ejemplos de configuración de tren de aterrizaje.

Fuente: FAA. 5300.7, Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configuration (2005, p.8)

2.4.4 Aeronave de cálculo

Según la metodología del circular AC 150/5320-6D, se debe determinar una aeronave de diseño. Para ello se tiene que hacer el estudio de tráfico aéreo según las salidas anuales, y teniendo en cuenta los tipos de aeronave se reconocerá la más crítica, la cual determinará el espesor del pavimento. La aeronave de cálculo

no tiene que ser necesariamente la de mayor peso, sino tener en cuenta las características de la misma y sus salidas anuales.

2.4.5 Determinación de las salidas anuales equivalentes.

Como bien ya se hizo mención, la determinación de las salidas anuales son para poder determinar la aeronave de diseño o cálculo, que se aplica en la metodología circular AC 150/5320-6D. Es necesario tener en cuenta también los diferentes tipos de tren de aterrizaje y los pesos de cada una, tomando en cuenta las salidas. Se puede decir que este procedimiento hace pasar a las aeronaves por un mismo tipo de tren de aterrizaje. Existe un factor de conversión, según la aeronave de diseño.

Tabla N°1. Factor de conversión de trenes de aterrizaje.

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
Bogie	rueda simple	2
Bogie	ruedas gemelas	1.7
Ruedas gemelas	rueda simple	1.3
Bogie doble	ruedas gemelas	1.7

Fuente: FAA AC150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos (1995, p.25)

Según la metodología, después de convertir al mismo tren de aterrizaje, se debe hacer la proporción según los pesos de las aeronaves, la cual se hace con la fórmula:

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

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.

El tipo de aeronave de fuselaje ancho se consideran un caso particular, estos deben ser considerados otra manera ya que, la distribución de sus trenes de aterrizaje son muy diferentes comparado con las demás aeronaves. Para este caso se debe considerar cada fuselaje como aeronave con bogie de cuatro ruedas, con 30,000lb de peso equivalente.

2.5 Metodología FAA

En la presente investigación se presentarán dos métodos desarrollados según el manual establecido por la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos, para el diseño de pavimentos aeroportuarios. Ambas metodologías nos ayudan a establecer el diseño de la estructura del pavimento, las cuales se han usado en el país debido a que no se cuenta con una norma peruana.

El primero está basado en la circular AC 150/5330-6D. El cual, según la FAA 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.

Este método cubre el diseño de pavimentos para aeropuertos que prestan servicio a aeronaves con un peso bruto de 30 000 libras (13 000 kg) o más. Y para aeronaves más livianas con pesos brutos inferiores a 30 000 libras (13 000 kg).

Las curvas de diseño que se presentan se basan en el método de diseño CBR para pavimentos de concreto asfáltico y un análisis de tensión de borde articulado para pavimentos de concreto hidráulico.

El segundo método está basado en la circular AC 150/5320-6F que proporciona una guía de diseño para pavimentos de aeródromos. Dado que el programa de computadora FAARFIELD se utiliza para todos los diseños de pavimento, ya no existe una diferenciación entre el diseño del pavimento para aviones livianos y para aviones de más de 30,000 libras.

Este método presenta los procedimientos de diseño de pavimento empírico-mecánico que se implementan en el programa informático FAARFIELD. Para el diseño de pavimentos nuevos y repavimentaciones, FAARFIELD utiliza procedimientos de diseño basados en elementos finitos tridimensionales y de capas elásticas para pavimento de concreto hidráulico y concreto asfáltico respectivamente. El diseño estructural de pavimentos en proyectos financiados con fondos federales debe ejecutarse con FAARFIELD, y se debe incluir una copia del informe del diseño del pavimento en el informe de ingeniería.

Las diferencias de ambos métodos ya mencionados se presentan en la siguiente tabla comparativa:

Tabla N°2: Comparación de métodos de la FAA.

	AC 150/5320-6D	AC 150/5320-6F (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	Aplicación de la solución Westergaard y el modelo de Boussinesq	Análisis elástico en capas (LEAF) para pavimentos de concreto asfáltico. Modelo tridimensional de elementos finitos para pavimento de concreto hidráulico.
Método de Diseño del Espesor	Uso del CBR, tráfico aéreo y aeronave de diseño para pavimento de concreto asfáltico Uso de la constante elástica (k), tráfico aéreo y aeronave de diseño para pavimento de concreto hidráulico	El modelo de falla relaciona las coberturas con las siguientes fallas estructurales: deformaciones de la subrasante (pavimento de concreto asfáltico) o tensión máxima en la parte inferior de la capa de PCC (pavimento de concreto hidráulico)
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.

Fuente: FAA. FAARFIELD software Overview. XI ALACPA Seminar on Airport Pavements Ciudad de Panamá, Panamá David R. Brill, P. E, Ph D, 2012.

En el programa FAARFIELD se consideran dos conceptos que en el AC 150/5320-6D no. Estos son, el ratio Pass-to-Coverage (Paso cobertura) y el Factor de Daño Acumulado (CDF)

- Pass-to-Coverage (P/C): el ratio de “paso cobertura” ocurre cuando en un punto dado del pavimento se experimenta la carga máxima inducida por el número de veces que pase una aeronave. En el caso

de pavimentos de concreto asfáltico, se debe medir el número de repeticiones de la máxima deformación que ocurre en la parte superior de la subrasante. Para los pavimentos de concreto hidráulico, la tensión máxima ocurre en la parte inferior de la losa de concreto.

- Factor de daño acumulado (CDF): este factor es un número que representa la falla por fatiga estructural del pavimento que se ha agotado, es decir, el tiempo de vida utilizada. El factor CDF se expresa de la relación entre el número de repeticiones de carga aplicada y el número de repeticiones admisibles antes de la falla.

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

Para un nuevo diseño de pavimento, su estructura se ajusta hasta que el CDF sea igual a 1 para la mezcla de tráfico aplicada sobre el período de diseño estructural que se está evaluando. Para un solo avión y salidas anuales constantes. Para el caso que sea menor a 1, significada que la vida de fatiga del pavimento aún no ha sido gastada por completo. En FAARFIELD, el gráfico CDF se muestra de la siguiente manera:

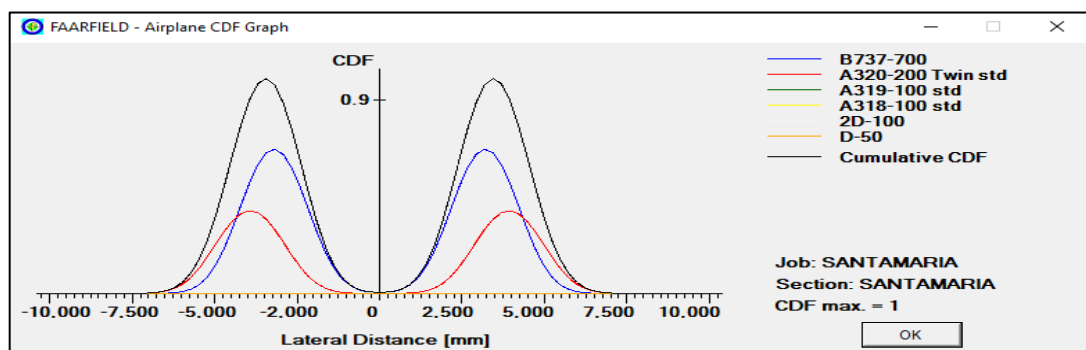


Figura N°7: Gráfico CDF del Software FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

2.5.1 Método FAA para pavimento de concreto asfáltico

a) Método de la circular AC 150/5320-6D:

El diseño del pavimento de concreto asfáltico por este método utiliza el índice de Penetración California (CBR), ASTM D 1883, en la cual se apoya de curvas de cálculo o ábacos. Estas nos ayudan para definir el espesor total del pavimento, carpeta asfáltica, base y subbase, que necesitará para resistir la carga a la que será sometida según el tráfico aéreo.

Usualmente debido a las varias capas del suelo con características distintas, se presentan varios valores de CBR, para este caso se necesita analizar los posibles diseños para la elaboración del pavimento. En caso sea conveniente retirar la capa del suelo débil de la subrasante, o hacer el diseño del pavimento con un CBR más elevado.

Las curvas o ábacos de diseño, se encuentran clasificadas según el tren de aterrizaje del tipo de aeronave de cálculo. Para usar las curvas es necesario conocer el valor del CBR de la subrasante, de la subbase, el peso bruto de la aeronave de diseño y las salidas anuales equivalentes. A continuación, se presentan las curvas para el diseño del pavimento de concreto asfáltico.

Si el valor de las salidas mencionadas supera a 25,000 se deberá hacer una corrección, aumentando tal como lo explica la siguiente tabla, y aumentar en una pulgada la carpeta asfáltica.

Tabla N°3: Factor de corrección para un tráfico mayor a 25,000

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

Fuente: FAA AC 150/5320-6D. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos (1995, p.49)

Las secciones de transición entre la pista (bordes de espesor de capas reducido) se debe multiplicar el valor del espesor de la capa base y subbase por 0.7.

b) Método de la circular AC 150/5320-6F:

Los diseños para pavimentos flexibles haciendo uso del programa FAARFIELD consideran los tipos de falla. La ocasionada por tensión vertical en la capa subrasante, provocando ahuellamiento. El otro tipo de falla es producida por la tensión horizontal en la carpeta asfáltica, originando agrietamiento. En la tabla se muestran los espesores mínimos de las capas del pavimento, estos se encuentran en función del peso bruto máximo de tipo de aeronave puesto en el concreto asfáltico.

Tabla N°4: Espesor mínimo de las capas – Pavimentos de concreto asfáltico.

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

Fuente: FAA AC 150/5320-6F Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos (2016, p.19)

Es necesario estabilizar la capa base y subbase en caso existan aeronaves de un peso de 100,000 libras o 45,360 kg o más que se presenten en el tráfico aéreo. Si se cuenta con un CBR de valor igual a 100 en la base y 35 en la sub base, no será necesario.

2.5.2 Método FAA para pavimento de concreto hidráulico

a) Método de la circular AC 150/5320-6D:

Se tienen curvas de diseño para pavimentos rígidos similares a los de pavimentos flexibles; es decir, curvas separadas para una variedad de tipos de trenes de aterrizaje y aviones. Estas curvas se basan en un supuesto de carga de borde articulado donde la carga se ubica tangente o perpendicular a la articulación. El

uso de las curvas de diseño requiere cuatro parámetros de entrada de diseño: resistencia a la flexión, módulo de subrasante, peso bruto de la aeronave de diseño y salida anual de la aeronave de diseño. Las curvas de diseño del pavimento rígido indican solo el espesor del hormigón. Los espesores de otros componentes de la estructura rígida del pavimento deben determinarse por separado.

Las curvas de diseño de pavimento rígido se construyen de manera que las entradas de diseño se ingresan en el mismo orden en que se analizan en el párrafo anterior. Se muestran líneas discontinuas en las curvas para indicar el orden de progresión a través de las curvas. El espesor del pavimento que se muestra se refiere al espesor del pavimento de hormigón únicamente, sin incluir la subbase. Este espesor es el que se muestra como "T" denominado espesor crítico. Los ábacos de diseño se presentan en el Anexo 1.

El valor k es, en efecto, una constante de resorte para el material que soporta el pavimento rígido y es indicativo de la capacidad de carga del material de soporte. Se determina de acuerdo al tamaño de la capa de cimentación y el tipo de agregado en uso. Estos son los gráficos donde se muestra el efecto del espesor de las capas frente al módulo de reacción del terreno de fundación (k).

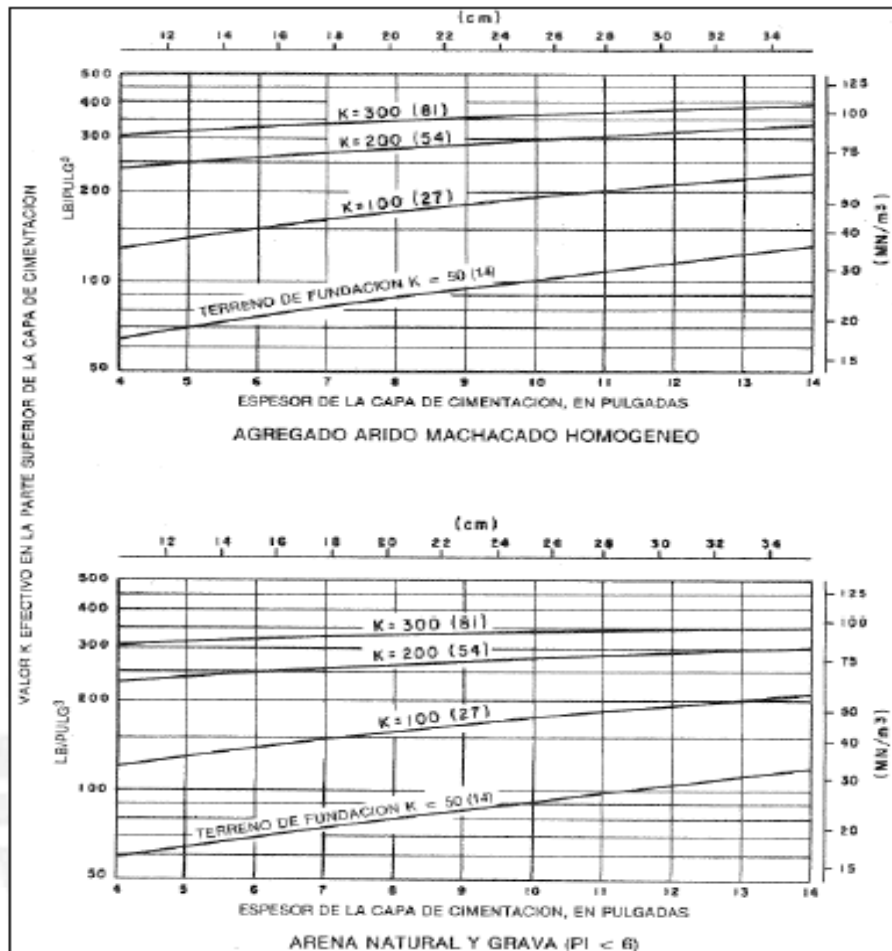


Figura N°8: Efecto de la capa de cimentación sobre k .

Fuente: FAA AC 150/5320-6D Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos (1995, p.57)

Si el aeródromo tiene un volumen de tráfico mayor a 25,000; se aplicará el mismo procedimiento de los pavimentos flexibles. De igual manera, el factor reducción para calcular la sección de márgenes y franjas de las pistas de aterrizaje se mantienen igual ya descrito en el diseño de pavimentos flexibles.

b) Método de la circular AC 150/5320-6F:

Los pavimentos rígidos para aeropuertos están compuestos por PCC (Hormigón de Cemento Portland), colocados sobre una capa base granular o estabilizada soportada por una subrasante compactada.

El proceso de diseño de FAARFIELD actualmente considera solo un modo de falla para pavimento rígido, este es el fisuramiento en la fibra inferior de la losa de concreto. La fisuración se controla al limitar la tensión horizontal en la parte

inferior de la losa de PCC y no tiene en cuenta la falla en las capas de subbase y subrasante. FAARFIELD itera sobre el espesor de la capa de concreto hasta que el CDF alcanza un valor de 1.0 que satisface las condiciones de diseño.

Se utiliza un modelo de elementos finitos tridimensionales para calcular las tensiones del borde en las losas de hormigón. El modelo tiene la ventaja de considerar dónde se producen las tensiones críticas para el diseño de losa. Las tensiones críticas normalmente ocurren en los bordes de la losa, pero, con ciertas configuraciones de tren de aterrizaje de aeronaves, pueden estar ubicadas en el centro de la losa. FAARFIELD utiliza el programa LEAF para calcular las tensiones en el interior y toma como la tensión de diseño, la mayor entre el 95% de la tensión en el centro de losa la tensión de borde calculada por 3D-FEM (reducida en un 25%).

El programa FAARFIELD no calcula el espesor de otras capas que no sean la losa de hormigón; sin embargo, respeta los requisitos colocados en la siguiente tabla.

Tabla N°5: Espesor mínimo de las capas – Pavimentos Rígido.

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 Estabilizada	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

Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airport Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos (2016, p.20)

FAARFIELD calcula el espesor de la losa basándose en la suposición de que el tren de aterrizaje del avión induce un esfuerzo máximo en la superficie inferior

de la losa. Las cargas que inducen grietas de arriba hacia abajo (como cargas de esquina) no se tienen en cuenta para el diseño. El esfuerzo máximo de diseño puede ser causado por la carga del tren de aterrizaje de la aeronave en el interior o el borde de la losa. El tren de aterrizaje del avión puede colocarse paralelo o perpendicular al borde de la losa para determinar la tensión máxima del borde.

El programa no calcula el espesor de capas distintas a la de la losa de PCC en estructuras rígidas de pavimento, pero aplicará los requisitos mínimos de espesor para todas las capas, como se muestra en la Tabla N°3 y N°4 para asegurar que se cumplan los requisitos mínimos de espesores.

El software requiere datos de entrada de diseño de los siguientes cinco conceptos: vida del diseño (años), resistencia a la flexión del concreto (psi), datos de la capa estructural (tipo y espesor), módulo de la subrasante (K o E) y mezcla de tráfico de los aviones (tipo, peso, frecuencia). Para espesores mayores que el mínimo, el espesor del pavimento debe redondearse a 0,5 pulgadas (1 cm) más cercano.

2.6 Análisis de Costo-Eficiencia

Según la FAA AC 150/5320-6F (p. 4), cuando se consideran secciones de pavimento alternativas se asume que todas las alternativas lograrán el resultado deseado. La pregunta es qué alternativa de diseño da como resultado el costo total más bajo durante la vida útil del proyecto y cuáles son los impactos en el costo del usuario de las estrategias alternativas. Los análisis económicos de costo o de valor presente se consideran los mejores métodos para evaluar el diseño del pavimento de aeropuerto o las alternativas de rehabilitación.

En las metodologías se plantea una ecuación básica para determinar el valor total de ambos tipos de pavimentos. En ella se especifica el costo del diseño inicial o de la rehabilitación y sumado a ella los costos de mantenimiento o alternativa de rehabilitación, entre otras consideraciones.

En la presente investigación nos limitaremos a evaluar los análisis de presupuestos existentes (costo de construcción del diseño propuesto) para dar a conocer las diferencias de costo entre ellas. Sin embargo, se debe tener en cuenta las

consideraciones de uso y el costo de futuros mantenimientos o rehabilitación de esta estructura.

2.7 Fallos de pavimentos aeroportuarios

Previo a la apertura para el paso de aeronaves, el deterioro de un pavimento se presenta indirectamente debido a agentes meteorológicos.

A continuación, se presentarán los deterioros para cada tipo de pavimento aeroportuario, pavimento de concreto asfáltico y pavimento de concreto hidráulico.

2.7.1 Fallos en pavimentos de concreto asfáltico

Los deterioros de los pavimentos de concreto asfáltico en aeropuertos se clasifican de la siguiente manera:

- Fisuras y grietas: estas nos representan el peligro a que se fragmente la continuidad de la estructura de pavimento. Como consecuencias habrá filtración de agua hacia las capas inferiores, haciendo que la resistencia de los materiales disminuya. Entre los cuales hay diversos tipos de fisuras:
 - Fisuras por reflexión en pavimentos con bases hidráulicas.
 - Fisuras por fatiga del pavimento.
 - Fisuras por falta de adherencia.
 - Fisuras por envejecimiento.
 - Fisuras por juntas.
- Las grietas extensas pasan a tener el aspecto de “piel de cocodrilo”, esto se debe generalmente a que la base granular ha fallado, y esto es lo que se refleja en la superficie.
- Envejecimiento del ligante: este se debe a la radiación solar, oxidación y la filtración de agua. Lo que provoca que el ligante pierda adhesividad y cohesión con los áridos, haciendo que se desprenda con una forma de escamas. Las formas de poder identificar el envejecimiento es cuando el pavimento pasa de tener

su color oscuro característico a tener un color más claro, es decir, se blanquea.

- Baches: son conocidos como hundimientos localizados. Ocurre por la falla de las capas inferiores de la capa de rodadura o también por un defecto en la construcción.
- Blandones: son hundimientos relativamente extensos, conocidos como “colchones”, en los que se puede apreciar a simple vista al paso de las cargas. Estas pueden deberse a una mala construcción de las capas subyacentes granulares, debido a bolsas arcillosas o limosas, por penetración de helada o por falta de dureza necesaria del ligante.
- Roderas: estas ocurren en zonas muy calurosas. Se debe a la acción del sol sobre la superficie de la mezcla bituminosa, lo que hace que eleve mucho su temperatura. Sea el caso de utilizar un ligante blando, mezclas deformables, un espesor insuficiente, o falta de adherencia y cohesión en las capas bituminosas, teniendo en cuenta la circulación de las aeronaves, se pueden generar fluencias y deformidad lateral.
- Pérdida de adherencia neumático-pavimento: ocurre por una mala textura superficial, malas características de rozamiento y rugosidad en la capa de rodadura, exponiendo de forma directa a la seguridad del tráfico aéreo.
- Contaminación por carburantes y grasas: Se debe a los líquidos que el pavimento está expuesto a recibir, carburantes y grasas, disminuyendo la resistencia de la mezcla asfáltica.

Fallos localizados

- Piel de cocodrilo: es la formulación de una serie de fisuras interconectadas provocadas por fatiga en la superficie asfáltica ante las cargas repetidas. Se da inicio debajo de la capa de rodadura donde se producen deformaciones y tensiones. Inicialmente se ven reflejadas en la superficie como fisuras paralelas. Debido a la

continuidad de cargas, éstas se conectan, dándole la forma similar de piel de cocodrilo. Piezas de varios lados y de ángulos agudos, son menores de 0.6 metros en su lado más largo.

- Esta falla se considera como un deterioro estructural mayor. Los niveles de severidad son:
- Bajo (L): finas grietas longitudinales, paralelas entre si con muy poca interconexión. No hay desprendimiento de material.
- Mediano (M): crecimiento e interconexión de las fisuras. Se mantienen en su lugar de manera segura.
- Alto (H): a este nivel, las fisuras ya están interconectadas y ya hay desprendimiento del material en sus esquinas. Estos desprendimientos pueden causar un peligro potencial de FOD (Foreign Object Damage).



Figura N°39: Piel de cocodrilo severidad baja.

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°40: Piel de cocodrilo severidad media.

Fuente: Norma ASTM D5340



Figura N°41: Piel de cocodrilo severidad alta.

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Exudación: en la superficie de rodadura, se presenta una película de material bituminoso de aspecto brillante y por lo general pegajosa. Esta se forma debido a la cantidad excesiva de cemento asfáltico o alquitrán en la mezcla o también por un nivel bajo de vacíos. Ocurre durante temporadas elevadas, el asfalto llena los vacíos y luego se expande hasta llegar a la superficie. Este se acumula en la capa de rodadura y se mantiene irreversible durante climas fríos.



Figura N°42: Exudación.

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Agrietamiento en bloque: se caracteriza por tener grietas interconectadas dividiendo al pavimento en piezas rectangulares. Las medidas de estos bloques son de 0.3m x 0.3m x 3m aproximadamente.
- Son causados por la contracción del asfalto y la variación de temperatura durante el día, la cual provoca una variación constante de tensiones. Cuando este fallo ocurre, indica que el material asfáltico se ha rigidizado significativamente. Presenta los siguientes niveles de severidad: Bajo, bloques por grietas con poco o ningún desprendimiento (grietas de 6mm de ancho); Medio, grietas selladas o vacías con moderado desprendimiento (presenta algún peligro FOD) con grietas mayores de 6mm; Alto, grietas bien definidas con desprendimiento del material provocando peligro FOD de alto riesgo.



Figura N°43: Agrietamiento en bloque de severidad baja

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°44: Agrietamiento en bloque de severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°45: Agrietamiento en bloque de severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Ondulación: esta está formada por una serie de valles y crestas, presentan poca separación entre sí, ocurren a lo largo del pavimento, mayormente menor a 1.5m. Las crestas son perpendiculares a la dirección del tráfico, debido a que la acción del mismo y teniendo una superficie y base inestable.

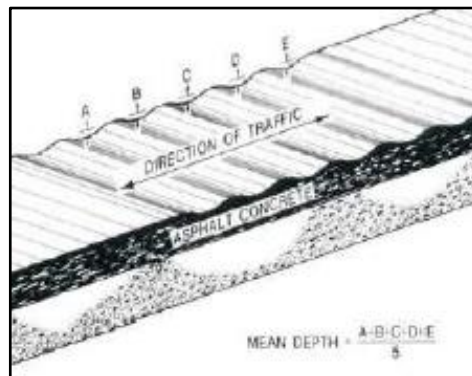


Figura N°46: Forma de medición de la ondulación

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Depresiones: se localizan en áreas de superficies pavimentadas que tienen elevaciones ligeramente menores que aquellas del pavimento que las rodea. Estas ocasionan áreas de “bebederos para pájaros” debido a la acumulación por lluvias. Pueden ser causadas por

problemas por asentamientos de una cimentación, causando desniveles y, cuando se llenan de agua de suficiente profundidad, pueden causar el hidroplaneo de la aeronave.



Figura N°47: Depresión de severidad alta

Fuente: Norma ASTM D5340

- Erosión por chorro de turbina: causante de áreas oscuras sobre el pavimento cuando el ligante bituminoso ha sido carbonizado o quemado. Estas áreas afectadas pueden variar su profundidad hasta aproximadamente 13mm (media pulgada).



Figura N°48: Erosión por chorro de turbina

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Fisuras por reflexión de juntas: este sólo ocurre únicamente sobre pavimentos asfálticos que ha sido construidos sobre un pavimento

de concreto hidráulico previamente. Estas fisuras son consideradas como fisuras longitudinales y transversales. Son causadas principalmente por movimiento de las losas de concreto debajo de la capa asfáltica, debido a los cambios de temperatura y de humedad, sin incluir las cargas a la que es sometida.

- El tráfico de aeronaves puede causar la rotura del asfalto cerca de las fisuras, ocasionando el desprendimiento del material exponiendo al peligro de FOD. Si el pavimento es fragmentado a lo largo de la fisura, esta se considera desgranada.



Figura N°49: Fisura por reflexión de juntas de severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Deterioro por derrame de combustible: ocurre por un derrame de combustible, aceite o un solvente de hidrocarburo. Se mide en metros cuadrados sobre la superficie afectada. Genera un fallo cuando hay pérdida del material o el ligante se haya ablandado.

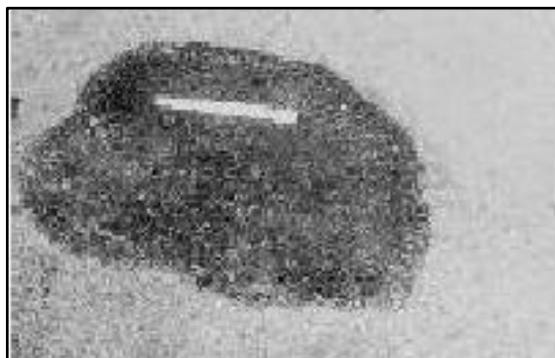


Figura N°50: Deterioro por derrame de combustible

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Parcheos: se considera un defecto, aun cuando se encuentre en un estado perfecto. La severidad de esta es: Bajo, buenas condiciones del parque y funcionamiento satisfactorio; Medio, deterioro del parque afectando la calidad de circulación; Alto, parque muy deteriorado y afecta de forma peligrosa la circulación de aeronaves.



Figura N°51: Parche de severidad baja

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°52: Parche de severidad alta

Fuente: Norma ASTM D5340

- Áridos Pulidos: se presenta el desgaste de los áridos debido al efecto del tráfico. Se muestra que la porción de los áridos que se muestran

sobre el asfalto es muy pequeña, ya no hay rugosidad o las mismas partículas han perdido su resistencia al deslizamiento.



Figura N°53: Parche de severidad alta

Fuente: Norma ASTM D5340

- Peladura y Efecto de la Intemperie: desgaste del pavimento causados por el desprendimiento de áridos y pérdida del ligante. Puede indicar que el ligante del asfalto se ha rigidizado significativamente.



Figura N°54: Peladura de severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Ahuellamiento: producido por la depresión del pavimento en la zona de tránsito del tren de la aeronave. La capa de rodadura es levantada a lo largo de los lados donde se produce el ahuellamiento. Este es

más visible ante la presencia de lluvias en las zonas de tránsito. Se produce usualmente por el desplazamiento lateral de los materiales por la acción de cargas. Este puede ocasionar un mayor fallo estructural del pavimento.



Figura N°55: Ahuellamiento de severidad media

Fuente: Norma ASTM D5340



Figura N°56: Ahuellamiento de severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Empuje por Losas de concreto hidráulico: los pavimentos de concreto hidráulico, suelen incrementar su longitud en los extremos donde se juntan con el pavimento de concreto asfáltico. Esto genera un empuje al pavimento asfáltico ocasionando engrosamiento y fisuras. El incremento de las losas de hormigón es causado por una

apertura gradual de las juntas a medida que se rellenan con materiales incompresibles que le evitan cerrarse.



Figura N°57: Pavimento de concreto asfáltico expuesto a losa de hormigón.
Severidad baja

Fuente: Norma ASTM D5340



Figura N°58: Pavimento de concreto asfáltico expuesto a losa de hormigón.
Severidad alta

Fuente: Norma ASTM D5340

- Fisuras por deslizamiento: se presentan como fisuras con forma de una luna creciente o medialuna que dan hacia la dirección del tráfico. Son producidas por las aeronaves al frenar o al girar causando deslizamiento y deformación en la capa de rodadura. Ocurre normalmente cuando existe una baja resistencia superficial de la mezcla y poca adherencia entre la superficie y la capa inferior.



Figura N°59: Fisura por deslizamiento

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Hinchamiento: un hinchamiento puede ocurrir de forma puntual en un área localizada o en forma de onda gradual en un área mayor. Estos pueden ser ocasionados por una superficie fisurada. También es causado por congelamiento en la subrasante o por hinchamiento de los suelos o en la superficie como recrecimiento asfáltico como resultado de un estallido en las losas de concreto.



Figura N°60: Hinchamiento de severidad media

Fuente: Norma ASTM D5340

2.7.2 Fallos en pavimento de concreto hidráulico

Los pavimentos de concreto hidráulico correctamente diseñados y construidos se caracterizan por su durabilidad y por no necesitar muchos mantenimientos para mantenerse en buena condición. Sin embargo, existen ciertos errores que puedan ocurrir en proyecto o en la construcción que puedan generar la aparición de deterioros. Estos se pueden clasificar en:

- Superficiales: defectos de regularidad superficial o pérdidas de textura.
- En bordes y juntas: desperfectos en bordes, sellado o grietas en las juntas.
- Estructurales: Fisuras en las losas, esquinas agrietadas, grietas diagonales o en sumideros.

Dando lugar a la presencia de grietas, clasificadas por su ancho, son:

- Finas: no mayor a 0.5 milímetros.
- Medias: desde 0.5 hasta 1.5 milímetros.
- Anchas: mayores de 1.5 milímetros.

Para poder hacer la medición de las grietas se deberá realizar en temporada de clima frío ya que presentan una mayor abertura.

Las causas principales de deterioro en la losa se consideran que son:

- Longitud excesiva de la losa.
- Espesor insuficiente de la losa.
- Mala calidad de los áridos.
- Baja capacidad portante.
- Corrosión de pasadores.
- Movimientos del cimiento.
- Ángulos agudos en las esquinas de las losas.

Fallos localizados

- Estallidos: ocurren generalmente en climas de altas temperaturas, por lo general en juntas o fisuras transversales que no poseen el ancho suficiente para que la losa pueda expandirse. Esto se produce debido al hinchamiento de material no compresible en el espacio de la junta.



Figura N°61: Estallido

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Rotura de esquinas: es una fisura que intercepta juntas a una distancia menor o igual que la mitad de la longitud a cada lado, esta es medida desde la esquina de la losa. Esta falla presenta una fisura que se extiende verticalmente a través del espesor total de la losa, son causadas por la aplicación repetitivas de cargas, junto con la pérdida de soporte y tensiones por alabeo.



Figura N°62: Rotura de esquina, severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Fisuras longitudinales, transversales y diagonales: estas fisuras dividen a la losa en dos o tres partes. Se generan normalmente por sollicitaciones producidas por la expansión y retracción del pavimento.



Figura N°63: Fisuras L/T/D severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°64: Fisuras L/T/D severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Fisura de Durabilidad D: estas fisuras aparecen generalmente como un conjunto de fisuras paralelo a una fisura lineal. Se origina por la baja capacidad de la losa de concreto para soportar factores de clima

frío como ciclos y hielo y deshielo. Al inicio de este fallo, el pavimento presenta un color oscuro alrededor de estas fisuras. Esto puede llegar a generar desintegración de la losa a una distancia e 300 a 600mm de la junta o fisura.



Figura N°65: Fisura de durabilidad “D” severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°66: Fisura de durabilidad “D” severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Fallo en sellado de juntas: es la acumulación de partículas de suelo o rocas en las juntas o infiltración de agua. La aparición de materiales incompresibles no permite que la expansión de las losas, esto puede generar alabeo, fragmentación o desprendimiento. La infiltración de agua en el sellado puede llegar a causar ablandamiento y deterioro.



Figura N°67: Fallo en el sellado de juntas de severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Parcheos menores: son áreas del pavimento que han sido reemplazados por un material de relleno. Los parcheos se dividen en menores (áreas menores a 0.5m^2) y mayores (áreas mayores a 0.5m^2). Estos suelen deteriorarse más rápido debido al tráfico de cargas generando desprendimientos en los bordes o fisuraciones tempranas.



Figura N°68: Parcheo menor de severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°69: Parcheo menor de severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Parcheos mayores: teniendo en cuenta la definición de los parcheos menores, presentan los mismos riesgos de fisuración, desprendimientos y peligro FOD.



Figura N°70: Parcheo mayor de severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°71: Parcheo mayor de severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Pérdidas repentinas: esta aparece por un fragmento pequeño del pavimento que se desprende a causa del clima frío (ciclos de hielo y deshielo) en conjunto con áridos expansivos. Las pérdidas varían entre 25 y 100mm de diámetro y entre 13 y 51mm de profundidad.



Figura N°72: Pérdida repentina

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Bombeo: en este fallo se presenta expulsión de material por presencia de agua en el subsuelo a través de las juntas o fisuras del pavimento debido a la deflexión de la losa al momento de recibir las cargas de aeronaves. Esto genera pérdida progresiva de la estructura

del pavimento porque al expulsar el agua, esta lleva partículas de grava, arena arcilla o limo.



Figura N°73: Bombeo

Fuente: Norma ASTM D5340

- Desprendimiento superficial, mapa de fisuras: se conoce como mapa de fisuras o fisuras erráticas, estas se refieren a una red de fisuras con poca profundidad y que solo se extienden en la parte superior de la losa de concreto. Estas se interceptan en ángulos de 120° . Son originadas por un curado inapropiado o incluso del acabado de la losa, puede causar desprendimientos superficiales. También puede producirse debido al efecto de hielo y deshielo.



Figura N°74: Desprendimiento superficial, severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°75: Desprendimiento superficial, severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Asentamientos: estas fallas son diferencias en elevación en una junta o una fisura, causado por consolidación no uniforme del material de la subrasante. Las elevaciones son notorias en la evaluación del pavimento.



Figura N°76: Asentamientos de severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°77: Asentamientos de severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Losa cuarteada: este tipo de falla divide a la losa en cuatro o más piezas. Es causado por el exceso de cargas o el mal soporte que tiene el suelo de cimentación. Si las piezas o fisuras están dentro de una rotura de esquina, entonces será definida como rotura en esquina severa.



Figura N°78: Losa cuarteada, severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°79: Losa cuarteada, severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Fisuras por contracción: estas fisuras son por lo general delgadas y solo llegan a extenderse algunos centímetros. Estos toman forma durante el acabo y curado de la losa, no se extienden a lo largo del espesor de la capa de rodadura.



Figura N°80: Fisuras por contracción

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Desprendimiento en juntas longitudinales o transversales: estas se refieren a la rotura de los bordes de las losas hasta de 60cm de la junta. Esto se produce por los esfuerzos excesivos en las juntas o también por fisuras generadas por infiltración de materiales incompresibles o sobrecarga del tráfico de aeronaves.



Figura N°81: Desprendimiento, severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°82: Desprendimiento, severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

- Desprendimiento en la esquina: es la presencia de rotura de la losa en esquinas de aproximadamente 600mm. Se diferencia de la rotura de la esquina en que este fallo se extiende con un ángulo para interceptar la junta, mientras que la rotura se extiende verticalmente a través de la losa.



Figura N°83: Desprendimiento de esquina, severidad media

Fuente: PAVER Distress Identification Manual



Figura N°84: Desprendimiento de esquina, severidad alta

Fuente: PAVER Distress Identification Manual

2.8 Evaluación de pavimentos en FAARFIELD

Según la FAA en la AC 150/5320-6F (capítulo 5, p. 1), las evaluaciones de pavimentos y estructuras aeroportuarias (por ejemplo, puentes, alcantarillas, desagües pluviales) son necesarias para evaluar la capacidad de un pavimento existente para soportar diferentes tipos, pesos y volúmenes de tráfico de aviones y para su uso en la planificación y diseño de mejoras al aeropuerto. Cuando la inspección visual indica fallas estructurales, la resistencia del pavimento puede no ser adecuada y pueden requerirse ensayos físicos para obtener información sobre la inspección visual y la evaluación de las condiciones del pavimento y gerenciamiento del pavimento.

Para el procedimiento de evaluación estructural de los pavimentos aeroportuarios se debe seguir un proceso metódico paso a paso, los cuales incluyen inspección in situ y otros puntos importantes mostrados en el capítulo 5 de la circular 150/5320-6F.

En la presente tesis nos limitaremos a usar los estudios de suelos utilizados para el diseño de los pavimentos de ambos tipos para poder realizar la evaluación estructural. De esta manera, teniendo en cuenta que el tráfico de aeronaves ha aumentado en el número de salidas anuales, se podrá hacer la evaluación en FAARFIELD

Para los pavimentos de concreto asfáltico se requiere como mínimo los siguientes parámetros:

- La determinación del espesor de las capas componentes.
- La capacidad portante de la subrasante, expresada como CBR o módulo de elasticidad (E).

Después de establecer los parámetros de evaluación para el pavimento asfáltico, se hará uso de FAARFIELD para determinar la vida estructural del pavimento existente para una mezcla de tráfico determinada o, alternativamente, determinar la estructura de pavimento que producirá una vida útil de 20 años para una mezcla de tráfico dada. Los datos de entrada requeridos son el CBR de la subrasante o el módulo de elasticidad, los espesores de las capas de carpeta asfáltica, base y subbase, y las cantidades de salidas anuales para todos los aviones que usan el pavimento. Los resultados a obtener de la evaluación en FAARFIELD es el valor Sub CDF, calculado para la subrasante; HMA CDF, calculado en la carpeta asfáltica (el valor puede indicar agrietamiento por fatiga); la vida de fatiga estructural pronosticada para la estructura, se basa en los criterios de falla de la subrasante. El procedimiento de los datos a ingresar se mostrará en el desarrollo de la investigación.

Para los pavimentos de concreto hidráulico se requiere como mínimo:

- El espesor de las capas componentes.
- La resistencia a la flexión del hormigón.

- El módulo de elasticidad de la subbase y subrasante.

De la misma manera, se ingresarán los datos de los estudios de suelo. Para este caso ingresaremos el valor k para la subrasante y los espesores de las capas del pavimento. Los resultados a obtener de FAARFIELD es el valor “PCC CDF”, calculado en la losa de concreto; la vida de fatiga estructural “Str Life (PCC)” en años; y el porcentaje CDFU, describe la condición del pavimento existente. El procedimiento de ingreso de datos se mostrará en el quinto capítulo.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

El desempeño del pavimento de concreto hidráulico es de 20% más que el de pavimento de concreto asfáltico.

3.1.2 Hipótesis específicas

- Existen valores similares en el diseño de los pavimentos aeroportuarios por ambas metodologías de la FAA.
- El costo del pavimento asfáltico es 50% mayor que el pavimento de concreto hidráulico.
- El pavimento de concreto asfáltico presenta fallas más repentinas que el pavimento de concreto hidráulico.
- La evaluación de los pavimentos en FAARFIELD mostrará que el pavimento de concreto hidráulico posee menor deterioro estructural.

3.2 Variables

3.2.1 Relación entre variables

3.2.1.1 Variable independiente

- Pavimento de concreto asfáltico.
- Pavimento de concreto hidráulico.

3.2.1.2 Variable dependiente

- Diseño.
- Costo.
- Fallas.
- Evaluación estructural.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y método de la investigación

4.1.1 Tipo de la investigación

La investigación es de tipo descriptiva y aplicada, ya que, se realizó en base a investigaciones anteriores con el fin de recopilar la información de los pavimentos aeroportuarios y ampliar su estudio haciendo uso de nuestras técnicas. Así mismo, se busca informar a quienes buscan investigar sobre estos tipos de pavimentos. Se describe las características del pavimento de concreto asfáltico y del concreto hidráulico para pavimentos aeroportuarios estudiando nuestras variables.

4.1.2 Método de la investigación

La presente investigación empleará el método de análisis deductivo por lo que, mediante un conjunto de informaciones de investigaciones anteriores, se analizarán ambos tipos de pavimento para explicar su funcionamiento, llegando así a lo que queremos demostrar en la investigación, basándonos en las normas establecidas por la FAA.

4.2 Población de estudio

La muestra del estudio son los pavimentos aeroportuarios de Perú, las cuales han sufrido diversas fallas en su estructura debido a la variación de cargas a las que han sido sometidas.

4.3 Diseño muestral

Se recopilaron investigaciones de pavimentos aeroportuarios nacionales e internacionales con los tipos de pavimento de concreto asfáltico y de concreto hidráulico, se evaluaron ambos métodos de solución para el diseño de un pavimento.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos

En la presente investigación se usaron técnicas de recopilación de datos basadas en tesis anteriores, libros, manuales nacionales e internacionales. Los instrumentos a usar son: la metodología FAA, manual de OACI y el software FAARFIELD.

4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

El estudio de ambos tipos de pavimentos aeroportuarios contiene diversas fuentes de elaboración, tanto en el país como en el extranjero. La presente investigación se basa en cumplir con la metodología de la Administración Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos.

4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos

La recolección de datos se realizó de la siguiente manera:

- Recopilación de los casos investigados de pavimentos aeroportuarios en Perú y en el extranjero.
- Investigaciones, tesinas, papers relacionados con pavimentos aeroportuarios.
- Investigación de la Metodología FAA y manual de OACI.
- Recopilación de investigaciones de diseños de pavimentos aeroportuarios.
- Desarrollo de análisis de ambos tipos de pavimentos en su diseño.
- Obtención de datos realizado del análisis comparativo.
- Uso de tablas, normas y software FAARFIELD.
- Analizar el presupuesto para ambos tipos de pavimento.
- Analizar las fallas que presentan los pavimentos aeroportuarios.
- Desarrollo de evaluación estructural en FAARFIELD.
- Presentar los resultados obtenidos de los análisis.
- Mostrar las conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Aeropuertos de concreto hidráulico

Según estudios realizados en el Perú, los pavimentos de concreto asfáltico son los más usados en aeropuertos debido a que presentan la misma función de repartir las cargas de las aeronaves a un menor costo en su construcción. Sin embargo, las tesis nacionales, cuando se trata de la rehabilitación de un pavimento aeroportuario se realizan todos los estudios de suelo y presentan a ambos tipos de pavimentos como solución para la nueva estructura de la pista. En estas investigaciones se plantea al pavimento de concreto hidráulico como una mejor solución para evitar daños a temprana vida útil.

El Perú cuenta con 21 aeropuertos con vuelos comerciales, de los cuales 4 poseen pavimentos de concreto hidráulico. Estos son: el Aeropuerto Internacional Coronel FAP Francisco Secada Vignetta de Iquitos, el cual presenta toda su estructura de pavimento de concreto hidráulico; el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez de Lima, inicialmente construido de pavimento de hormigón y que ahora presenta sólo la plataforma; el Aeropuerto Internacional Rodríguez Ballón de Arequipa, presenta parte de su plataforma en concreto y el Aeropuerto Internacional Padre Aldamiz de Puerto Maldonado, que presenta la pista y plataforma de hormigón.

5.2. Diseños de los pavimentos por la metodología FAA

Los presentes diseños de pavimentos que se mostrarán a continuación se dan en base a información y datos extraídos de la tesis para optar el título de Ingeniero Civil, presentada por la bachillera Karla Alejandra Roel Rondo, “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco” de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, febrero de 2018. La cual fue realizada en el distrito de San Andrés, Provincia de Pisco, Departamento de Ica.

Para el diseño según la metodología FAA se tomarán en cuenta los factores presentados en la investigación ya mencionada.

Estudio de Suelos:

Los resultados del estudio de suelos, para la construcción de base y subbase, fueron:

- Estudio de subrasante: está formado por arcilla de mediana plasticidad, ligeramente húmeda, color marrón {CL / A-7-5 (2)}. Posee un CBR igual a 14 a una compactación del 95% de la densidad máxima del ensayo Próctor Modificado (wop= 13.6%, máximo gd = 1.96gr/cm³). Posee un CBR de diseño de 12%.
- Estudio de canteras: el material de base será piedra chanca 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 gr/cm³). El material de sub-base será de arena mal graduada (SM / A-2-4) cual posee un CBR = 40% a una compactación del 100% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado (wop = 9.6.5, máximo gd = 1.71 gr/cm³)

Tráfico aéreo:

En la investigación se especifica que el aeropuerto de Pisco ha mantenido su uso como base aérea; por lo tanto, los tipos de aeronave que atendía eran militares. Por ello, se realizó un estudio de tráfico aéreo considerando los tipos de aeronaves que podrán aterrizar o despegar del aeropuerto mencionado.

A continuación, se presentará la tabla de salidas anuales considerando el tipo de aeronave, el número de salidas y su peso de despegue según su tipo.

Tabla N°6: Salidas Anuales.

AERONAVE	SALIDAS	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)
AIRBUS A319-132	5043	75500.00	166449.01
AIRBUS A320-233	69	77000.00	169755.94
AIRBUS A321-231	2400	93500.00	206132.21
AIRBUS A330-200	94	230000.00	507063.20
ANTONOV AN-26-100	698	25000.00	55115.57
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27000.00	59524.81
BOEING B727-200	9	95028.00	209500.88
BOEING B737-200	2756	49190.00	108445.39
BOEING B747-200	300	378000.00	833347.35
BOEING B747-400	165	397000.00	875235.18
BOEING B757-200	517	115680.00	255030.74
BOEING B767-200ER	68	179170.00	395002.23
BOEING B767-300F	40	186880.00	411999.88
BOEING B767-400	3100	204120.00	450007.57
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209000.00	460766.13
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263320.00	580521.23
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273300.00	602523.36
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286000.00	630522.07

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.46)

La presente tabla es necesaria para 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_{prom} : Tráfico anual promedio

T_i : Tráfico inicial

y: Periodo de diseño en años

r: Razón de crecimiento anual del tráfico

Dada la fórmula, según lo presentado en la tabla anterior y teniendo en cuenta la razón de crecimiento anual de tráfico igual a 7% según el Plan Maestro del Aeropuerto de Pisco.

Teniendo en cuenta los valores para el uso de la tabla se obtiene la siguiente con el pronóstico del tráfico anual promedio durante 20 años.

Tabla N°7: Tráfico Promedio Anual.

AERONAVE	SALIDAS	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL
AIRBUS A319-132	5043	75500.00	166449.01	10337.01
AIRBUS A320-233	69	77000.00	169755.94	141.43
AIRBUS A321-231	2400	93500.00	206132.21	4919.46
AIRBUS A330-200	94	230000.00	507063.20	192.68
ANTONOV AN-26-100	698	25000.00	55115.57	1430.74
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27000.00	59524.81	157.83
BOEING B727-200	9	95028.00	209500.88	18.45
BOEING B737-200	2756	49190.00	108445.39	5649.18
BOEING B747-200	300	378000.00	833347.35	614.93
BOEING B747-400	165	397000.00	875235.18	338.21
BOEING B757-200	517	115680.00	255030.74	1059.73
BOEING B767-200ER	68	179170.00	395002.23	139.38
BOEING B767-300F	40	186880.00	411999.88	81.99
BOEING B767-400	3100	204120.00	450007.57	6354.3
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209000.00	460766.13	47.14
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263320.00	580521.23	69.69
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273300.00	602523.36	225.48
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286000.00	630522.07	96.34

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.47)

5.2.1 Diseño de pavimento de concreto asfáltico

Para el diseño del pavimento de concreto asfáltico se presentará el desarrollo según la metodología FAA basándonos en el AC 150/5320-6D y AC 150/5320-6F.

5.2.1.1 Metodología AC 150/5320-6D

Tal como se mencionó en el segundo capítulo, es necesario calcular la aeronave de diseño para la presente metodología, la cual será aquella que necesite mayor espesor del pavimento. Se evaluará las aeronaves mostradas en la tabla N°7, con la salida anual correspondiente.

Dado que en el tráfico promedio anual corresponde a cada aeronave es menos a 25,000; no será necesario multiplicar el valor del espesor por un factor de corrección (Tabla N°3). De tal manera que, haciendo uso de los ábacos

presentados en el marco teórico se calculará el espesor por tipo de aeronave, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla N°8: Tráfico Promedio Anual.

AERONAVE	SALIDAS	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	5043	75500.00	166449.01	10337.01	DUAL	22
AIRBUS A320-233	69	77000.00	169755.94	141.43	DUAL	18
AIRBUS A321-231	2400	93500.00	206132.21	4919.46	DUAL	24.5
AIRBUS A330-200	94	230000.00	507063.20	192.68	DUAL TANDEM	21
ANTONOV AN-26-100	698	25000.00	55115.57	1430.74	DUAL	10.3
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27000.00	59524.81	157.83	DUAL	10.4
BOEING B727-200	9	95028.00	209500.88	18.45	DUAL	22.4
BOEING B737-200	2756	49190.00	108445.39	5649.18	DUAL	17.8
BOEING B747-200	300	378000.00	833347.35	614.93	WIDE BODY	25.3
BOEING B747-400	165	397000.00	875235.18	338.21	WIDE BODY	25.6
BOEING B757-200	517	115680.00	255030.74	1059.73	DUAL TANDEM	18.3
BOEING B767-200ER	68	179170.00	395002.23	139.38	DUAL TANDEM	21.5
BOEING B767-300F	40	186880.00	411999.88	81.99	DUAL TANDEM	21.8
BOEING B767-400	3100	204120.00	450007.57	6354.3	DUAL TANDEM	26.6
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209000.00	460766.13	47.14	DUAL TANDEM	24.8
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263320.00	580521.23	69.69	WIDE BODY	23.8
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273300.00	602523.36	225.48	WIDE BODY	24.3
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286000.00	630522.07	96.34	WIDE BODY	24.8

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.50)

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

Seguidamente se determinará las salidas anuales equivalentes en función a la aeronave de cálculo. Por lo que, será necesario realizar la conversión según los trenes de aterrizaje mediante el factor contenido en la Tabla N°1. Asimismo, se debe tener en cuenta la conversión según las cargas de las aeronaves, planteada

por la ecuación descrita en el Capítulo II: $\log R_1 = \log R_2 \times \frac{W_2^{\frac{1}{2}}}{W_1}$

En este caso, dado que la aeronave de diseño 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 lo mencionado por la FAA en el marco teórico, donde se plantea que el tren de aterrizaje soporta el 96% del peso bruto. Asimismo, cabe resaltar que, en caso de aeronaves de fuselaje ancho, se considerará un peso de despegue de 300,000 lb.

Tabla N°9: Salida aeronave afectado al factor de trenes de aterrizaje.

AERONAVE	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	FACTOR DE CONVERSIÓN	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL CORREGID
AIRBUS A319-132	166449.01	10337.01	DUAL	0.6	6202.21
AIRBUS A320-233	169755.94	141.43	DUAL	0.6	84.86
AIRBUS A321-231	206132.21	4919.46	DUAL	0.6	2951.68
AIRBUS A330-200	507063.20	192.68	DUAL TANDEM	1	192.68
ANTONOV AN-26-100	55115.57	1430.74	DUAL	0.6	858.45
ANTONOV AN-32B (AN-32)	59524.81	157.83	DUAL	0.6	94.7
BOEING B727-200	209500.88	18.45	DUAL	0.6	11.07
BOEING B737-200	108445.39	5649.18	DUAL	0.6	3389.51
BOEING B747-200	833347.35	614.93	WIDE BODY	1	614.93
BOEING B747-400	875235.18	338.21	WIDE BODY	1	338.21
BOEING B757-200	255030.74	1059.73	TANDEM	1	1059.73
BOEING B767-200ER	395002.23	139.38	TANDEM	1	139.38
BOEING B767-300F	411999.88	81.99	TANDEM	1	81.99
BOEING B767-400	450007.57	6354.3	TANDEM	1	6354.3
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	460766.13	47.14	TANDEM	1	47.14
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	580521.23	69.69	WIDE BODY	1	69.69
MCDONNELL DOUGLAS MD11	602523.36	225.48	WIDE BODY	1	225.48
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	630522.07	96.34	WIDE BODY	1	96.34

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.51)

Tabla N°10: Salidas anuales equivalentes.

AERONAVE	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL CORREGI	CARGA POR LLANTA (lb)	SALIDAS ANUALES EQUIVALENTES
AIRBUS A319-132	166449.01	10337.01	6202.21	39531.64	2836.41
AIRBUS A320-233	169755.94	141.43	84.86	40317.04	73.79
AIRBUS A321-231	206132.21	4919.46	2951.68	48956.40	3417.56
AIRBUS A330-200	507063.20	192.68	192.68	60213.76	266.30
ANTONOV AN-26-100	55115.57	1430.74	858.45	13089.95	36.46
ANTONOV AN-32B (AN-32)	59524.81	157.83	94.7	14137.14	13.51
BOEING B727-200	209500.88	18.45	11.07	49756.46	16.66
BOEING B737-200	108445.39	5649.18	3389.51	25755.78	402.53
BOEING B747-200	833347.35	614.93	614.93	30284.90	125.74
BOEING B747-400	875235.18	338.21	338.21	30284.90	80.17
BOEING B757-200	255030.74	1059.73	1059.73	30284.90	189.41
BOEING B767-200ER	395002.23	139.38	139.38	46906.51	102.07
BOEING B767-300F	411999.88	81.99	81.99	48924.99	67.79
BOEING B767-400	450007.57	6354.3	6354.3	53438.40	6354.51
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	460766.13	47.14	47.14	54715.98	49.35
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	580521.23	69.69	69.69	35625	31.99
MCDONNELL DOUGLAS MD11	602523.36	225.48	225.48	35625	83.42
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	630522.07	96.34	96.34	35625	41.66
SALIDAS ANUALES EQUIVALENTE					14189.3

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.52)

Teniendo 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.

Cálculo del espesor total del pavimento:

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 a 35. Los materiales a emplear en el pavimento en mención tendrán un CBR de la base igual a 112, y de la subbase de 40. Por lo 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: B767-400
- Peso bruto de aeronave de cálculo: 450,007.6 lb
- Salidas anuales equivalentes: 14,189.31

De esta manera reemplazamos los datos en el ábaco de diseño correspondiente a su tipo de tren de aterrizaje.

De acuerdo con el ábaco de la Figura N°9 del Anexo 1, el espesor total del pavimento es de 34”.

Carpeta asfáltica:

Para el cálculo del espesor de la carpeta asfáltica, se usará de referencia la aeronave de mayor peso dentro del tráfico aéreo (B747-400). Ubicando el ábaco correspondiente según su tipo de tren de aterrizaje (ver Figura N°6 del Anexo 1), se obtiene el valor del espesor igual a 5”.

Capa Subbase:

El espesor de la capa subbase se obtiene de igual forma de las curvas de diseño tal como el del espesor total del pavimento. Usando, para este caso, el CBR correspondiente a la subbase de 40%.

Dados los datos mencionados, según el ábaco correspondiente (Figura N°9, Anexo 1) el espesor de la capa base y la carpeta asfáltica tendrá 14”. Por lo tanto, el espesor de la subbase será de 20”, sabiendo que el espesor total es de 34”.

Capa Base:

El espesor de la capa base será la diferencia entre los 14” y lo que corresponde al espesor de la carpeta asfáltica; es decir 5”. De manera que, el espesor de la base es igual a 9”.

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

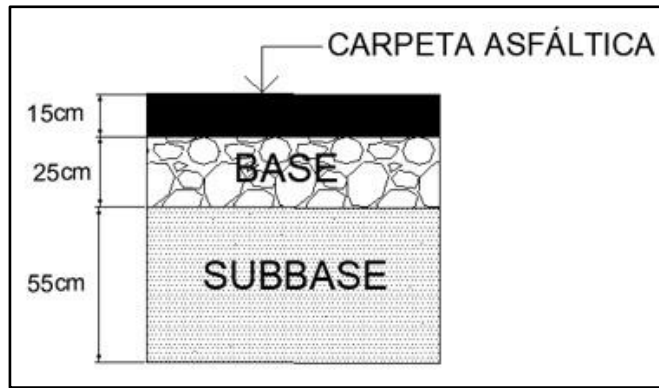


Figura N°9: Sección de pavimento flexible – margen crítico.

Fuente: Propia

Espesor del borde de la pista de aterrizaje:

La metodología AC 150/5320-6D (1995) define al espesor de borde como:

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.

Dado el factor de reducción, el espesor de la capa base tendrá un valor de 6.3". Por otro lado, la FAA indica que la carpeta asfáltica se reducirá hasta un valor mínimo de 2 pulgadas.

De esta manera, con fin de 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. Es decir, $34'' - 6.3'' - 2'' = 25.7''$

“Finalmente, la metodología también menciona el ancho (25' o 7.6m) que deberá respetar cada una de las partes de 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, el esquema de la sección de la pista de aterrizaje de resumen de los cálculos:

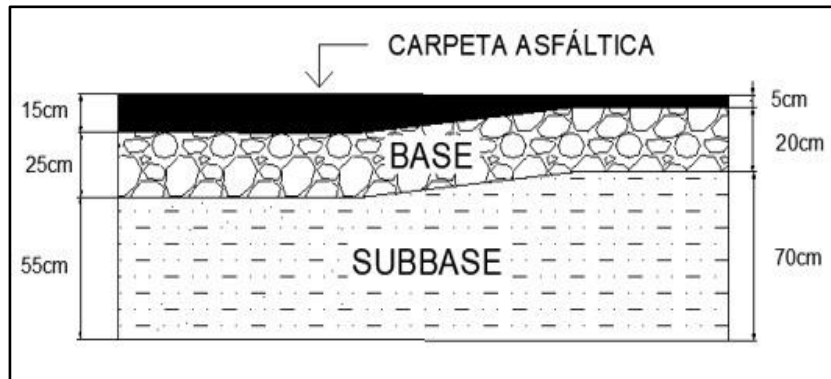


Figura N°10: Sección de pavimento flexible.

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.55)

5.2.1.2 Metodología AC 150/5320-6F:

Como se hizo mención en la teoría, se utilizará esta metodología circular AC 150/5320-6F. Para ello es necesario el uso del programa FAARFIELD (versión 1.42), el cual es un software que la FAA ha desarrollado para el diseño de los pavimentos aeroportuarios.

El programa emplea un factor CDF como resultado de haber ingresado el tráfico de aeronaves, peso bruto de las mismas, salidas anuales, razón de crecimiento anual y el tipo de material en la subrasante. Lo cual lo hace más práctico para el diseño.

Al iniciar el programa, la primera ventana que se muestra es la de los tipos de pavimento que se desea diseñar o evaluar.

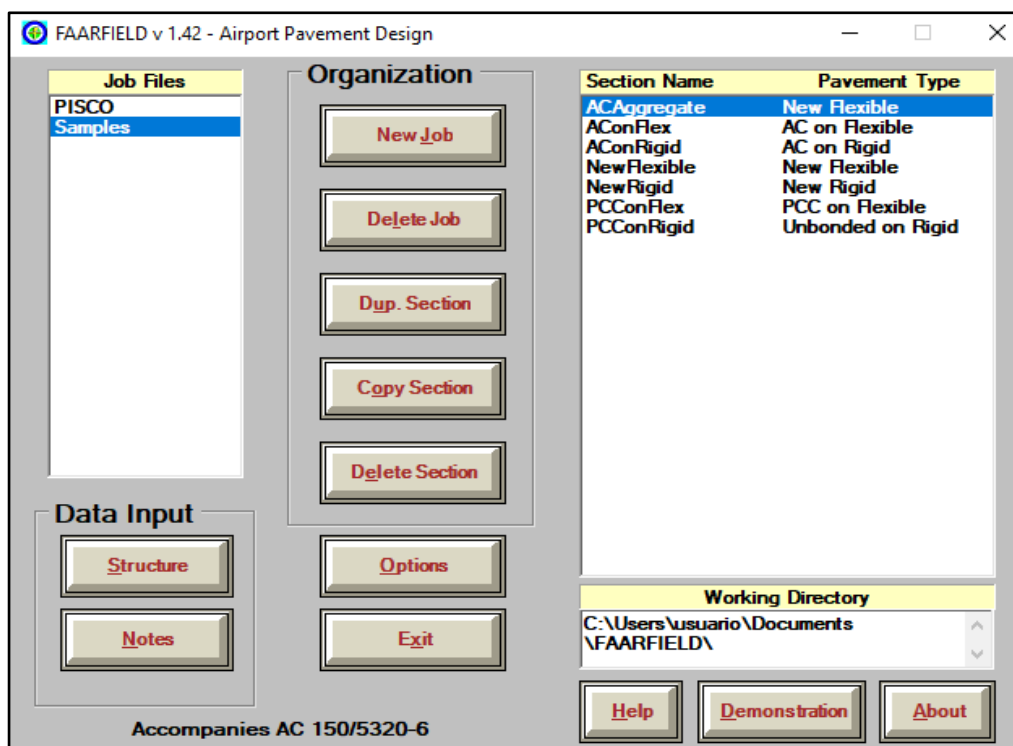


Figura N°11: Ventana de inicio del software FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

En la figura se puede observar los nombres de las secciones y tipos de pavimento los cuales son descritos en la siguiente tabla:

Tabla N°11: Descripción de las secciones.

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

Fuente: Samples of FARRFIELD v1.42. Federal Aviation Administration. Estados Unidos, 2017.

Para el caso de la investigación, se usó la opción ACAggregate. Luego, se seleccionó el tipo de material a emplear según el estudio de suelos.

Selección de materiales:

Para el diseño en el programa se seleccionaron los siguientes materiales:

- Carpeta asfáltica: tipo de material P-401, mezcla asfáltica en caliente (HMA Surface).
- Capa base: se usará P-209; el material a utilizar según el estudio, posee un CBR mayor a 100%. Por lo tanto, no será necesario estabilizar la capa.
- Capa subbase: tipo de material P-154, ya que el material de estudio de canteras es una arena mal graduada con un CBR mayor a 35%. No será necesario estabilizar la capa.

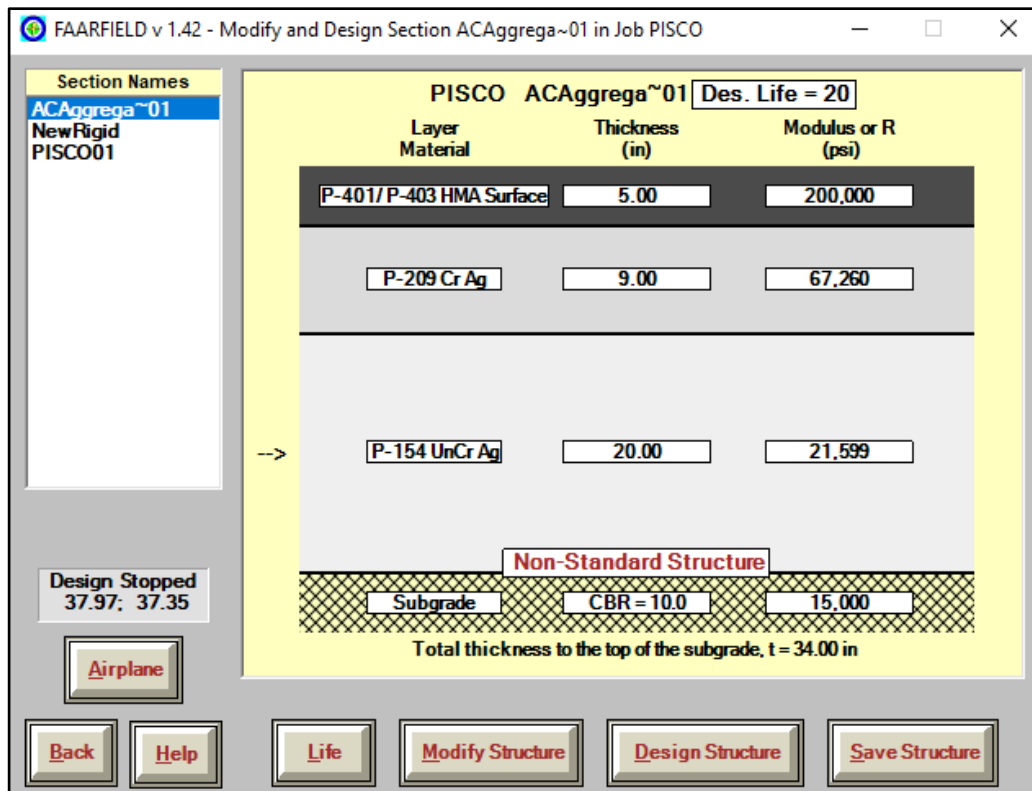


Figura N°12: Sección del pavimento previo – Pavimento de concreto asfáltico - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

En la Figura N°12, se muestran los tipos de materiales ingresados para el diseño de los espesores. De igual manera, ingresamos el tiempo de vida útil que tendrá el pavimento y el valor de CBR de la subrasante (CBR=12%).

El programa ya tiene predeterminado el valor del módulo de capa 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 programa los determina internamente.

Tráfico aéreo en FAARFIELD:

Después de haber definido los materiales para el diseño, la vida útil y el CBR de la subrasante, pasamos a ingresar el tráfico de aeronaves como lo presentamos en la Tabla N°10. Se define el tipo de aeronave con su peso bruto, el cual puede ser modificado de acuerdo a un rango que maneja FAARFIELD, de igual forma para el número de salidas anuales y la razón de crecimiento. De esta manera se tiene el tráfico ingresado como se presenta en la siguiente figura.

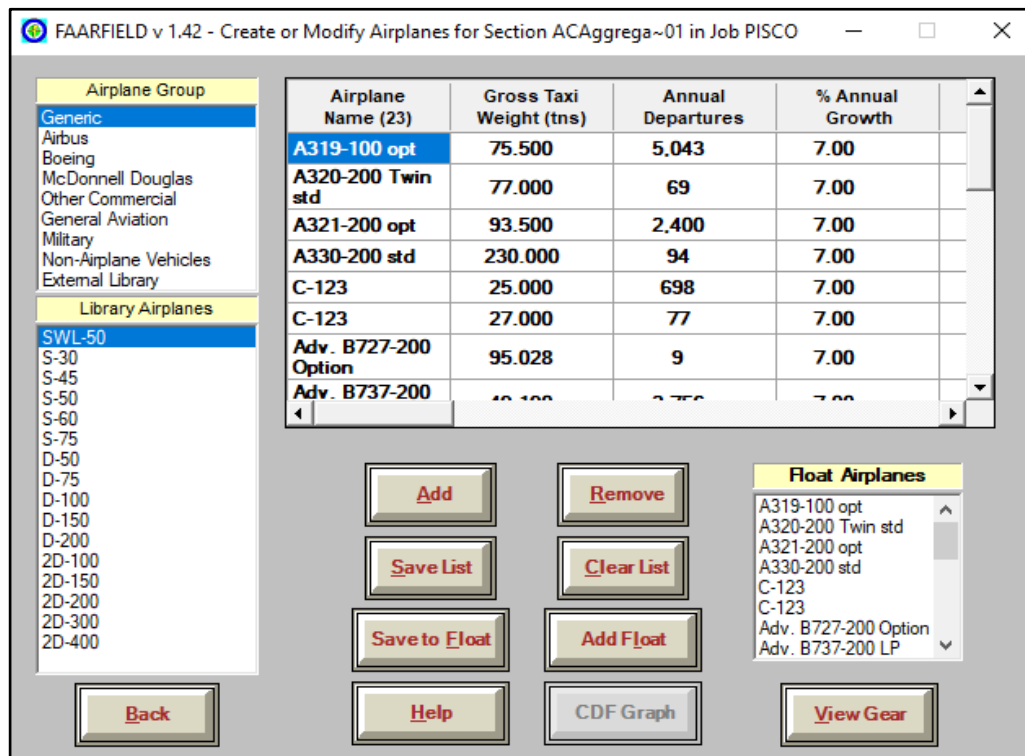


Figura N°13: Tráfico de aeronaves - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura N°13, se ingresaron las aeronaves con su peso bruto respectivo, número de salidas y la razón de crecimiento, la cual se utilizó un valor de 7% para la investigación.

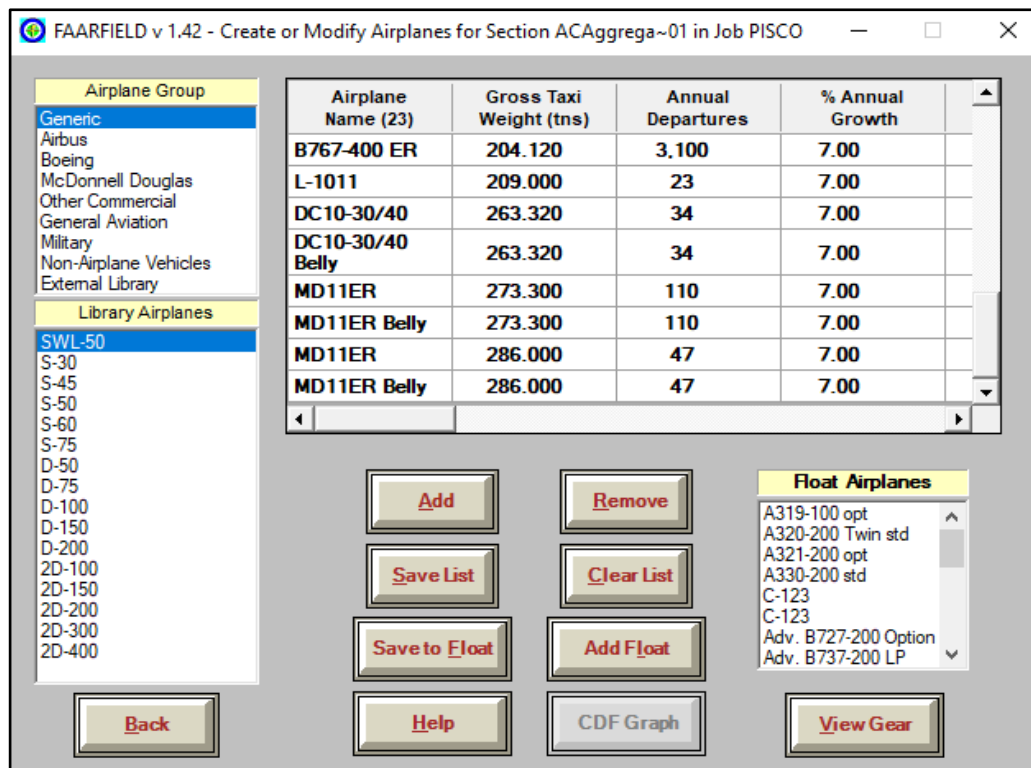


Figura N°14: Tráfico de aeronaves - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

En la definición del tipo de aeronave, aparecen ingresadas dos tipos, como es el caso de MD11ER y MD11ER Belly. Esto se debe a que el software registra el tren de aterrizaje de la aeronave de esta manera, en la primera se registra el tren de cada puntal, y por medio del segundo se registra el del centro. De esta forma es la que se genera un registro de cada aeronave de manera independiente; sin embargo, el peso bruto, el número de salidas y la razón de crecimiento siguen siendo iguales.

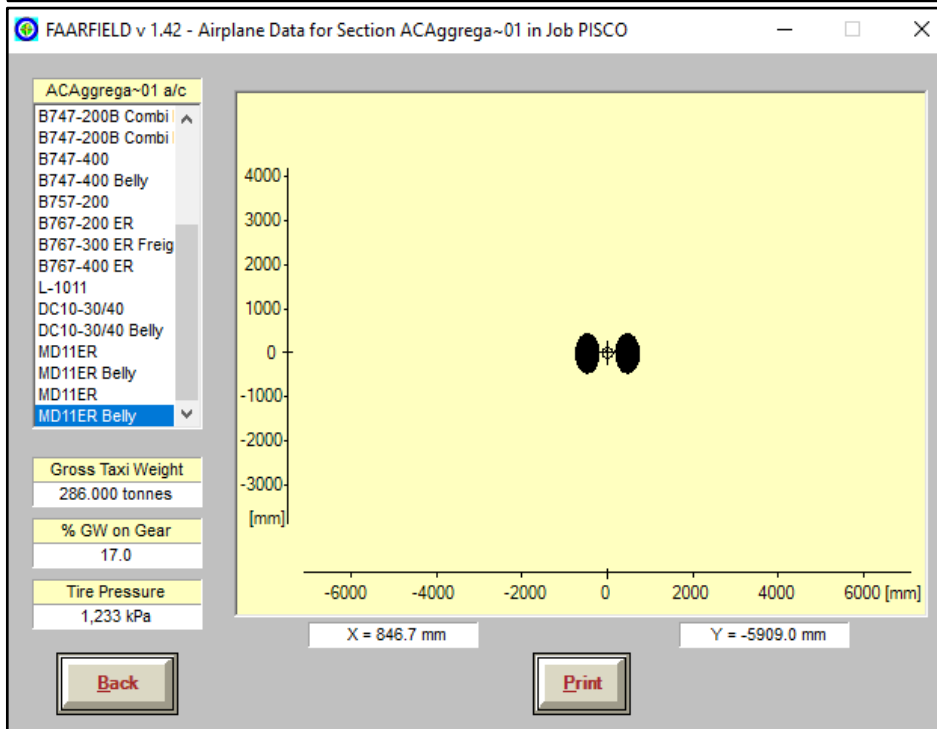
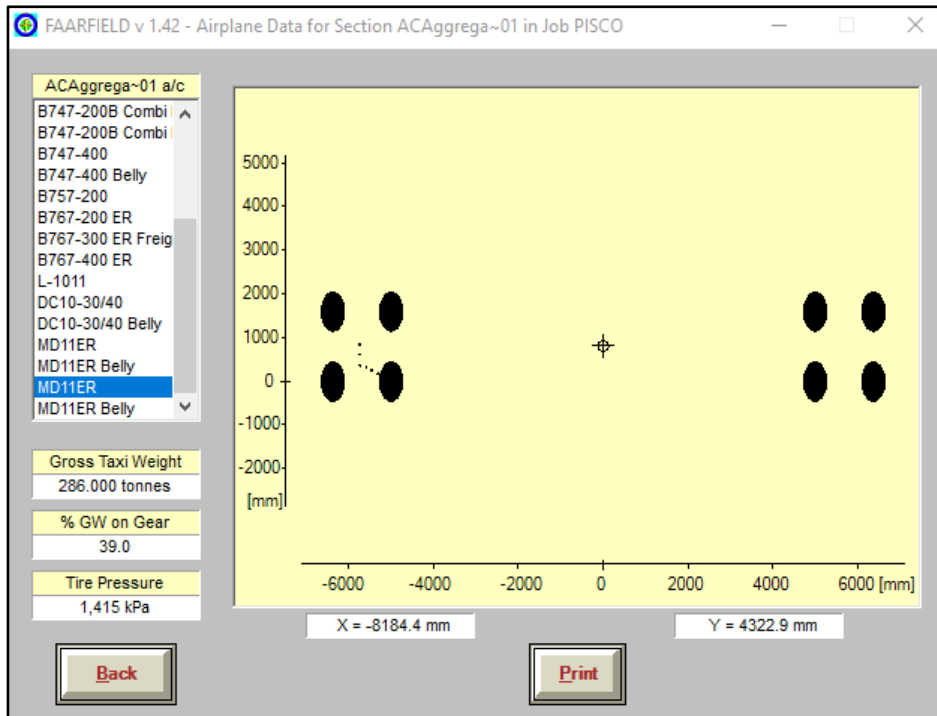


Figura N°15: Ejemplo de tren de aterrizaje de aeronave 2D/D1 - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

Cálculo de espesores del pavimento

Una vez ingresado todo lo mencionado anteriormente, el programa ya puede diseñar los espesores que tendrá la estructura del nuevo pavimento. El programa FAARFIELD, por defecto, ajusta los espesores de acuerdo a la combinación del tráfico. A diferencia del anterior método, no se necesita establecer una aeronave de cálculo, sino que, simplemente al ingresar el tráfico y los materiales ya se puede dar la opción de “Design Structure” para que el programa empiece a modificar y dar los espesores finales para todos los datos ya ingresados.

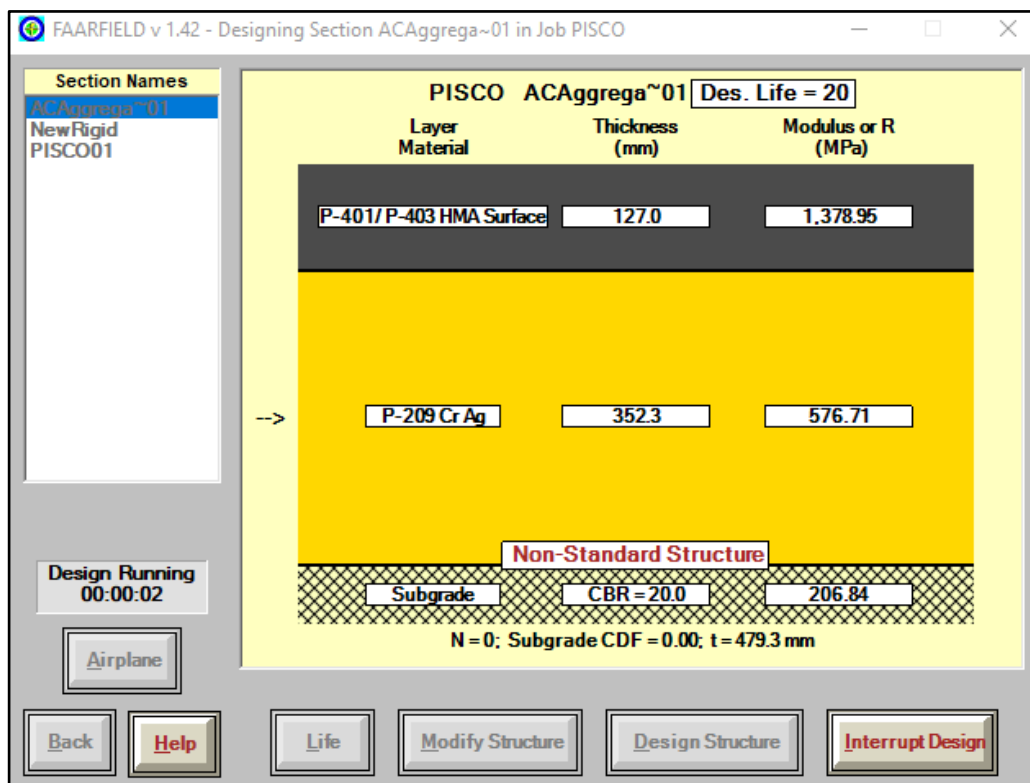


Figura N°16: Design Running de los espesores - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

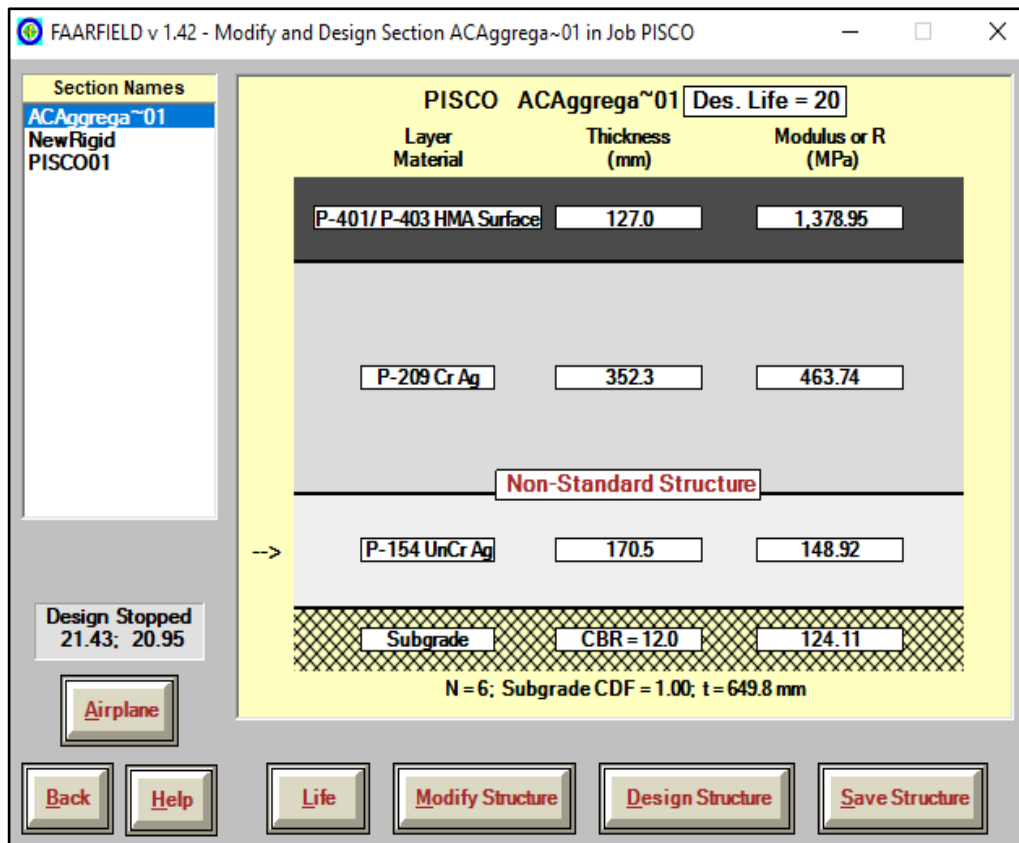


Figura N°17: Espesores de las capas del pavimento de concreto asfáltico - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

La figura N°17 hace referencia a los espesores del nuevo pavimento de concreto asfáltico, como resultado tenemos un valor del factor CDF igual a 1.00, el cual significa que el pavimento ha cumplido toda su vida útil (20 años) para el tráfico de aeronaves que ingresamos al programa. Es decir, que los espesores mostrados son los definitivos de la estructura del pavimento. Estos espesores son considerados como la estructura del pavimento de la zona crítica.

El programa nos muestra un mensaje “Not-Standard Structure” esto se debe a que, al haber ingresado un tráfico aéreo de cargas mayores a 100,000 lbs, es necesario colocar una subbase y base estabilizada; sin embargo, en este caso no será necesario porque el valor de CBR en la subbase es mayor a 35% y en la base mayor a 100%.

A continuación, se muestra el gráfico de aeronaves CDF el cual nos muestra las iteraciones que ha realizado el programa de acuerdo al tipo de aeronave, mostrando así las más representativas para el diseño del pavimento.

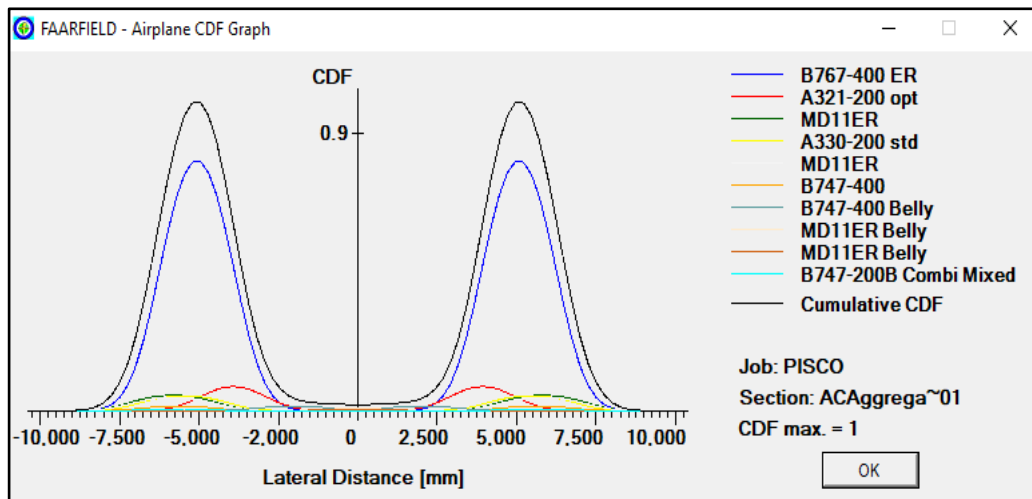


Figura N°18: Gráfico CDF de aeronaves - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

Como se puede observar en el gráfico CDF, la aeronave BOEING B767-400 es la que tiene mayor aporte (0.9). Es el mismo tipo que se identificó en el diseño del método anterior.

Espesor del borde de la pista de aterrizaje:

Al igual que la metodología anterior, la circular permite una sección variable para la pista de aterrizaje. Según la FAA, esta reducción se calcula considerando una tasa de crecimiento anual del tráfico igual a 1%, de esta manera se modifica en el programa para obtener los espesores de borde.

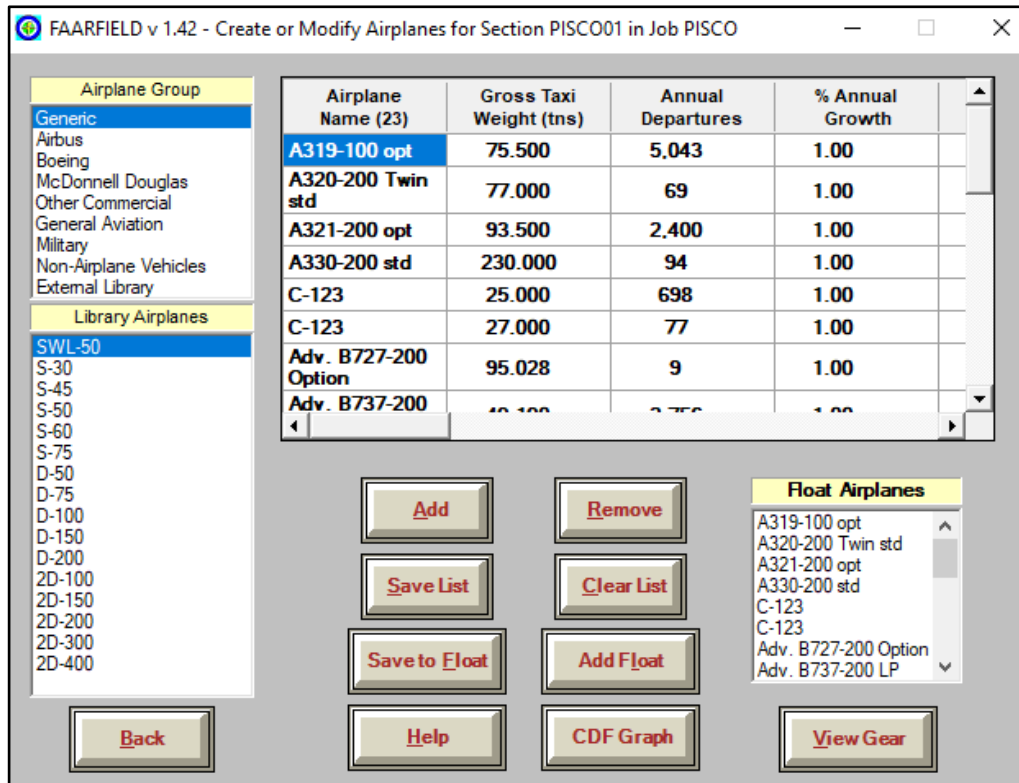


Figura N°19: Tráfico de aeronaves con tasa de crecimiento anual 1% - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

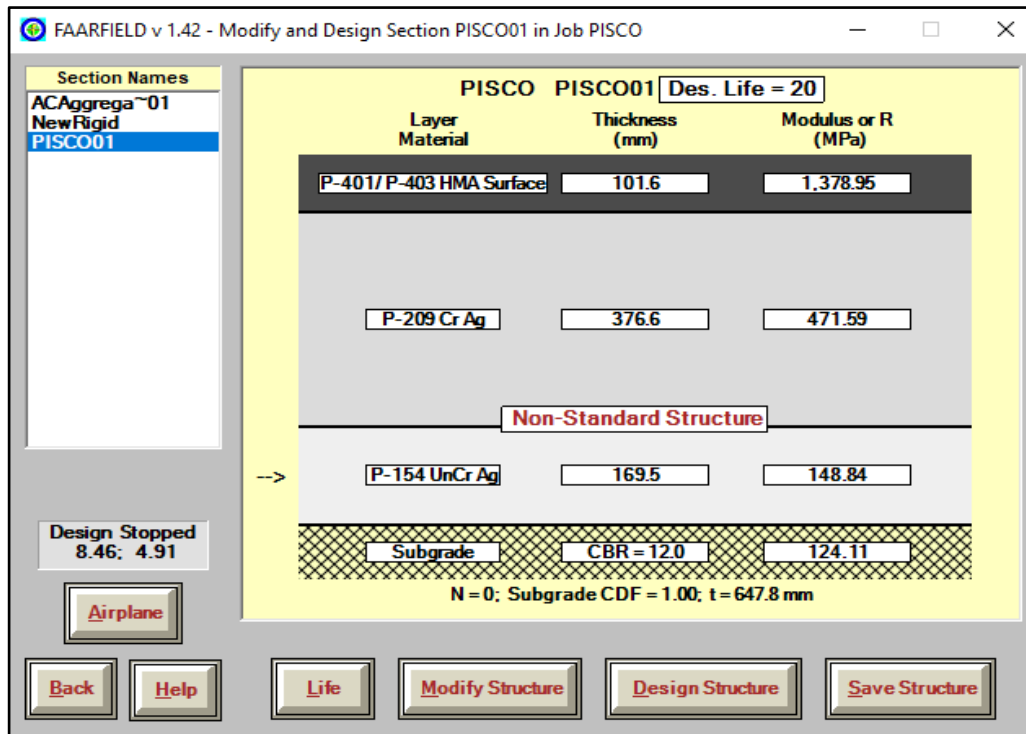


Figura N°20: Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

Como se puede ver en la Figura N°21, la capa subbase se mantiene con el mismo espesor y la capa base aumentó y la carpeta asfáltica se redujo a 10cm.

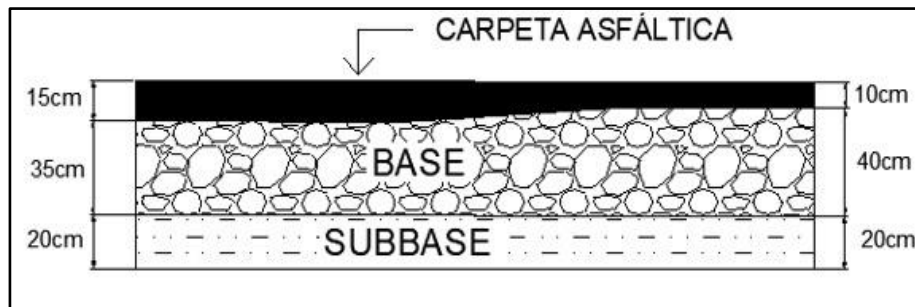


Figura N°21: Espesores de las capas del borde de la pista de aterrizaje - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

Cálculo del espesor del margen:

En la pista existe un margen diseñado para que las aeronaves y vehículos de mantenimiento puedan situarse ocasionalmente, para ello en su diseño se considera un total de 15 pases de la aeronave que presente mayor exigencia del tráfico. Para realizar el diseño se deberá crear un nuevo trabajo en FAARFIELD usando los mismos materiales del diseño anterior. Deberá cumplir con los requisitos mínimos para espesores de las capas del margen.

Tabla 12: Espesor mínimo de las capas del margen – Pavimento Flexible.

Capa	Ítem	Espesor mínimo, pulgadas (mm)
Carpeta Asfáltica	P-401, P-403	4.0 (100)
Base de Agregados	P-209, P-208	6.0 (150)
Subbase	P-154	4.0 (100)

Fuente: FAA AC 150/5320-6F. Airpot Pavement Design and Evaluation. Estados Unidos, 2016.

Después de haber creado la nueva sección en el programa, se debe determinar el tipo de aeronave que genera mayor espesor (independientemente al número de salidas anuales). Por lo que, al ingresar el tráfico se considerará el valor de 1200 de salidas anuales.

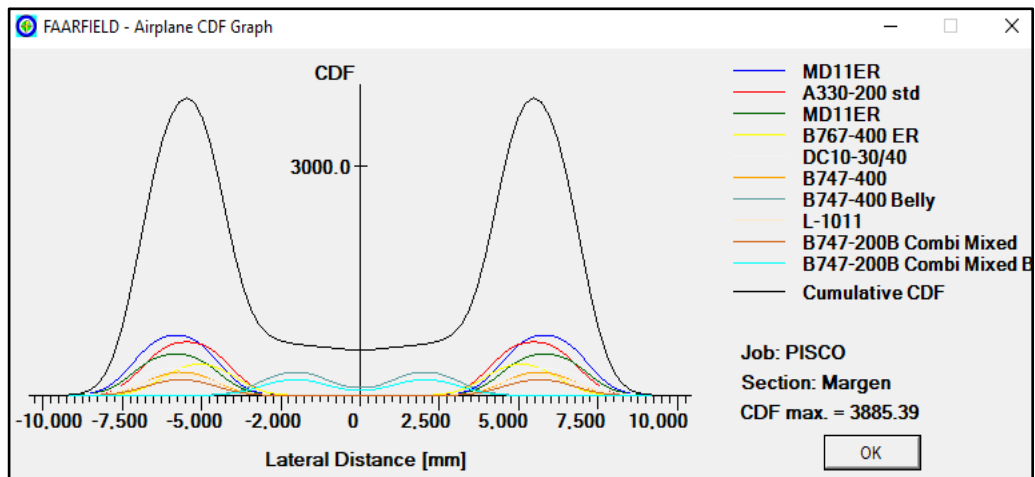


Figura N°22: Aeronaves de mayor demanda de espesor de pavimento - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

Como se muestra en la Figura N°22, las aeronaves que generan mayor CDF son MCDONNELL DOUGLAS MD11, AIRBUS A330-200, MCDONNELL DOUGLAS MD11-F y BOEING B767-400. Estas son las naves que se usarán para el análisis de diseño del margen.

Luego, se eliminará la mezcla de tráfico dejando sólo el avión más exigente para el diseño del espesor del pavimento del margen. Con su peso respectivo, se cambiará las salidas anuales a 1 salida. En la estructura se cambiará el periodo de diseño para 15 años. Lo que se pretende hacer es diseñar el pavimento para 15 salidas totales del avión.

Al evaluar las aeronaves en FAARFIELD se obtuvo que la nave que genera mayor espesor para el pavimento del margen es la MCDONNELL DOUGLAS MD11-F. Los espesores de diseño se presentan a continuación en la siguiente figura:

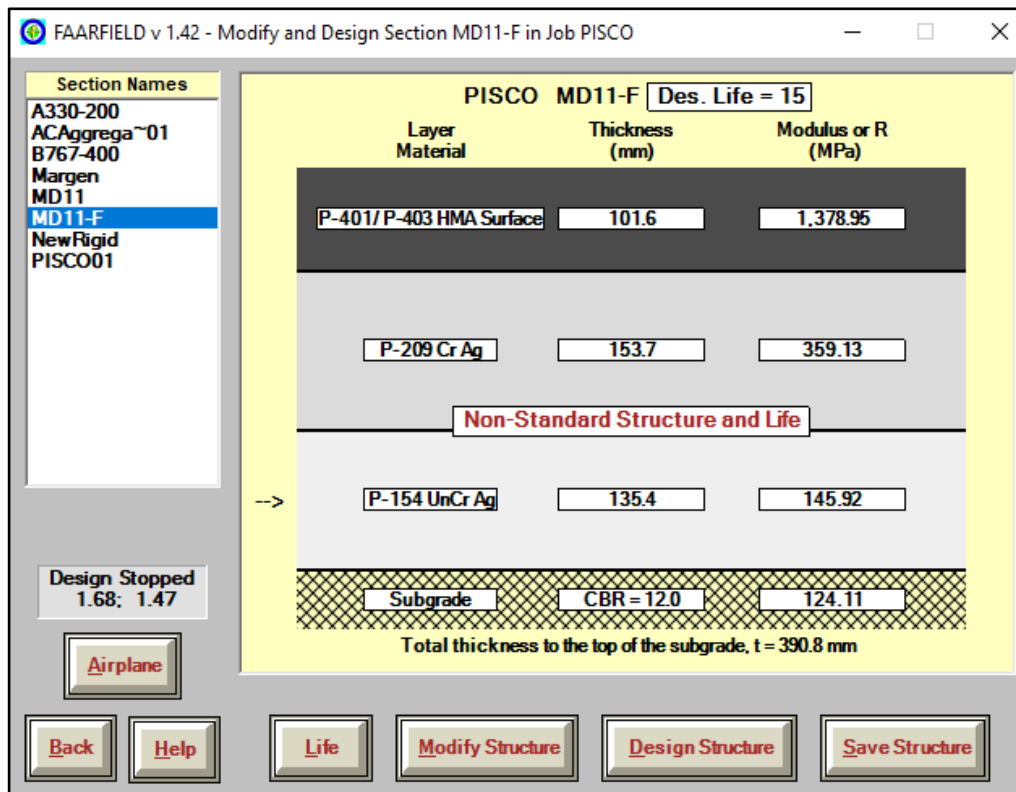


Figura N°23: Espesores de las capas del margen del pavimento de concreto asfáltico - FAARFIELD v 1.42

Fuente: Propia

5.2.2 Diseño de pavimento de concreto hidráulico

5.2.2.1 Metodología AC 150/5320-6D:

Para el diseño de este pavimento, se tendrá que establecer diferentes espesores en la capa subbase, de manera que se pueda comprar el espesor necesario para el concreto, y analizar que estructura será la más adecuada.

Los ábacos para el diseño de este pavimento se basan en la hipótesis de carga de bordes de junta, en la cual la carga es tangente a la junta. Es decir, que dependerán del tren de aterrizaje de las aeronaves.

Según la OACI:

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 con relación al borde de la junta producirá la tensión máxima.

Para el diseño se debe tener los valores de entrada de la resistencia del concreto a la flexión, módulo del terreno de fundación, peso bruto de la aeronave de diseño y salidas anuales equivalentes.

En la investigación, se utilizó una resistencia del concreto a la flexión de 50 kg/cm² (711.2 psi), lo cual es aceptable. Según la FAA, “Una resistencia a la flexión de diseño entre 600 y 750 psi (4, 14 a 5, 17 MPa) es recomendada para la mayoría de los diseños de pavimentos de aeródromos”.

Según la OACI, las condiciones en las que no es necesario colocar una capa de cimentación se representan en la siguiente tabla:

Tabla N°13: Condiciones en que no se requiere una capa de cimentación.

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			

Fuente: OACI. Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III. Canadá, 1983.

Según el suelo de la subrasante, formado por arcilla de mediana plasticidad (CL), no cumple con los requisitos presentados en la tabla. Por lo tanto, se necesita capa de cimentación.

Para el cálculo del valor K se da por la fórmula presentada a continuación, donde, para nuestro caso el CBR es 12%. Obteniendo un valor de K igual a 162.9 pci

$$K = \left[\frac{1500 \times CBR}{26} \right]^{0.7788}$$

Cómo ya se hizo mención en la sección anterior, la capa subbase no necesita ser estabilizada. De igual manera, se consideró el uso del material designado para la capa base (P-209). Se usará el primer cuadro de la Figura N°24

(agregado árido machacado homogéneo). Haciendo uso de dicho material, logrará que el espesor de la losa de concreto sea menor, ya que la resistencia del material mencionado es mayor al P_154.

Para analizar las el diseño más económico que cumpla con las solicitaciones, los espesores de la capa subbase son 8, 10 y 12 pulg.

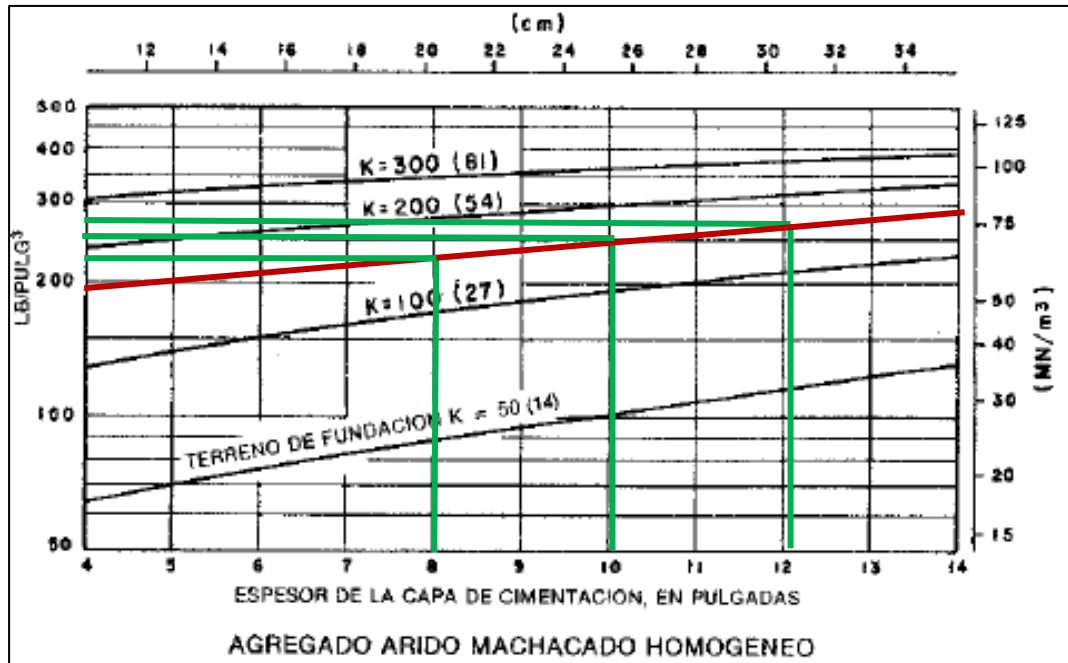


Figura N°24: Determinación de k .

Fuente de gráfico: OACI, Manual de Diseño de Aeródromos – Parte III.

Diseño para un espesor de subbase igual a 8”:

De la Figura N°24, con los datos de entrada de espesor de subbase de 8”, módulo de reacción de la subrasante igual a 162.9 pci. Obteniendo como resultado el valor de $k = 234$ pci

- Aeronave de cálculo:

Se determina el espesor requerido para cada tipo de aeronave, tal cual se realizó para el pavimento de concreto asfáltico.

Tabla N°14: Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 8”.

AERONAVE	SALIDAS	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	5043	75500.00	166449.01	10337.01	DUAL	14.9
AIRBUS A320-233	69	77000.00	169755.94	141.43	DUAL	12.9
AIRBUS A321-231	2400	93500.00	206132.21	4919.46	DUAL	16.1
AIRBUS A330-200	94	230000.00	507063.20	192.68	DUAL TANDEM	16.3
ANTONOV AN-26-100	698	25000.00	55115.57	1430.74	DUAL	7.1
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27000.00	59524.81	157.83	DUAL	7.2
BOEING B727-200	9	95028.00	209500.88	18.45	DUAL	14.2
BOEING B737-200	2756	49190.00	108445.39	5649.18	DUAL	11.6
BOEING B747-200	300	378000.00	833347.35	614.93	WIDE BODY	13
BOEING B747-400	165	397000.00	875235.18	338.21	WIDE BODY	14
BOEING B757-200	517	115680.00	255030.74	1059.73	DUAL TANDEM	11.7
BOEING B767-200ER	68	179170.00	395002.23	139.38	DUAL TANDEM	16.2
BOEING B767-300F	40	186880.00	411999.88	81.99	DUAL TANDEM	17
BOEING B767-400	3100	204120.00	450007.57	6354.3	DUAL TANDEM	19
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209000.00	460766.13	47.14	DUAL TANDEM	12.9
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263320.00	580521.23	69.69	WIDE BODY	13.9
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273300.00	602523.36	225.48	WIDE BODY	14
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286000.00	630522.07	96.34	WIDE BODY	14.5

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.58)

En la Tabla N°14, se puede observar que el mayor espesor requerido es por la aeronave B767-400, la cual también se usó para el pavimento de concreto asfáltico.

- Determinación del espesor de la losa de concreto:

Haciendo uso del ábaco correspondiente a la aeronave B767 (Figura N°9 Anexo 2), se calcula el espesor de la losa con los siguientes datos:

- 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 consideró como dirección crítica el ángulo agudo a la losa por lo que, para el tipo de tren de aterrizaje (dual tándem), esta sea la dirección con mayor tensión. Sea en el caso de un tren simple y dual, la mayor tensión la produce cuando la dirección es perpendicular o paralelo.

Por lo tanto, se obtuvo el espesor de la losa de concreto igual a 20''

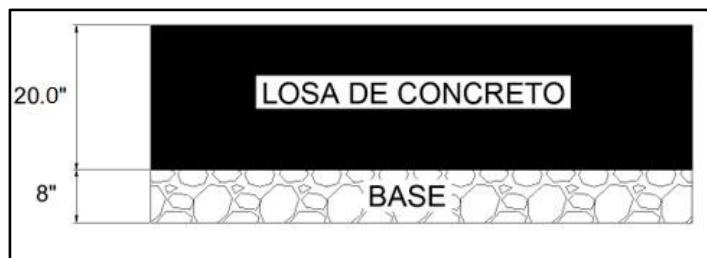


Figura N°25: Sección Área Crítica para 8'' de base.

Fuente: Propia

Diseño para un espesor de subbase igual a 10''

Del mismo modo, se hará para este caso. De la figura N°24. Se obtiene un valor de k igual a 250 pci.

- Aeronave de cálculo:

Siguiendo el mismo procedimiento, se presentará la tabla con los espesores generados por cada tipo de aeronave:

Tabla N°15: Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 10”.

AERONAVE	SALIDAS	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	5043	75500.00	166449.01	10337.01	DUAL	14.6
AIRBUS A320-233	69	77000.00	169755.94	141.43	DUAL	12.8
AIRBUS A321-231	2400	93500.00	206132.21	4919.46	DUAL	15.8
AIRBUS A330-200	94	230000.00	507063.20	192.68	DUAL TANDEM	16.2
ANTONOV AN-26-100	698	25000.00	55115.57	1430.74	DUAL	6.9
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27000.00	59524.81	157.83	DUAL	7
BOEING B727-200	9	95028.00	209500.88	18.45	DUAL	13.6
BOEING B737-200	2756	49190.00	108445.39	5649.18	DUAL	11.2
BOEING B747-200	300	378000.00	833347.35	614.93	WIDE BODY	12.9
BOEING B747-400	165	397000.00	875235.18	338.21	WIDE BODY	13.9
BOEING B757-200	517	115680.00	255030.74	1059.73	DUAL TANDEM	11.5
BOEING B767-200ER	68	179170.00	395002.23	139.38	DUAL TANDEM	16
BOEING B767-300F	40	186880.00	411999.88	81.99	DUAL TANDEM	16.9
BOEING B767-400	3100	204120.00	450007.57	6354.3	DUAL TANDEM	18.8
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209000.00	460766.13	47.14	DUAL TANDEM	12.6
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263320.00	580521.23	69.69	WIDE BODY	13.7
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273300.00	602523.36	225.48	WIDE BODY	13.8
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286000.00	630522.07	96.34	WIDE BODY	14.3

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.60).

Se obtuvo que la aeronave tipo B767-400 es la que genera mayor espesor, tal como en los casos anteriores.

Determinación del espesor de la losa de concreto:

Haciendo uso del ábaco para la aeronave B767, se calcula el espesor de la losa, teniendo los siguientes datos:

- Aeronave de diseño: B767-400

- Tren de aterrizaje: Dual Tándem
- Dirección crítica: Ángulo agudo a la junta
- Peso bruto de aeronave de diseño: 450,007.57 lb
- 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)

Por lo tanto, se obtiene un espesor de losa de concreto de 19.7”.

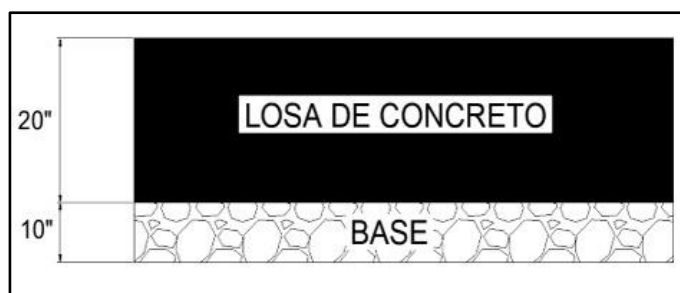


Figura N°26: Sección Área Crítica para 10” de base.

Fuente: Propia

Diseño para un espesor de subbase igual a 12”

Se hace el mismo procedimiento para el valor de subbase igual a 12”. Se obtuvo un valor de $k = 271$ pci

Determinación de la aeronave de cálculo:

A continuación, se presenta la tabla de los espesores generados por los tipos de aeronaves para este caso:

Tabla N°16: Cálculo de aeronave de diseño – Espesor de subbase igual a 12”.

AERONAVE	SALIDAS	PESO DE DESPEGUE (Kg)	PESO DE DESPEGUE (lb)	TRÁFICO PROMEDIO ANUAL	TREN DE ATERRIZAJE PRINCIPAL	ESPESOR (pulg)
AIRBUS A319-132	5043	75500.00	166449.01	10337.01	DUAL	14.4
AIRBUS A320-233	69	77000.00	169755.94	141.43	DUAL	12.7
AIRBUS A321-231	2400	93500.00	206132.21	4919.46	DUAL	15.6
AIRBUS A330-200	94	230000.00	507063.20	192.68	DUAL TANDEM	16
ANTONOV AN-26-100	698	25000.00	55115.57	1430.74	DUAL	6.8
ANTONOV AN-32B (AN-32)	77	27000.00	59524.81	157.83	DUAL	7
BOEING B727-200	9	95028.00	209500.88	18.45	DUAL	13.4
BOEING B737-200	2756	49190.00	108445.39	5649.18	DUAL	11.1
BOEING B747-200	300	378000.00	833347.35	614.93	WIDE BODY	12.8
BOEING B747-400	165	397000.00	875235.18	338.21	WIDE BODY	13.8
BOEING B757-200	517	115680.00	255030.74	1059.73	DUAL TANDEM	11.4
BOEING B767-200ER	68	179170.00	395002.23	139.38	DUAL TANDEM	15.8
BOEING B767-300F	40	186880.00	411999.88	81.99	DUAL TANDEM	16.7
BOEING B767-400	3100	204120.00	450007.57	6354.3	DUAL TANDEM	18.6
LOCKHEED HERCULES L-1011-200	23	209000.00	460766.13	47.14	DUAL TANDEM	12.5
MCDONNELL DOUGLAS DC-10-30F	34	263320.00	580521.23	69.69	WIDE BODY	13.5
MCDONNELL DOUGLAS MD11	110	273300.00	602523.36	225.48	WIDE BODY	13.6
MCDONNELL DOUGLAS MD11-F	47	286000.00	630522.07	96.34	WIDE BODY	14.1

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.62).

Determinación del espesor de la losa:

Haciendo uso del ábaco para el diseño con la aeronave de cálculo (B767-400) y teniendo en cuenta los datos:

- Aeronave de cálculo: B767-400
- Tren de aterrizaje: Dual Tándem
- 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

Se obtiene el espesor de la losa de concreto igual a 19.6”

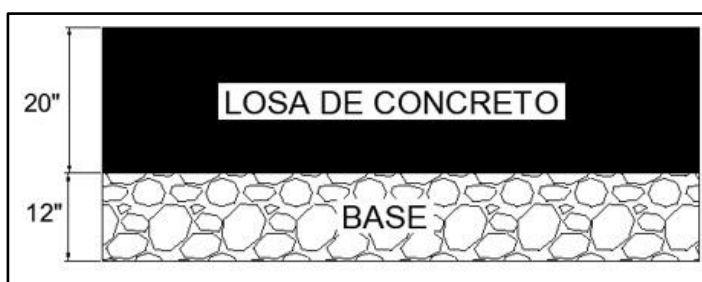


Figura N°27: Sección Área Crítica para 12” de base.

Fuente: Propia

Análisis económico de las secciones calculadas

Según la investigación, se consideró 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.

- 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.

Tabla N°17: Comparación económica de alternativas propuestas.

	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/251.17	S/233.11	S/236.61

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.63).

Se determinó la alternativa 2 como la más económica.

Diseño de la sección

Del mismo modo que se hizo para el pavimento de concreto asfáltico, se debe determinar la sección requerida. Se utilizará la sección para pista de aterrizaje, calles de rodaje y plataforma.

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

Espesor del borde de la pista de aterrizaje:

De la misma manera del pavimento de concreto asfáltico, en el diseño del pavimento de concreto hidráulico se puede hacer la reducción de la capa de la superficie, para ellos 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 14". La losa de concreto será la diferencia entre el espesor total del pavimento y los espesores obtenidos; es decir, $30 - 14 = 16$ "

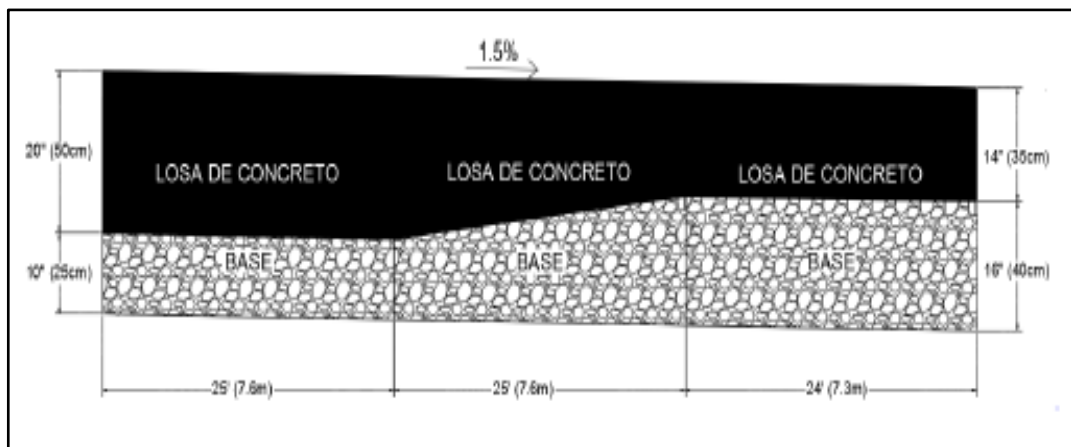


Figura 27: Sección pavimento de concreto hidráulico.

Fuente: Propia

Diseño de juntas

- Tipo de juntas:

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

- Juntas de expansión: se utilizará las juntas tipo A.
- Juntas de construcción: se utilizará juntas de construcción tipo F (Dowel) y H (dummy) donde corresponda.
- Juntas de construcción: se utilizará juntas de construcción tipo D (Dowel).
- Espaciamiento de juntas:

Dado que, la base no es estabilizada, se deberá aplica las “Dimensiones y espaciamiento de juntas para bases no estabilizadas” de la Norma AC 150/5320-6F (2016, p.58). Se especifica el espaciamiento máximo de juntas para pavimento de concreto hidráulico. 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 empleará dowels en las juntas para proporcionar transferencia de carga y para prevenir el desplazamiento vertical relativo. El tamaño, longitud y espaciado de los mismo Eben ser tal 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)

5.2.2.2 Metodología AC 150/5320-6F

Para el diseño del pavimento de concreto hidráulico en FAARFIELD, creamos una sección NewRigid, descrita en la Tabla N°11. Para el desarrollo se eliminará la base estabilizada de la estructura del pavimento predeterminada según el software, debido a que se usará una capa granular en su lugar.

Las características de los materiales ingresados en el programa son los siguientes:

- Losa de concreto: P-501 PCC Surface para el programa.
- Base: Se hará uso de base granular P-209.

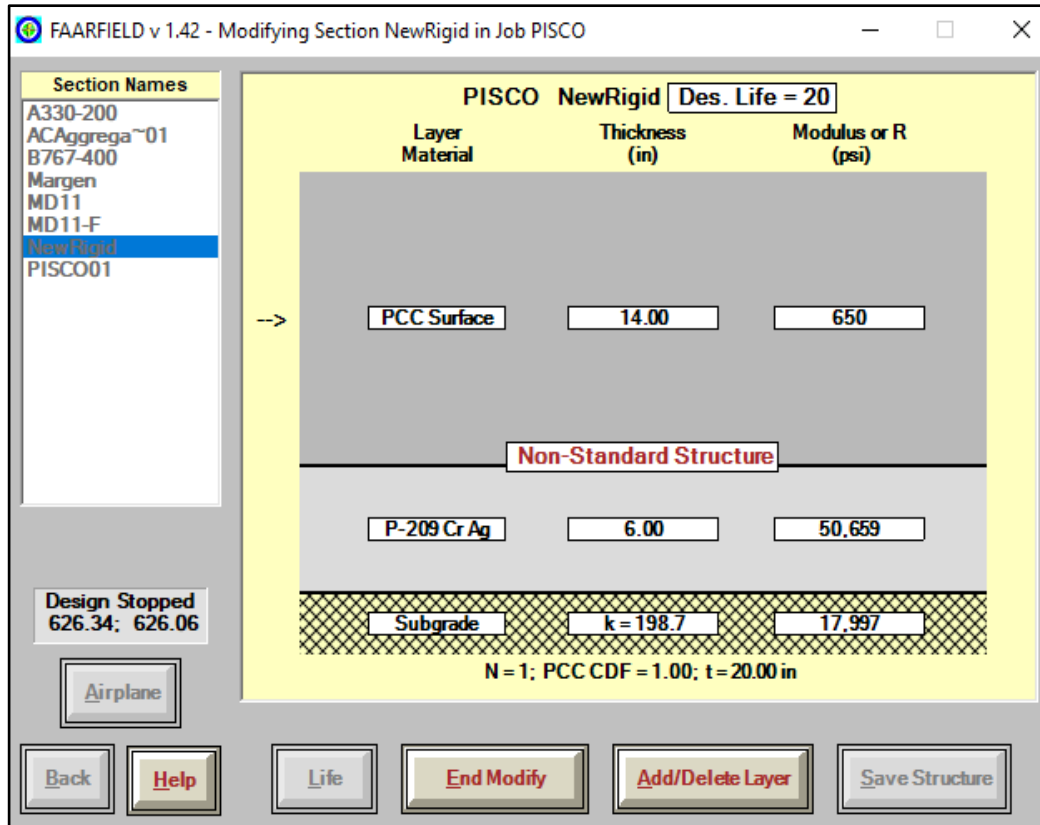


Figura N°28: Sección del pavimento de concreto hidráulico.

Fuente: Propia

Se realizará el mismo procedimiento como el del pavimento de concreto asfáltico, pero para este caso se ingresará el valor de k de la subrasante. Para la cual se está definida de la siguiente manera:

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

Como se mencionó en el estudio de la subrasante, posee un CBR de 12%, dando como resultado de valor k igual a 197.7 pci. Se sabe que, la resistencia del concreto a la flexión para este diseño es 50 kg/cm² (711.2 psi).

Después de haber ingresado los tipos de materiales a usar, ingresaremos el tráfico de aeronaves. Se ingresará el mismo tráfico que se usó para el anterior diseño en el programa como lo muestra en la Figura N°28.

Para el cálculo del espesor del pavimento, se seguirá el mismo procedimiento realizado en la metodología AC 150/5320-6D. Es decir, se hará tres diseños en el software utilizando los tres espesores de base de 8”, 10” y 12”.

“FAARFIELD, utiliza la tensión horizontal máxima en la parte inferior de la losa PCC como el indicador de la vida estructural del pavimento o criterio de falla”. Por lo tanto, el programa analizará la capa del espesor de la losa hasta que resulte un factor CDF igual 1, que significa que tal espesor dado por el resultado es el ideal para la vida útil que hemos ingresado.

Cálculo del espesor de la losa para una base de 8”

Como ya lo mencionamos, se colocará el valor de 8” como espesor de la base del pavimento y, con el tráfico de aeronaves ya ingresado, le damos “Design Structure” para que nos resulte el espesor de la losa PCC, como se muestra en la siguiente figura:

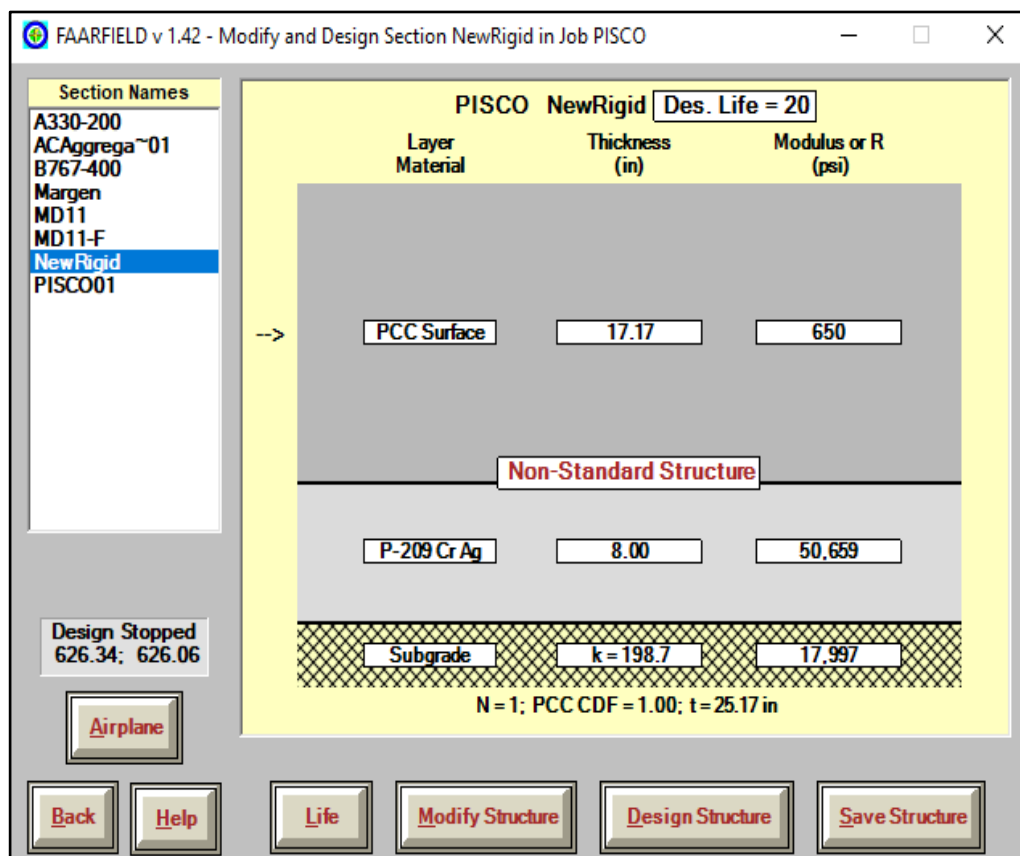


Figura N°29: Espesor de losa de concreto con base de 8” – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura N°29, el programa nos da como resultado un espesor de losa PCC de 17.17” para un espesor de base de 8”. En la estructura del pavimento se puede ver el mensaje “Non-Standard Structure” esto se debe a que, el tráfico de aeronaves posee cargas mayores a 100,000 lbs. Lo que nos indica que se debe colocar una base estabilizada; sin embargo, contamos con un valor de CBR mayor a 100% en la capa base por lo que no sería necesario estabilizarla.

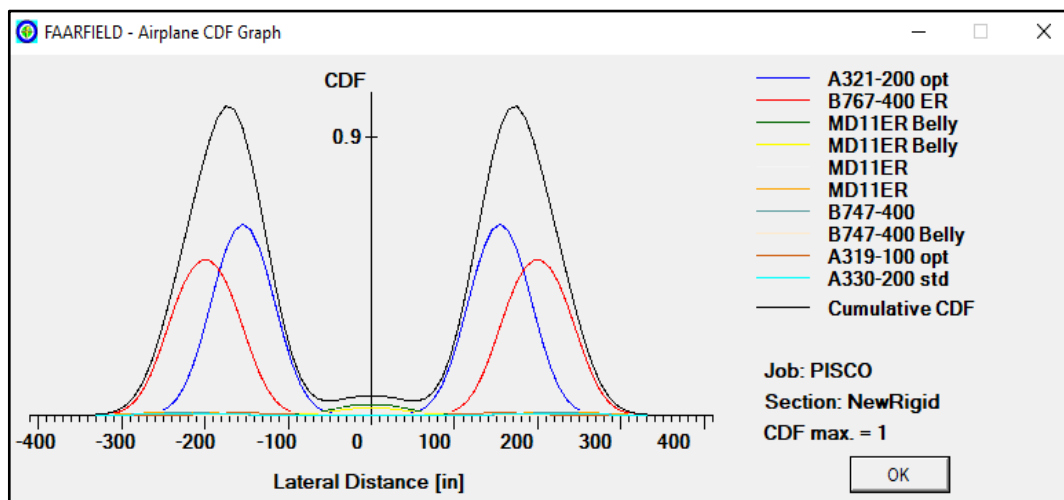


Figura N°30: Gráfica CDF de las aeronaves con base de 8” – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

Como lo muestra la gráfica CDF, para este caso la aeronave que genera mayor exigencia al pavimento es la AIRBUS A321-231.

Cálculo del espesor de la losa para una base de 10”

Hacemos el mismo procedimiento para el diseño de la losa de concreto, pero considerando una base de 10” de espesor y considerando el mismo tráfico aéreo ingresado. Obteniendo el resultado de la siguiente figura:

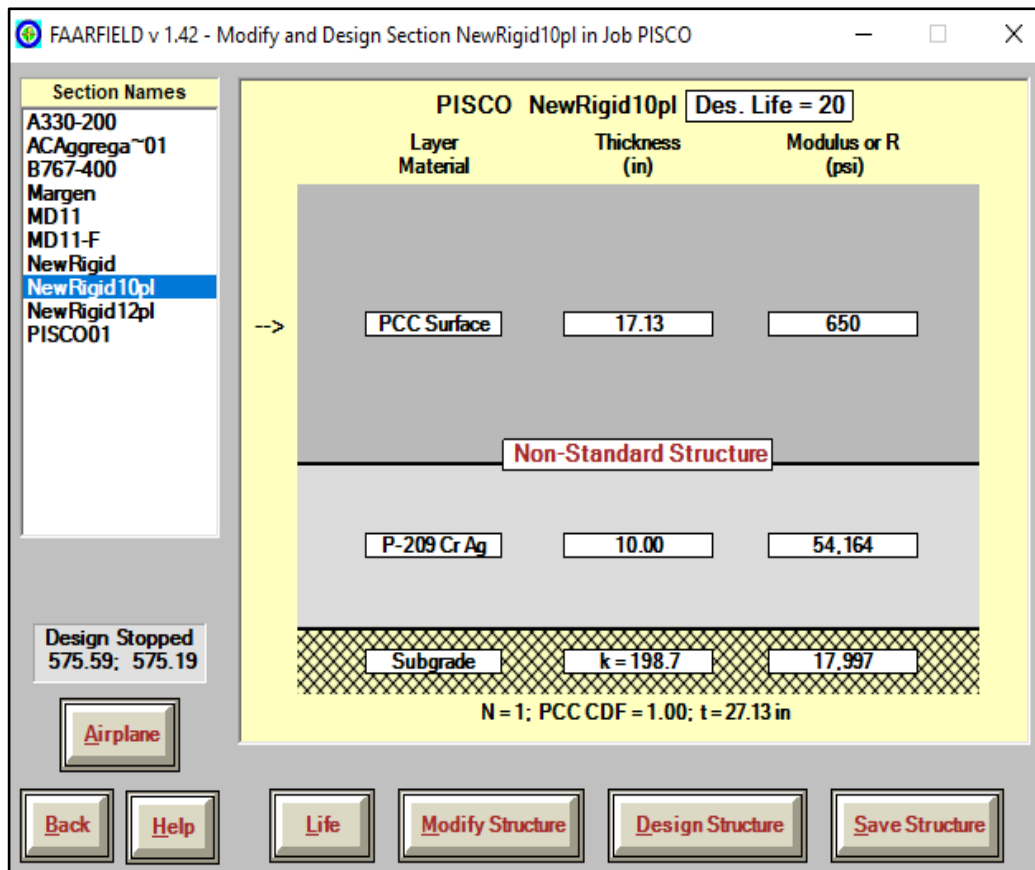


Figura N°31: Espesor de losa de concreto con base de 10" – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

Como resultado, tenemos un espesor de losa PCC menor al del anterior diseño (base de 8" de espesor).

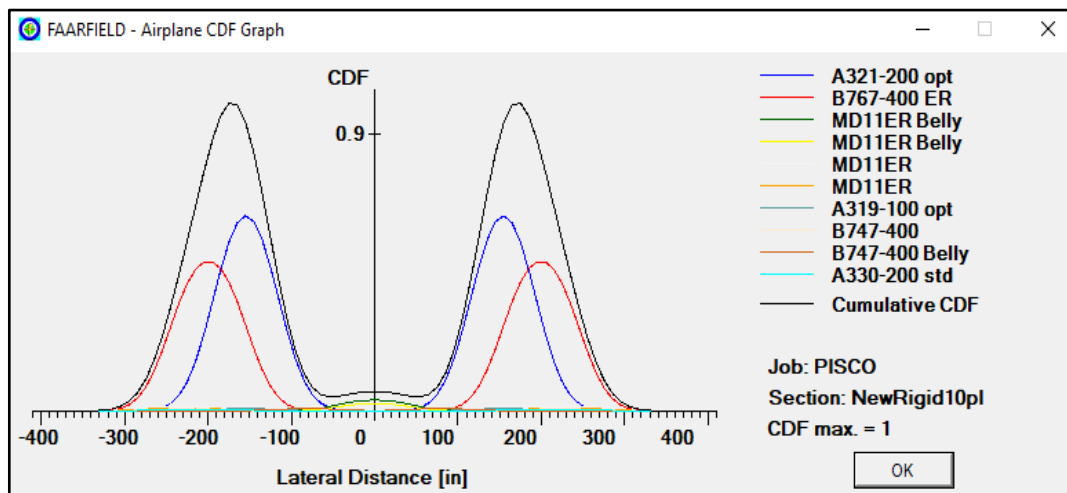


Figura 32: Gráfica CDF de las aeronaves con base de 10" – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

De igual manera, se observa que la aeronave AIRBUS A321-231. Se mantiene como la aeronave más exigente para el pavimento.

Cálculo del espesor de la losa para una base de 12”

Finalmente, hacemos el mismo procedimiento para una base de espesor de 12”, obteniendo un espesor de losa como se muestra a continuación:

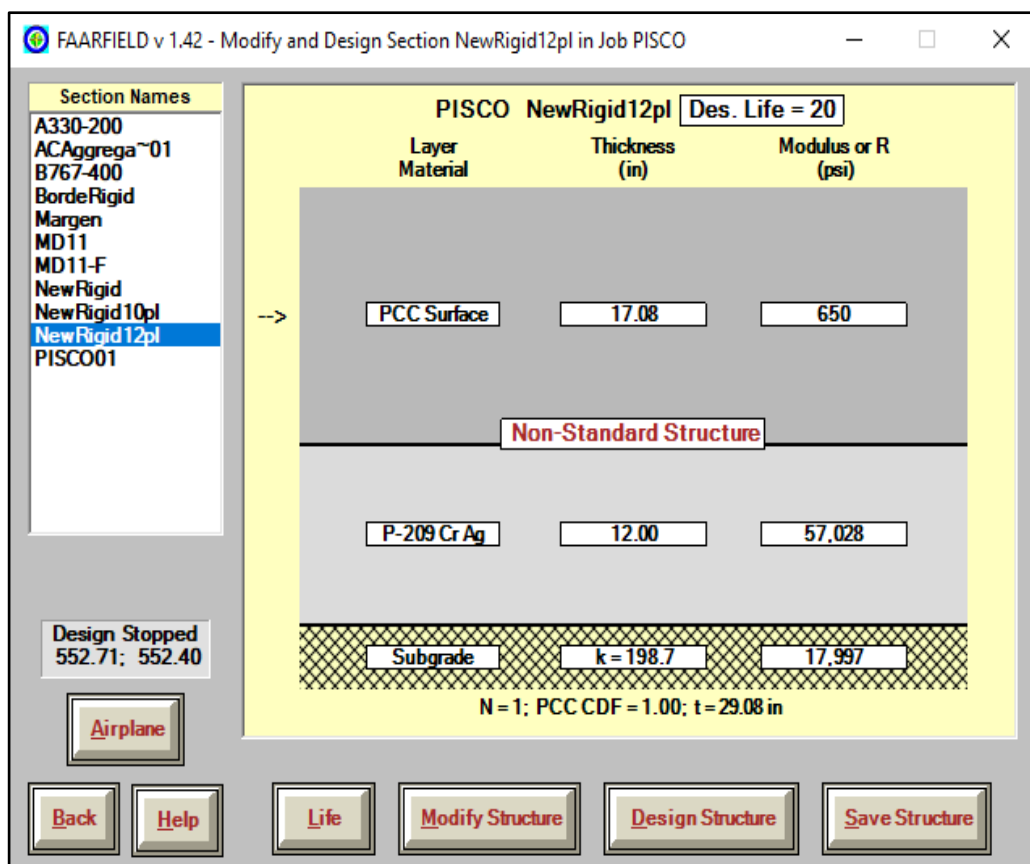


Figura N°33: Espesor de losa de concreto con base de 12” – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

Como resultado, se tiene una losa menor a los diseños anteriores debido al nuevo espesor aumentado en la base.

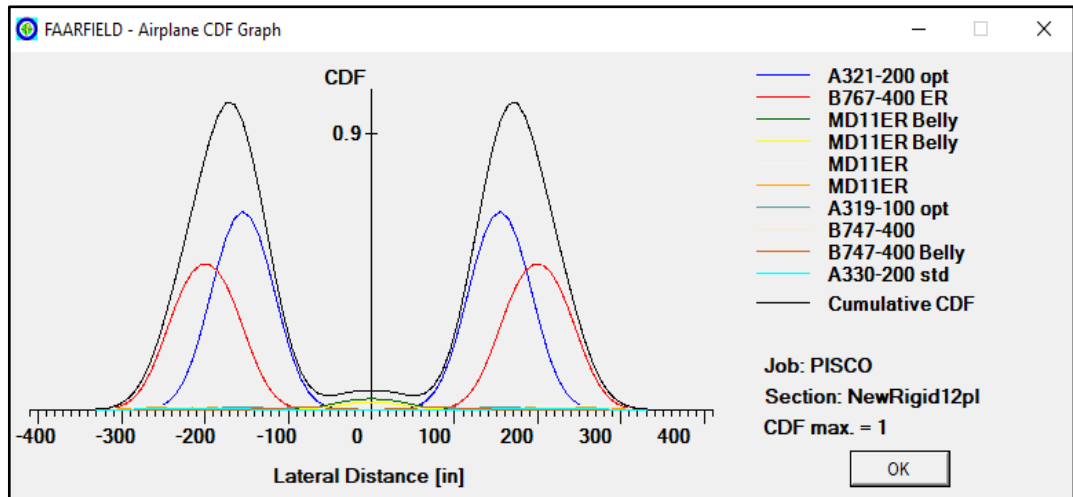


Figura N°34: Gráfica CDF de las aeronaves con base de 12” – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

La aeronave AIRBUS A321-231, se mantiene como la de mayor factor resultante CDF.

Análisis de las alternativas de diseño calculadas:

Para la investigación se consideró 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.

Haciendo la comparación económica de alternativas se tiene la siguiente tabla:

Tabla N°18: Comparación económica de alternativas propuestas. °

	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

Fuente: “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla A. Roel Rondo (2018, p.83).

Espesor de borde de la pista de aterrizaje

Para el cálculo de la estructura de borde de la pista de aterrizaje, de igual manera que la metodología anterior, habrá una reducción de los espesores. En el programa se modificará la tasa de crecimiento anual del tráfico igual a 1%. Cabe mencionar que, para considerar una sección variable, se debe tener como mínimo una reducción en la losa de 0.5(16”); y se debe compensar el espesor del pavimento aumentando el espesor de la base.

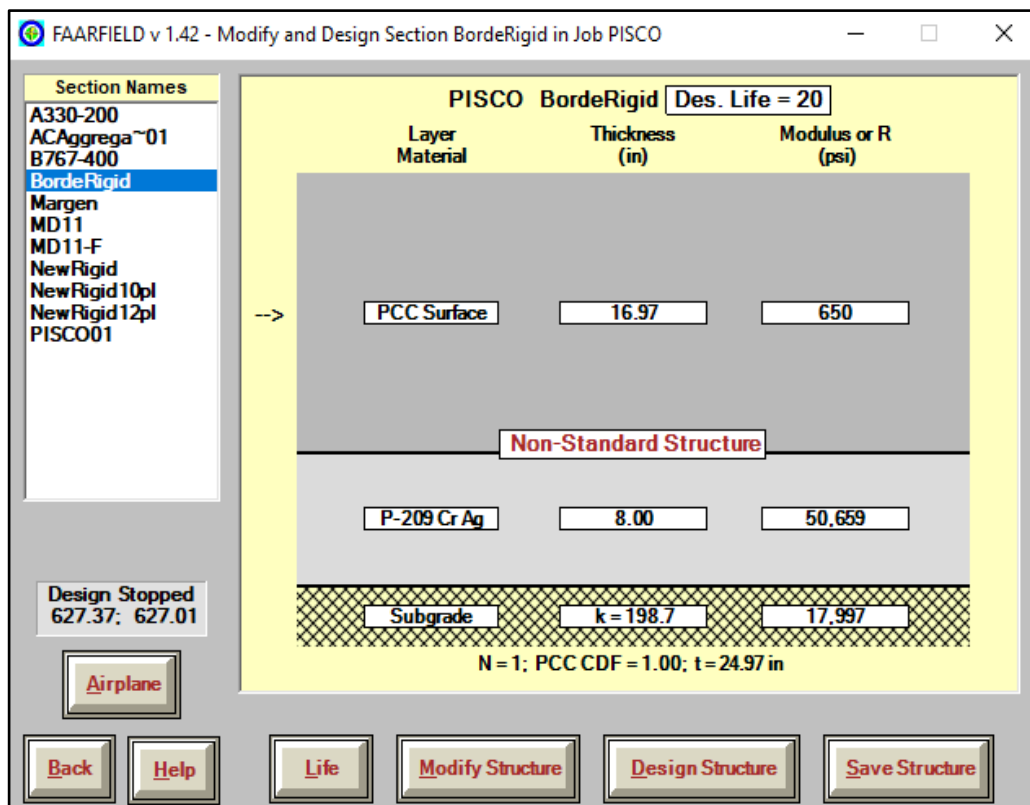


Figura N°35: Espesor del margen de la pista de aterrizaje con base de 8” – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

Se observa que, el espesor del pavimento ha disminuido en 0.2". Lo cual nos indica que el pavimento de borde puede mantener el mismo espesor en todo el ancho de la pista de aterrizaje.

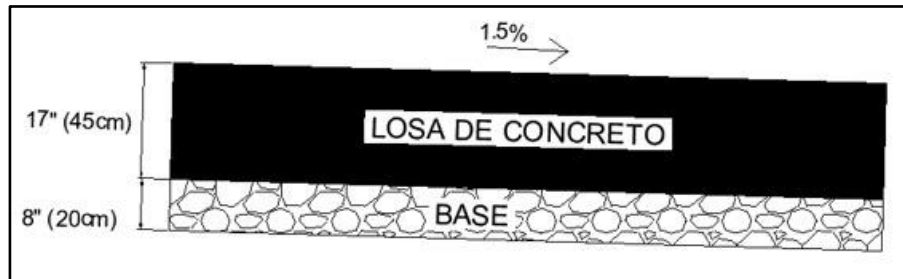


Figura N°36: Sección del pavimento de concreto hidráulico.

Fuente: Propia

Cálculo del espesor del margen

De igual manera que se realizó para el pavimento de concreto asfáltico, se hará un nuevo archivo para calcular el espesor del margen. Se empleará los mismos materiales, de tal manera que cumpla con los requisitos mínimos de espesores de margen.

Tabla N°19: Espesor mínimo de las capas del margen – Pavimento rígido

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)

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

Luego de haber definido los materiales y espesores mínimos, se ingresará el tráfico de aeronaves considerando 1200 salidas anuales para cada una. Seguidamente le analizamos cual es la aeronave que genera mayor exigencia en el pavimento haciendo click en "Life" de la ventana de Structure. En el gráfico CDF, veremos cuales son las aeronaves que generan mayor espesor.

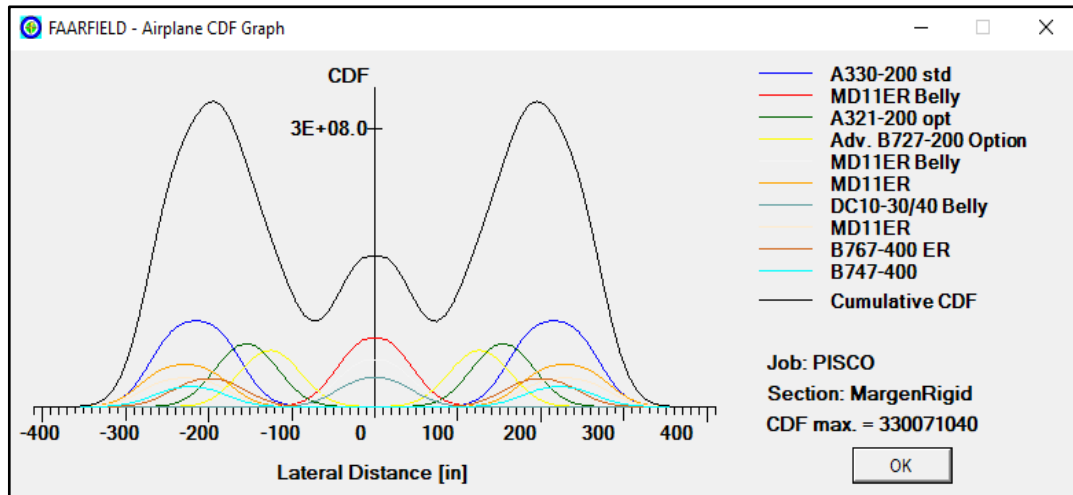


Figura N°37: Aeronaves que generan mayor demanda en el pavimento – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

En la gráfica CDF, vemos que las aeronaves con mayor influencia en el pavimento son Airbus A330-200, McDonnell Douglas MD11-F, Airbus A321-200 y la Boeing B727-200. Una vez identificado las aeronaves, se realizará un diseño para cada una de ellas, se modificará el periodo de diseño a 15 años y el número de salidas anuales será igual a 1.

Se hizo el procedimiento en FAARFIELD, lo cual nos da como resultado que la aeronave McDonnell Douglas MD11-F es la que genera mayor espesor de losa de concreto.

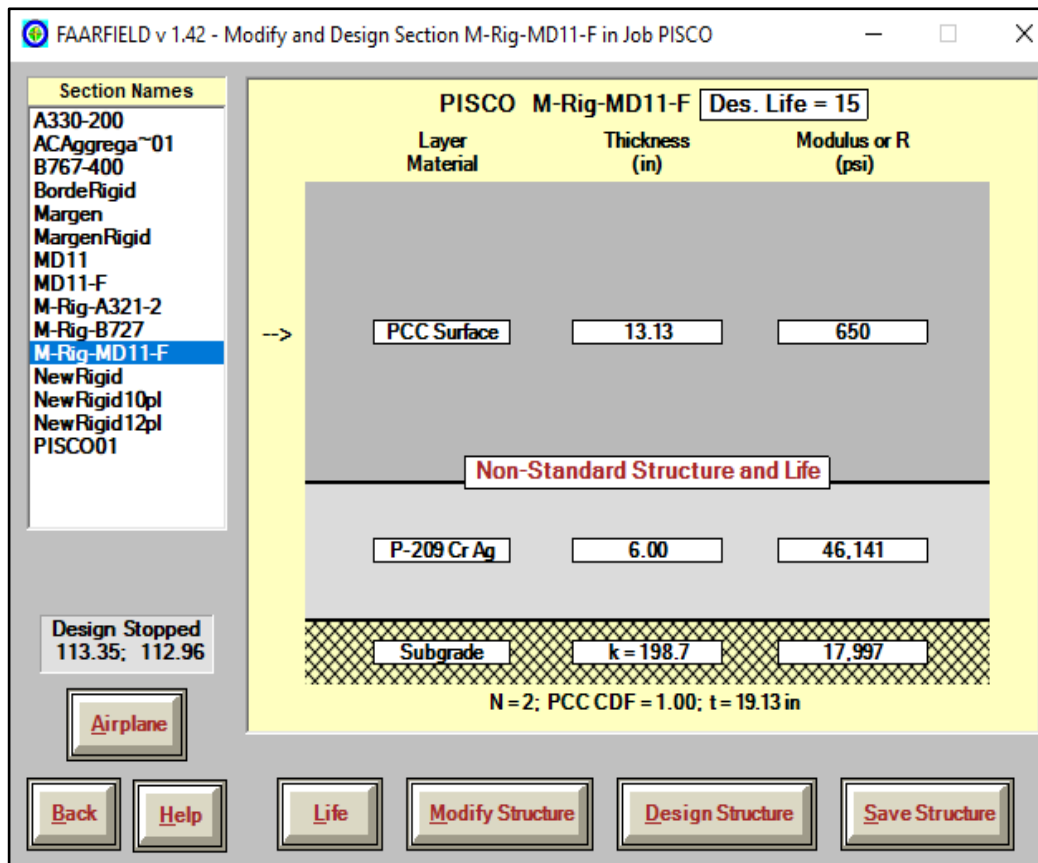


Figura N°38: Espesor del margen de la losa de concreto – FAARFIELD v 1.42.

Fuente: Propia

5.3 Evaluación de los pavimentos

Para poder verificar la hipótesis planteada en la presente investigación, se ha realizado la modelación en FAARFIELD de ambos tipos de pavimento aumentando el número de salidas anuales para el mismo tráfico aéreo que se utilizó para el diseño. De esta manera trataremos de demostrar que el pavimento de concreto hidráulico presenta un porcentaje de 20% mayor de vida útil que el de concreto asfáltico. Para ello, se describirá el procedimiento para cada caso.

Para poder obtener los resultados más consistentes de lo que se quiere demostrar, se crearon tres pruebas para tipo de pavimento. Cada una de ellas presenta un aumento de salidas anuales de forma creciente, los archivos creados para el pavimento de concreto asfáltico son PruebaAsfalt, PruebaAsf ~2 y PruebaAsf ~3. En la primera prueba, se duplicó el número de salidas; en la segunda prueba, se multiplicó por tres; y para la tercera prueba, se multiplicó por cinco.

A continuación, se presentarán las modificaciones de la primera prueba para el concreto asfáltico.

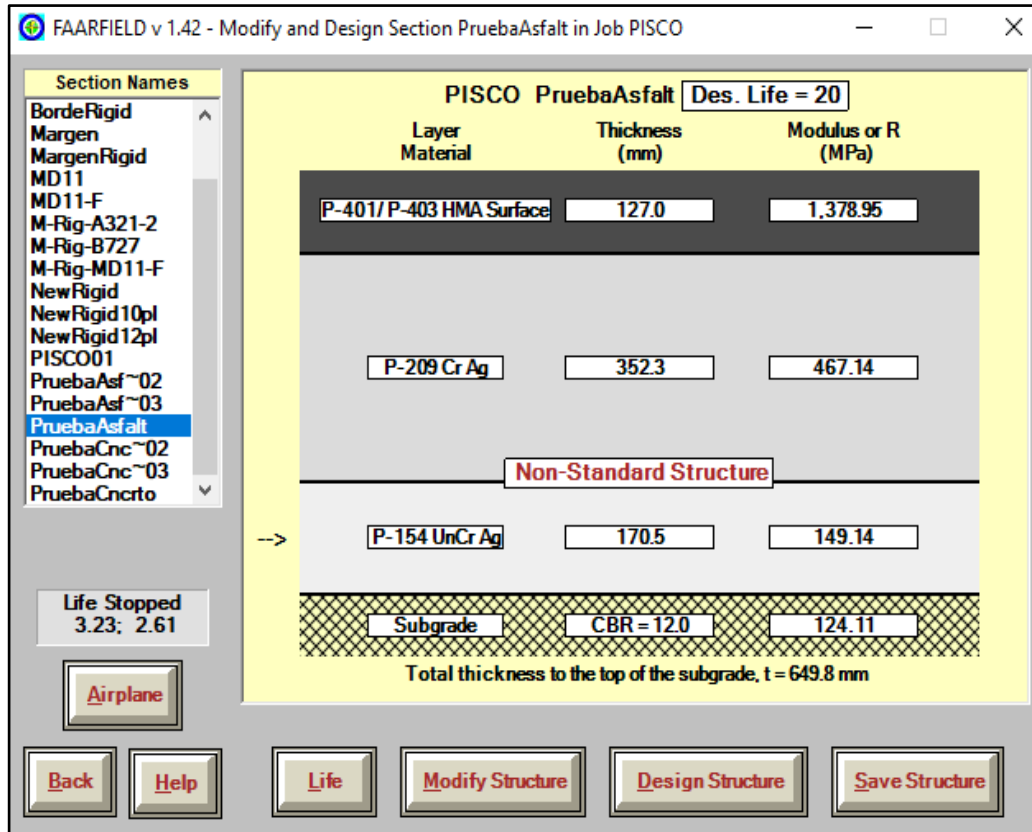


Figura N°85: Estructura del pavimento de concreto asfáltico a evaluar – FAARFIELD v. 1.42

Fuente: Propia

Como se puede ver la Figura N°85, los materiales y valor CBR de la subrasante son considerados iguales a los del diseño del pavimento.

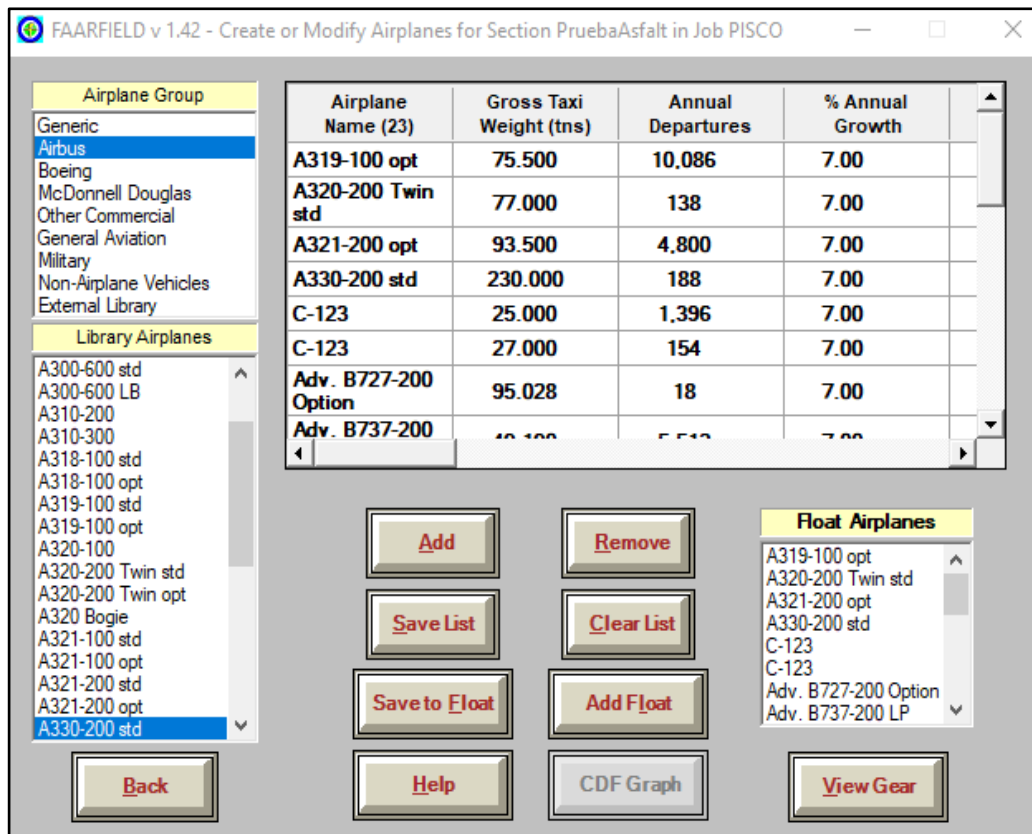


Figura N°86: Tráfico de aeronaves – número de salidas anuales duplicadas – FAARFIELD v. 1.42

Fuente: Propia

Una vez ingresado el tráfico de aeronaves y duplicar el número de salidas anuales inicial (Tabla N°6), regresamos a la venta de “Structure” y evaluamos el pavimento, con los espesores de diseño, aplicando la función “Life”.

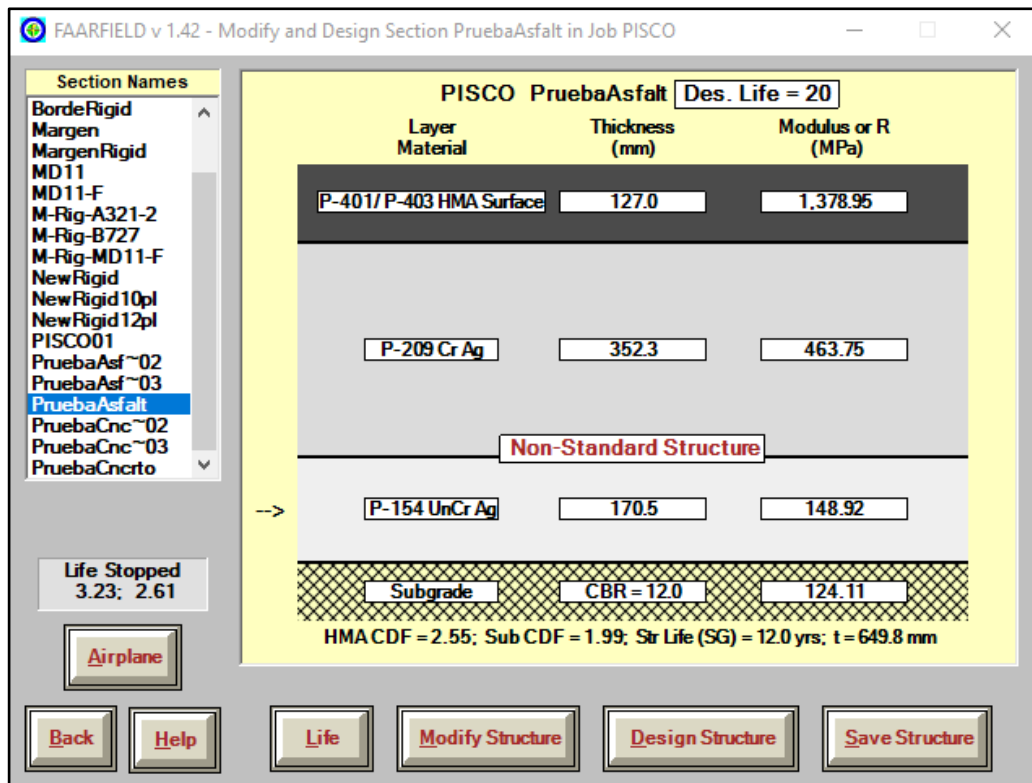


Figura N°87: Resultados de la evaluación Prueba 1 del pavimento de concreto asfáltico – FAARFIELD v. 1.42

Fuente: Propia

Los resultados de este procedimiento se muestran debajo de la estructura del pavimento. El valor Sub CDF (valor CDF calculado en la subrasante) es igual a 1.34, que es mayor que 1, esto quiere decir que la estructura no posee el espesor suficiente para proteger la subrasante para el tráfico ingresado al programa. La vida de fatiga que se obtuvo fue de 12 años, la cual se basa en los criterios de falla de la capa subrasante. Y, por último, el valor HMA CDF igual a 1.71 indica que la superficie HMA (concreto asfáltico) al ser mayor que 1 presenta nivel alto de agrietamiento por fatiga.

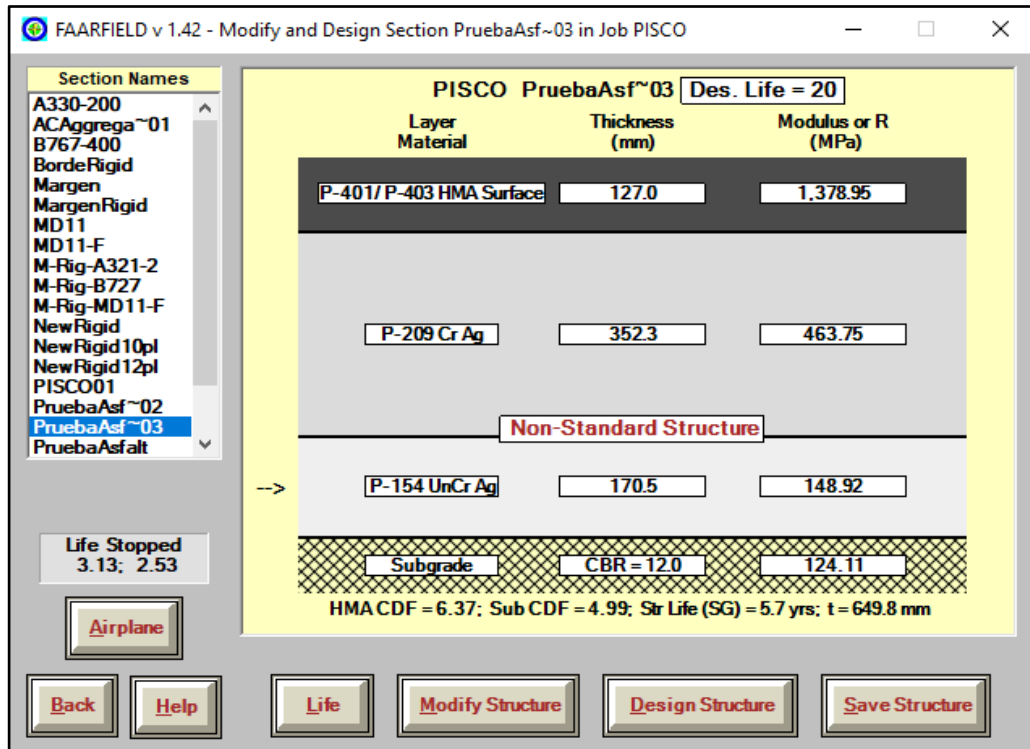


Figura N°88: Resultados de la evaluación Prueba 3 del pavimento de concreto asfáltico – FAARFIELD v. 1.42

Fuente: Propia

El mismo procedimiento se realizó para el pavimento de concreto hidráulico, como se presenta a continuación en la prueba. Para ello se consideró los mismos espesores de diseño, el valor k.

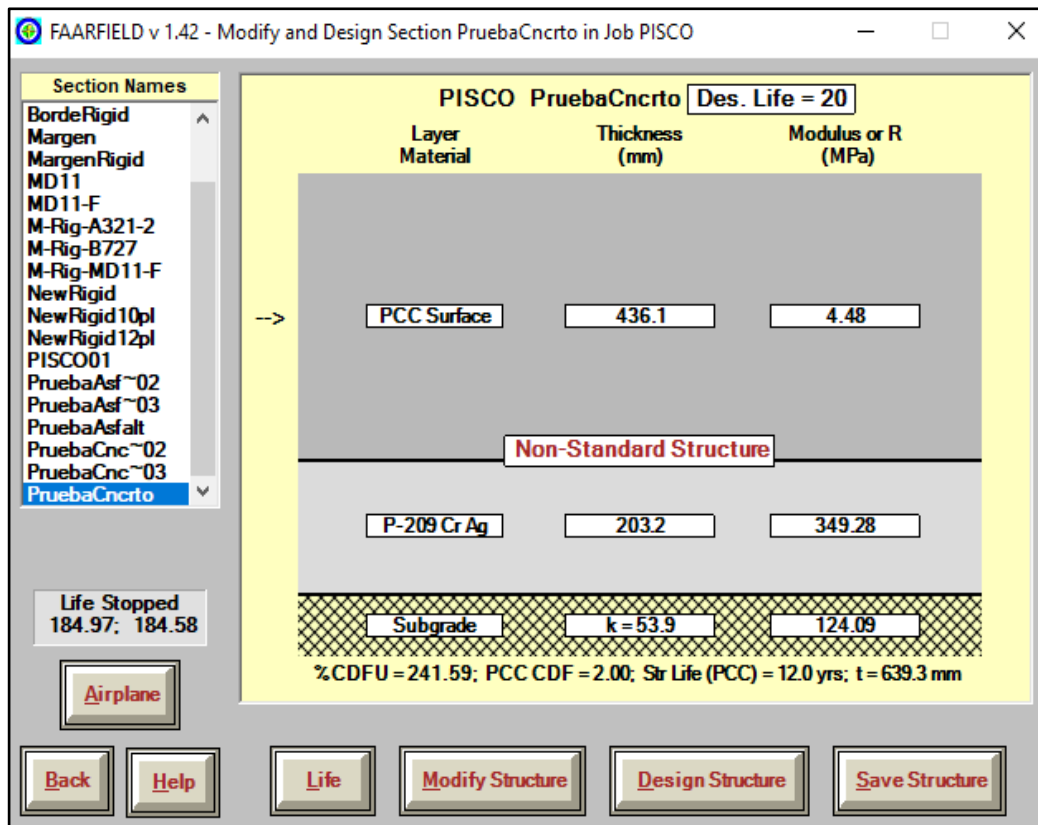


Figura N°89: Resultados de la evaluación Prueba 1 pavimento de concreto hidráulico – FAARFIELD v. 1.42

Fuente: Propia

Como se puede ver en la figura, los resultados de la evaluación indican que, para el tráfico ingresado, con el número de salidas duplicadas, presenta una vida total de 12 años. Posee un valor PCC CDF igual a 2.00, el cual nos indica la losa de concreto no posee el espesor suficiente para el tráfico asignado. También indica el valor %CDFU igual a 241.59, lo que nos define la cantidad de vida estructural utilizada. Siendo este mayor al 100% o, en caso de factor, mayor a 1 nos muestra que la losa ya excedió con la totalidad de su vida.

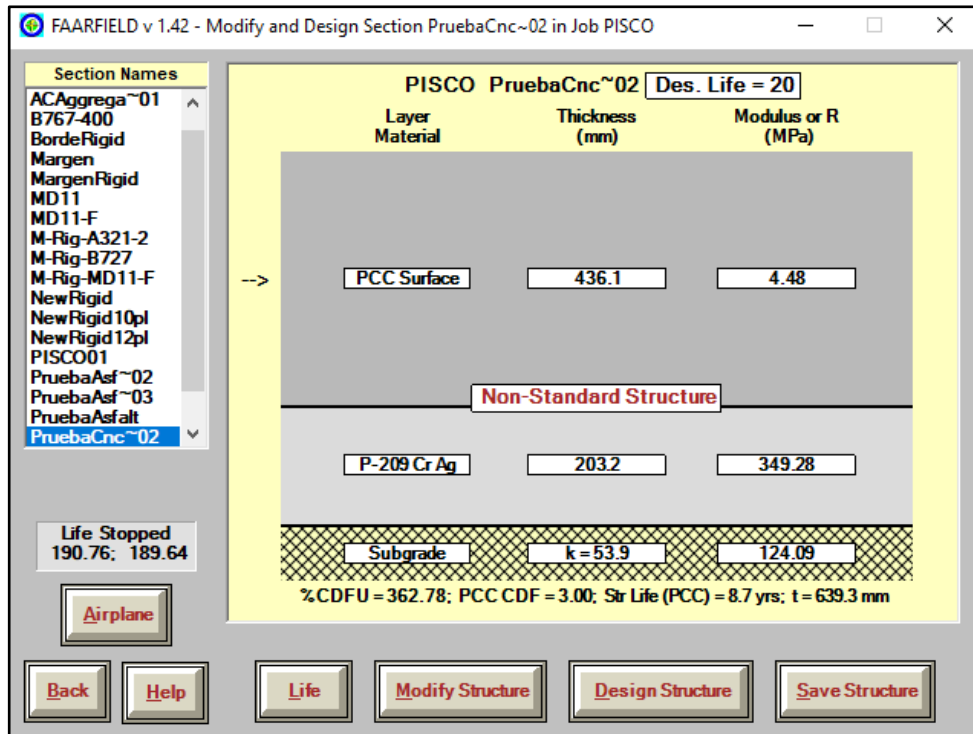


Figura N°90: Resultados de la evaluación Prueba 1 pavimento de concreto hidráulico – FAARFIELD v. 1.42

Fuente: Propia

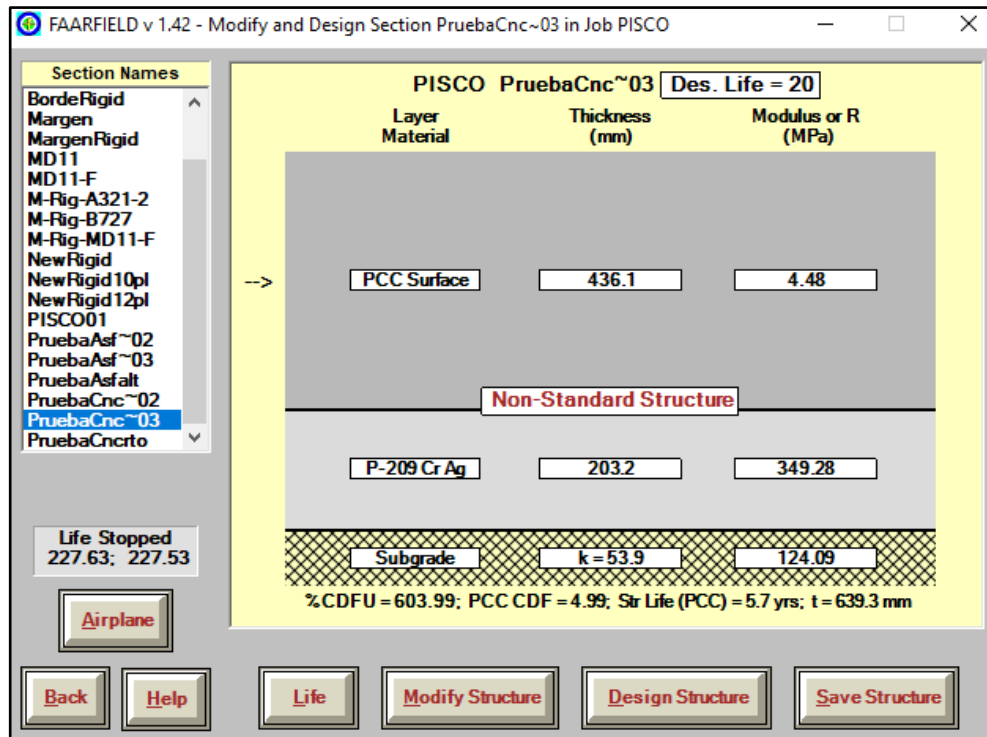


Figura 93: Resultados de la evaluación Prueba 1 pavimento de concreto hidráulico – FAARFIELD v. 1.42

Fuente: Propia

5.4 Conclusiones de investigaciones de pavimentos aeroportuarios

Puesto que la presente investigación está basada en trabajos investigativos anteriores, para respaldarla hacemos referencia a algunas de las conclusiones realizadas en dichos trabajos:

En su tesis de grado, Delgado Egoávil y Quispe Villaverde (2012) concluyen lo siguiente:

“De los resultados obtenidos en el estudio de tráfico se puede observar que el valor de las salidas anuales promedio en un periodo de 20 años (114,999) es aproximadamente el doble de la cantidad de salidas registradas en el año 2010 (52,348), este resultado refleja el gran incremento que se está dando por el uso de este medio de transportes y comprueba la necesidad de ampliar el aeropuerto Jorge Chávez o construir otro aeropuerto alternativo”. (p. 142)

La mayoría de los aeropuertos de Perú hacen uso del tráfico aéreo del aeropuerto internacional Jorge Chávez como referencia para el diseño de pavimento aeroportuario.

“En el desarrollo del diseño se comprobó lo que menciona el manual de la FAA, la aeronave de cálculo no es necesariamente la aeronave de mayor peso bruto. Esto se debe a que el peso no es el único valor que influye en la elección, sino también el número de salidas, el tipo de tren de aterrizaje, etc.” (p. 144)

“Se eligió al Pavimento Rígido como la mejor alternativa por las diversas ventajas que presenta frente al Pavimento Flexible. Entre estas ventajas resaltan la durabilidad, el costo a lo largo de la vida útil, la resistencia que posee frente a los derrames de combustible de avión, y sobre todo es mucho más amigable con el medio ambiente que la otra alternativa”. (p. 144)

Roel Rondo (2018), afirma en su tesis lo siguiente:

“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”. (p. 98)

Esto se debe a que cada actualización del programa, la FAA ingresa los resultados de diseños de pavimentos aeroportuarios realizados para poder definir los espesores más convenientes para el tráfico aéreo ingresado.

“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.” (p. 98)

“El valor total del presupuesto del pavimento flexible son 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.” (p. 98)

Le selecciona la solución más económica para los casos de aeropuertos que no tenga un pronóstico de salidas anuales tan elevado o variable, como lo es el caso del Jorge Chávez o provincias con mayor turismo como Cuzco, Arequipa, Puno, Loreto, Tumbes, Piura, etc.

“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.” (p. 99)

Al igual que en carreteras, el pavimento de concreto hidráulico se considera un diseño más conservador por no tener que realizar tantos mantenimientos como en el pavimento asfáltico.

“La plataforma puede estar constituida de pavimento flexible; sin embargo, es posible que haya 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.” (p. 99)

La FAA y OACI recomiendan el uso pavimento asfáltico para zonas como la pista de aterrizaje, calles de rodaje o movimiento y el pavimento de losa de concreto en zonas como plataformas, estacionamiento.

“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.” (p. 99)

“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.” (p. 99)

Delgado Bayóna y Gonzales Díaz (2019) concluyen lo siguiente:

“El estudio de tráfico se realizó en base a los aviones que circulan en territorio nacional. Se tomó como referencia las aeronaves que operan en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez.” (p. 149)

“Se concluyó que la mejor alternativa para el diseño del pavimento es el flexible basándose únicamente en el costo de la ejecución de la obra.” (p. 149)

Con esta investigación, afirmamos el uso del tráfico aéreo del aeropuerto Jorge Chávez como referencia para algunos departamentos del país. Teniendo en cuenta que prevalece la elección del diseño de pavimento más económico.

Guzma García y Ulloa Clavijo (2015) concluyen lo siguiente:

“Se ha podido determinar que la evaluación estructural, superficial y funcional del pavimento de la pista principal del Aeropuerto de Pisco “Renán Elías Olivera” cumple con la Norma establecido por la FAA y la OACI.” (p. 199)

“Se ha determinado que los diferentes estratos del suelo de fundación sobre el cual descansa la pista principal si cumplen con la norma establecida por la FAA, de esta manera se concluye que el suelo de la subrasante es un material estable, posee un buen drenaje, no fue necesario realizar el diseño considerando algún tipo de estabilización”

“Se ha podido determinar que la obtención del espesor y característica de la carpeta asfáltica de la pista principal del Aeropuerto de Pisco, si cumplen con la norma de la FAA.”

La FAA posee un procedimiento específico para la evaluación estructural para pavimentos aeroportuarios. En ella se establecen parámetros mínimos y máximos para los estudios de suelo, la condición estructural del pavimento asfáltico o losa de concreto.

El Ing. Luis Torres Peña. Bogotá, Colombia. En su paper de “Comparación d los resultados y aplicación del programa FAARFIELD 1.305 y el método tradicional para pavimentos flexibles desarrollados por la FAA de los Estados Unidos”, concluye que:

“Los espesores obtenidos de los métodos de la FAA, ya sea por monogramas o por el software FAARFIELD tienen una leve variación como era de esperarse, esto debido posiblemente a la exactitud que se tenga al obtener los datos de los monogramas.” (p. 25)

La variación existente de las metodologías es mínima en muchas investigaciones, lo cual nos demuestra que realizar ambos análisis para el diseño nos ayudaría aún más para proponer la estructura adecuada del pavimento.

“Los CDF (cumulative damage factor) más altos no necesariamente son los aviones más pesados, esto también depende del número de operaciones.” (p. 25)

Se refiere que este factor depende más del número de salidas que presente un tipo de aeronave de peso regular puede causar más daño que una con un peso considerablemente alto con un número de salidas muy bajo.

“FAARFIELD es una herramienta de fácil operación que permite obtener datos confiables esto si se cuenta con la información exacta del tránsito y tipo de aeronaves.” (p. 25)

La FAA está en constantes actualizaciones para un mejor desarrollo en la modelación, diseño y evaluación de los pavimentos aeroportuarios en el programa. Por lo que, para cada versión nueva del software se da a conocer las nuevas consideraciones que posee.

5.5 Análisis de diseño de los pavimentos

Para el análisis entre los pavimentos diseñados en el capítulo anterior primero mostraremos la variación de resultados de las metodologías aplicadas.

En la siguiente tabla se mostrarán los espesores del pavimento de concreto asfáltico.

Tabla N°20: Comparación de resultados de espesores – Pavimento de concreto asfáltico.

Metodología	Espesor de subbase (cm)	Espesor de base (cm)	Espesor de carpeta asfáltica (cm)
AC 150/5320-6D	55	25	15
AC 150/5320-6F	20	35	15
Variación (%)	63.64%	28.57%	0.00%

Fuente: Propia.

Como se puede observar en la tabla, los espesores de la metodología manual y el diseño por medio del software FAARFIELD difieren en las capas inferiores a la carpeta asfáltica. La variación de la subbase es la que presenta mayor porcentaje. El software nos ayuda para poder hacer ajustes en los espesores para poder

determinar un diseño del pavimento final. De ambas metodologías el espesor de la carpeta asfáltica prevalece con 15cm. Se necesitaría revisar más a detalle el espesor de la subbase, ya que presenta una diferencia considerable. Se considera que el espesor de la base de FAARFIELD debe mantenerse.

Tabla N°21: Comparación de resultados de los espesores de borde– Pavimento de concreto asfáltico.

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	20	40	10
Variación (%)	71.43%	50.00%	50.00%

Fuente: Propia.

En la Tabla N°21 se presentan de igual manera los espesores de borde de la estructura del pavimento. Podemos observar que existe diferencia en todas las capas, pero la de mayor variación es la capa subbase. Las diferencias que presentan ambas metodologías son debido a que, para el uso del programa, FAARFIELD establece espesores mínimos para cada capa siendo estos mayores a la metodología anterior. Cabe mencionar que, la metodología AC 150/5320-6F nos presenta un resultado más conservador.

Para el caso de los pavimentos de concreto hidráulico se presenta lo mismo para cada metodología.

Tabla N°22: Comparación de resultados de los espesores – Pavimento de concreto hidráulico.

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%

Fuente: Propia

Podemos observar en la Tabla N°22 que los espesores del pavimento no varían entre los dos métodos de diseño. En el diseño de la metodología haciendo el uso de ábacos (AC 150/5320-6D) se tomó el diseño de la alternativa 2, con una base de 10” de espesor; por otro lado, para el diseño por medio del software se usó la alternativa 1

con base de 8”. Las diferencias existentes se deben a que ambos métodos presentan diferentes conceptos, indicadas en la teoría, para lograr el mejor diseño de la estructura para el tráfico de aeronaves que presenta.

Tabla N°23: Comparación de resultados de los espesores del borde – Pavimento de concreto hidráulico.

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%	22.22%

Fuente: Propia

De igual manera, el diseño del borde del pavimento también presenta diferencias. Para el caso de la primera metodología, el espesor de la losa de concreto disminuye y aumenta el espesor de la base; por el contrario, el diseño en FAARFIELD nos resulta espesores iguales a la estructura del centro o también llamado “zona crítica” por lo que, el pavimento y borde presentan las mismas dimensiones.

Podemos resaltar de ambas metodologías, la importancia de hacer un diseño tradicional como lo presenta la circular AC 150/5320-6D y la verificación de los espesores establecidos por medio del programa FAARFIELD siguiendo con las consideraciones de la norma establecida por la AC 150/5320-6F. La cual presenta actualización de datos por cada nueva versión que la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos realiza. Junto con ella se tiene un nuevo manual, agregando información de diseños realizados en los años anteriores hasta el presente para poder diseñar de manera más efectiva por cada versión nueva.

5.6 Análisis de presupuesto

El análisis de costos a analizar a continuación es en base a la investigación de Diseño del Pavimento de un aeropuerto internacional de Pisco (Karla R. Rondo, 2018). En él se analizará la alternativa más económica de ambos tipos de pavimentos para la construcción de la pista de aterrizaje.

Análisis de costos unitarios

A continuación, se presentará el presupuesto para el pavimento de concreto asfáltico, dado que se consideró los espesores de diseño en FAARFIELD y tomando en cuenta los espesores de la anterior metodología, se estableció los espesores de concreto asfáltico en la siguiente tabla.

Tabla N°24: Dimensiones del Pavimento de concreto asfáltico.

	Espesor central (m)	Espesor de borde (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

Fuente: Propia

A partir de los valores establecidos en la tabla y los análisis de costos unitarios presentados, se obtiene el presupuesto del pavimento de la pista de aterrizaje.

Tabla N°25: Presupuesto de pavimento de concreto asfáltico de la pista de aterrizaje.

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
1.00	Movimiento de tierras				3,231,882.57
1.01	Excavación masiva a nivel de la subrasante	m ³	88,988.85	5.19	462,201.84
1.02	Apilamiento de material precedente de la excavación	m ³	115,685.64	4.29	496,147.59
1.03	Eliminación de material excedente precedente de las excavacion	m ³	115,685.64	6.95	803,540.89
1.04	Conformación de la subrasante	m ²	135,900.00	10.82	1,469,992.25
2.00	Pavimentos				9,799,153.89
2.01	Subbase del pavimento	m ³	50,917.20	55.22	2,811,703.29
2.02	Base del pavimento	m ³	33,975.00	69.95	2,376,437.04
2.03	Carpeta asfáltica				4,611,013.57
2.03.01	Imprimación asfáltica	m ²	135,900.00	3.72	505,409.90
2.03.02	Pavimento de concreto asfáltico en caliente	m ³	17,032.80	241.04	4,105,603.67
	Costo total directo				13,031,036.46

Fuente: Propia

De la misma manera, se presentará las dimensiones y el presupuesto para el pavimento de concreto hidráulico de la pista de aterrizaje.

Tabla N°26: Dimensiones del Pavimento de concreto hidráulico.

	Espesor (cm)	Longitud (m)	Ancho (m)	Área (m²)	Volumen (m³)
PPC	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

Fuente: Propia

Como se presenta en la Tabla N°26, se mantuvo el espesor de la base y de la losa de concreto del diseño en el programa FAARFIELD. En ella se describe que para la estructura central y el borde presentan las mismas dimensiones.

Tabla N°27: Presupuesto de pavimento de concreto hidráulico de la pista de aterrizaje.

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
1.00	Movimiento de tierras				3,231,883.09
1.01	Excavación masiva a nivel de la subrasante	m ³	88,988.95	5.19	462,202.36
1.02	Apilamiento de material precedente de la excavación	m ³	115,685.64	4.29	496,147.59
1.03	Eliminación de material excedente precedente de las excavaciones	m ³	115,685.64	6.95	803,540.89
1.04	Conformación de la subrasante	m ²	135,900.00	10.82	1,469,992.25
2.00	Pavimentos				44,665,873.86
2.02	Base del pavimento	m ³	17,032.80	69.95	1,191,387.10
2.02	Concreto del pavimento				43,474,486.76
2.02.01	Concreto premezclado	m ³	70,798.61	431.25	30,531,730.65
2.02.02	Acabado del pavimento	m ²	135,900.00	4.23	574,510.77
2.02.03	Encofrado y desencofrado	m ²	135,900.00	71.67	9,739,923.88
2.02.04	Curado con agua	m ²	135,900.00	4.02	546,769.19
2.02.05	Dowels Φ 1½ x.51m @.45	kg	251,585.64	5.32	1,338,659.01
2.02.06	Juntas de aislamiento	m	6,616.54	13.97	92,428.67
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	12.84	317,794.61
	Costo total directo				47,897,756.94

Fuente: Propia

Los resultados de los presupuestos nos muestran una gran diferencia de costos (S/. 34,866,720.48); por lo que, considerando sólo la solución más económica, sería conveniente usar el pavimento de concreto asfáltico para la construcción de la pista de aterrizaje.

En la investigación realizada “Diseño de un pavimento aeroportuario” (Fabiola Delgado y Candy Quispe, 2012) se menciona en su análisis por puntos considerando la construcción, mantenimiento, resistencia y rehabilitación detallando las características de ambos pavimentos, resaltando que el pavimento de concreto hidráulico posee costos de hasta 45% menores que el de un pavimento asfáltico. En esta investigación, la cual fue presentada como alternativa para el aeropuerto internacional Jorge Chávez, el aeropuerto propuesto en Punta Hermosa sería construido de concreto hidráulico. Dicha alternativa tuvo un costo total directo de S/. 30,312,948.98. Presentado en Anexos.

En una reciente investigación “Diseño del pavimento en el área de movimiento del aeropuerto Morrópe-Lambayeque” (José Delgado y José Gonzales, 2019) se analiza el presupuesto de ambas soluciones de pavimento para el área de movimiento, el cual se detalla el costo directo de la construcción, presentado en anexos. El pavimento de concreto asfáltico presentó un costo directo de S/. 57,199,370.74; por otro lado, el costo del pavimento de concreto hidráulico resultó un total de S/. 67,789,649.01.

A continuación, se presentará la tabla de variación entre presupuestos de acuerdo a los casos de las investigaciones mencionadas.

Tabla N°28: Comparación de presupuestos – variación en porcentaje.

	Pav. De concreto asfáltico	Pav. De concreto hidráulico	Variación en %
Presupuesto 1	S/ 13,031,036.46	S/ 47,897,756.94	72.79%
Presupuesto 2	S/ 57,199,370.74	S/ 67,789,649.01	15.62%

Fuente: Propia

De la Tabla N°28, se puede observar que el presupuesto 1 posee mayor variación a comparación del presupuesto 2. Esto se debe a que el estudio de tráfico para la cual fueron diseñadas es considerablemente distinto. El presupuesto 1 fue analizado para un tráfico de aeronaves de tipo militar, debido a que el aeropuerto presentaba esas características de funcionamiento; por otro lado, el diseño para el presupuesto 2 fue estudiado para un tráfico aéreo según el registro del aeropuerto internacional Jorge

Chávez. Por lo tanto, si suponemos que el porcentaje de variación es el mismo para el presupuesto presentado para el aeropuerto de Punta Hermosa, la cual también fue diseñada con el mismo tráfico que el presupuesto 2, podemos deducir que el costo directo para el caso del pavimento de concreto asfáltico sería aproximadamente S/. 25,578,066.35.

Cabe recalcar que la opción más económica, como lo es el pavimento de concreto asfáltico, sólo la define por su menor costo en la construcción de la estructura de la pista de aterrizaje. Por otro lado, si consideramos la vida útil para la cual son diseñadas y un aumento en el tráfico de aeronaves, puede que el concreto asfáltico necesite de mayor número de mantenimientos a lo largo de su tiempo de vida que el concreto hidráulico, lo cual generaría que el pavimento asfáltico sea más costoso.

5.7 Análisis de fallas de los pavimentos

Como ya se presentaron las fallas en el capítulo anterior, ambos pavimentos presentan características desfavorables al no realizar un correcto análisis para el diseño y los materiales de uso en la construcción del pavimento aeroportuario. Lo que se tiene que tomar en cuenta también es la aplicación de los pavimentos para las distintas zonas del aeropuerto ya que en ciertas áreas las cargas son estáticas y en otras son móviles.

Como se menciona en la conferencia de Pavimentos en aeropuertos, diseño y construcción dada por el Ing. Erwin Kohler (2019), Los pavimentos de concreto asfáltico tienen un comportamiento débil ante las cargas estáticas de los aviones en las plataformas o estacionamiento donde el peso es aplicado por un largo tiempo al ingreso y salida de los pasajeros o al llenar el combustible. Lo que causa que, en la mayoría de aeropuertos, se use el pavimento de concreto hidráulico para las cargas estáticas ya mencionadas. El concreto hidráulico tiene mejor soporte de estos pesos permanentes debido a sus características de contrarrestar la fuerza aplicada; es decir, el comportamiento de la losa de concreto permite soportar cargas por mayor tiempo que el pavimento de concreto asfáltico.

Según la FAA, los pavimentos aeroportuarios deben ser diseñados para un tiempo de servicio de 20 años. Haciendo un correcto estudio y diseño para la estructura del pavimento, no deberían de ocurrir fallas durante su vida útil, considerando que el tráfico de aeronaves que se usó para el diseño sea constante. De otra manera se

tendría que analizar cuanto afecta el nuevo tráfico de aeronaves a la estructura construida, para ello existen los métodos de evaluación y análisis por el programa FAARFIELD.

Las principales fallas que se presentan de manera constante son agrietamiento piel de cocodrilo, grietas de reflexión de junta y ahuellamiento para el caso de los pavimentos de concreto asfáltico. En los pavimentos de concreto hidráulico se presentan grietas de esquina, longitudinales, transversales y diagonales, asentamiento. En el asfalto, las fallas suelen presentarse a temprana edad de su vida útil lo que genera estudios de mantenimiento para la reparación de esas fallas, generando mayores gastos a lo largo de su vida estructural. La mayoría del uso de pavimento asfáltico es debido a que se calcula el presupuesto más económico y que tenga el mismo comportamiento resistente para el tráfico aéreo; sin embargo, no siempre se toma en cuenta los costos de mantenimiento que se debe realizar durante su vida de servicio. Lo cual genera un número mayor de reparaciones para el asfalto.

Se conoce que los pavimentos aeroportuarios son diseñados para la circulación segura de las aeronaves y los pasajeros. Para ello, en la ingeniería de aeropuertos, se debe controlar el peligro de FOD. Como ya se mencionó en las fallas, son objetos que por lo general se general por el desprendimiento de la capa de rodadura, generando peligro para las turbinas de los aviones.

Según la FAA, se han realizado varios diseños de pavimento de concreto hidráulico de los cuales se han obtenido, como resultado, un tiempo de vida útil mayor a 20 años. (Seminario ALACPA en Costa Rica, 2019). También se mencionó que los pavimentos de concreto asfáltico presentan un adecuado comportamiento estructural; sin embargo, usualmente requiere de una repavimentación antes de cumplir los 20 años. Es decir, que los pavimentos asfálticos también presentan una buena resistencia, pero no como lo menciona, se tiene un registro de pavimentos con losa de concreto que tienen un rango mayor de vida estructural. El desafío de la FAA es desarrollar un diseño de pavimento que produzca resultados reales de periodos de diseño mayores a los 40 años. Es por ello que el software desarrollado por la misma, presenta un ingreso de valores de vida útil entre 1 a 50 años.

5.8 Análisis de la evaluación estructural

A continuación, se presentarán los resultados de las pruebas realizadas en el punto 5.3 para cada pavimento aeroportuario.

Tabla N°29: Resultados de evaluación de las pruebas de pavimento de concreto asfáltico.

	HMA CDF	Sub CDF	Str Life (SG)
PruebaAsfalt	2.55	2	12
PruebaAsf~2	3.82	2.99	8.7
PruebaAsf~3	6.37	4.99	5.7

Fuente: Propia

Tabla N°30: Resultados de evaluación de las pruebas de pavimento de concreto hidráulico.

	PCC CDF	CDFU (%)	Str Life (PCC)
PruebaCncrto	2	242%	12
PruebaCnc ~2	2.99	363%	8.7
PruebaCnc ~3	4.99	604%	5.7

Fuente: Propia

5.9 Análisis de resultados

De los resultados podemos observar que, la evaluación por medio del programa FAARFIELD nos muestra la misma cantidad de años que van a durar ambos tipos de pavimentos; sin embargo, también nos presenta valores de deformación en la carpeta asfáltica y en la losa de concreto (HMA CDF y PCC CDF, respectivamente). El programa mediante cálculos de pasadas del nuevo tráfico ingresado para cada caso, analiza cuanto es el deterioro causado en la estructura de pavimento de ambos casos. Como se observa en la Tabla N°29, los valores de deformación en la capa de rodadura HMA (carpeta asfáltica) son mayores a los resultados PCC de las pruebas del concreto hidráulico (Tabla N°30).

Podemos resaltar que el pavimento de concreto hidráulico prevalece en cuanto a menor factor de daño calculado; sin embargo, se esperaba que FAARFIELD nos

dé como resultado un rango mayor de vida del concreto hidráulico. Lo cual, se puede deducir que, como ambos pavimentos fueron diseñados para el mismo tráfico y sólo hemos afectado el número de salidas para la evaluación, puede ser el motivo de que ambos resultados de años sean casi iguales.

5.10 Contrastación de hipótesis

Para la contrastación de las hipótesis se analizará cada una de ellas de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación.

5.10.1 Hipótesis específica 1

Hipótesis alterna (H_1): Existen valores similares en el diseño de los pavimentos aeroportuarios por ambas metodologías de la FAA.

Hipótesis nula (H_0): Existen valores diferentes en el diseño de los pavimentos aeroportuarios por ambas metodologías de la FAA.

Según el Ing. Luis Torres Peña (Colombia) “Los espesores obtenidos de los métodos de la FAA, ya sea por monogramas por el software FAARFIELD tienen una leve variación como era de esperarse, esto es debido posiblemente a la exactitud que se tenga al obtener los datos de monogramas”.

De acuerdo a nuestro análisis de comparación entre espesores de los diseños realizados se presentó en el sexto capítulo en la Tabla N°20 y N°22. En las cuales se pudo observar que los espesores de la capa de rodadura y la capa base, no presentaban tanta variación entre ellas; sin embargo, la capa subbase sí mostró una gran diferencia y eso se debe a que la primera metodología es en base a ábacos de la FAA establecidos para diseño, mientras que el programa presenta espesores en base a diseños ya establecidos en los Estados Unidos que son ingresados a la información del software para que presente los espesores necesarios del tráfico propuesto. Se demostró que las metodologías no presentan mucha variación entre ellas. Por lo tanto, se valida H_1 .

5.10.2 Hipótesis específica 2

Hipótesis alterna (H_1): El costo del pavimento asfáltico es 50% mayor que el pavimento de concreto hidráulico.

Hipótesis nula (H_0): El costo del pavimento asfáltico no es 50% mayor que el pavimento de concreto hidráulico.

Según Delgado Bayona y Gonzales Díaz concluyeron en su investigación que “la mejor alternativa para el diseño del pavimento es el flexible basándose únicamente en el costo de la ejecución de obra”. Basándonos en la tabla N°28, podemos observar los porcentajes de variación de presupuestos. Lo cual nos muestra que, el Presupuesto 2 de la tabla no posee una diferencia de costo tan elevada (15.62%). Esto se debe al estudio de tráfico aéreo que se utilizó para su diseño, tráfico de aeronaves del aeropuerto Jorge Chávez. Mientras que el Presupuesto 1, realizó su propio estudio de tráfico, teniendo un tráfico de aeronaves de tipo militar. Siendo la variación de costos de 72.79%. En la investigación de Roel Rondo (2018) se concluyó que “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”. Por lo tanto, si se valida H1.

5.10.3 Hipótesis específica 3

Hipótesis alterna (H1): El pavimento de concreto asfáltico presenta fallas más repentinas que el pavimento de concreto hidráulico.

Hipótesis nula (H0): El pavimento de concreto asfáltico no presenta fallas más repentinas que el pavimento de concreto hidráulico.

Según Delgado Egoávil y Quispe Valverde (2012), “Se eligió al pavimento rígido como la mejor alternativa por las diversas ventajas que presenta frente al pavimento flexible. Entre estas ventajas resaltan la durabilidad, el costo a lo largo de su vida útil, resistencia que posee frente a derrames de combustible de avión, y sobre todo es mucho más amigable con el medio ambiente.”

Según la FAA (2019), se obtuvo un registro de pavimentos de concreto hidráulico que han sido debidamente diseñados que exceden a los 20 años de vida útil hasta la actualidad. También se menciona que, los pavimentos de concreto asfáltico presentan un resultado adecuado para los pavimentos aeroportuarios; sin embargo, este pavimento presenta la necesidad de hacer mantenimiento o reparaciones antes de cumplir su vida estructural. Por lo tanto, se valida H₁.

5.10.4 Hipótesis específica 4

Hipótesis alterna (H_1): La evaluación de los pavimentos en FAARFIELD mostrará que el pavimento de concreto hidráulico posee menor deterioro estructural.

Hipótesis nula (H_0): La evaluación de los pavimentos en FAARFIELD mostrará que el pavimento de concreto hidráulico no posee menor deterioro estructural.

Según el Ing. Luis Torres Peña (Colombia) “FAARFIELD es una herramienta de fácil operación que permite obtener datos”. Según el análisis realizado en el punto 6.5, el pavimento de concreto hidráulico posee valores de factor CDF menores a los del concreto asfáltico. FAARFIELD analizó la fatiga en la losa de concreto y se obtuvo valores mayores a 1. Es decir que, el tiempo de vida del pavimento ha sido utilizado por completo excediendo a valores alto. Por otro lado, en los resultados del pavimento de concreto asfáltico se presentan valores similares aplicados al deterioro de agrietamiento por fatiga, siendo estos resultados mayores. Por lo tanto, se valida H_1 .

5.10.5 Hipótesis general

Hipótesis alterna (H_1): El desempeño del pavimento de concreto hidráulico es de 20% más que el de pavimento de concreto asfáltico.

Hipótesis nula (H_0): El desempeño del pavimento de concreto hidráulico no es de 20% más que el de pavimento de concreto asfáltico.

Del análisis de la modelación de las pruebas para cada tipo de pavimento, sometidas a un incremento en el número de salidas anuales (Tabla N°29 y N°30) nos mostró que, según FAARFIELD, ambos pavimentos nos resultan cumplir el mismo tipo de vida. Este resultado se deduce que debido a que solo se aumentó el número de salidas anuales conservando los mismos tipos de aeronave en el tráfico aéreo, al igual que para el diseño. Por lo tanto, se rechaza H_1 .

CONCLUSIONES

1. De la comparación del desempeño de ambos pavimentos aeroportuarios, evaluados por la metodología de la FAA, se tiene que el pavimento de concreto hidráulico resulta tener valores de daño en la carpeta de rodadura menores a los del pavimento asfáltico.
2. De los resultados obtenidos por ambas metodologías de la FAA para el diseño los pavimentos, se concluye que según la Tabla N°20 la variación de los espesores del pavimento de concreto asfáltico es de 63% y 28% en la capa subbase y la capa base respectivamente; luego, 71%, 50% y 50% en las capas subbase, base y carpeta asfáltica de la estructura de borde presentada en la Tabla N°21. En la Tabla N°22, la variación de espesores para el pavimento de concreto hidráulico es de 20% y 10% en la capa base y la losa de concreto; luego, 50% y 22% en las capas mencionadas para el caso de la estructura de borde.
3. Los presupuestos mencionados en el punto 6.2 nos muestran una variación de 72.79% y 15.62% (Tabla N°28). Esto ocurre debido a que presentan estudios de tráfico distintos, siendo el “Presupuesto 2” la de menor variación al haber sido proyectada para un tráfico de aeronaves del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (15.62%).
4. El análisis de fallas indica que, el pavimento de concreto asfáltico presenta fallas superficiales antes de cumplir su tiempo de vida estructural. Este tipo de pavimento posee mayor debilidad para soportar las cargas estáticas como las de plataformas, estacionamiento de aeronaves y en las zonas de llenado de combustible. El pavimento de concreto hidráulico es el más usado para las áreas mencionadas.
5. En los resultados de la modelación de las pruebas de tráfico modificado, para ambos tipos de pavimento en FAARFIELD, nos concluye que, según la comparación de las Tablas N°29 y N°30, el pavimento de concreto asfáltico posee valores mayores de deformación en la capa de rodadura HMA (concreto asfáltico) 2.55, 3.82 y 6.37; por otro lado, los valores de PCC CDF (factor de daño acumulado en la losa de concreto) también muestran deformaciones altas pero son menores a las del pavimento asfáltico. Por lo tanto, se considera que el diseño del pavimento de concreto hidráulico prevalece ante el aumento del tráfico aéreo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar una evaluación estructural considerando todo el procedimiento de la metodología AC 150/5320-6F (inspección in situ, estudios de suelo y condición del pavimento) para obtener resultados reales del aeropuerto en estudio.
2. Se recomienda seguir investigando la metodología de la FAA para el análisis de rehabilitación de pavimentos existentes en el país haciendo uso del método tradicional y el software FAARFIELD.
3. Se recomienda seguir el camino de las investigaciones en lo que concierne netamente a pavimentos aeroportuarios, pues en el medio no hay alcance a una basta información de este tema.
4. Se recomienda realizar más estudios de análisis de presupuesto de ambos pavimentos para aeropuertos considerando los costos de mantenimiento a los que van a ser sometidos y no basarse solamente en los costos de construcción.
5. Se recomienda realizar investigaciones profundas en base a este determinado tema, para así en un futuro no muy lejano poder contar con una Norma Peruana para la ingeniería de aeropuertos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Delgado E., Fabiola A., Quispe V., Candy. (2012). *Diseño del pavimento de un aeropuerto*. (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú.
- Delgado B., José R., Gonzales D., José L. (2019). *Diseño del pavimento en el área de movimiento del aeropuerto Mórrope - Lambayeque*. (Tesis de Pregrado). Universidad Señor de Sipán, Lambayeque-Perú.
- Federal Aviation Administration. (1995). *Airport Pavement Design and Evaluation – Advisory Circular 150/5320-6D*. U.S. Department of Transportation, Estados Unidos.
- Federal Aviation Administration. (2016). *Airport Pavement Design and Evaluation – Advisory Circular 150/5320-6F*. U.S. Department of Transportation, Estados Unidos.
- Gil Helvar, Alejandro. (2016). *Conservación de pavimentos aeroportuarios. Aplicación Caso Práctico: Reparación de la Calle de Rodaje (Taxiway) en la Base Aérea de Getafe (Madrid)*. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España.
- Huang, Yang (2004). *Pavement Analysis and Design*. Segunda edición. University of Kentucky. Estados Unidos.
- Merrit F., Loftin K., Ricketts J. (1999). *Manual del Ingeniero Civil, Tomo II*. Cuarta edición. 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 (2006). *Manual de diseño de aeródromos Parte 3, Pavimentos*. Segunda edición. Canadá.
- Roel Rondo, Karla A. (2018). *Diseño de un aeropuerto internacional de Pisco*. (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú.
- Bórquez Bertrán, Miguel E. (2014) *Diseño de la estructura de pavimento de la pista del aeródromo de Panguipulli* (Tesis de Pregrado, Universidad Austral de Chile).
- Castro Melo, C.A. Ahumada Bermeo, N. (2018) *Propuesta de adecuación de la pista de aterrizaje y mejora de los servicios del aeropuerto de Medina en Cundinamarca* (Tesis de Pregrado), Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- García Saldivar, G. (2014) *Diseño de pavimentos para aeropistas (Ciudad Universitaria)* (Tesis de Pregrado) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Herrera Candelario, S. (2018) *Estudio de la influencia de la napa freática en el diseño del pavimento de la pista de aterrizaje del aeropuerto teniente FAP Jaime Montreuil Morales de la ciudad de Chimbote, usando el software FAARFIELD* (Tesis de Pregrado) Universidad Nacional Del Santa, Chimbote-Perú.
- Acuña Solis A.Martínez Albañil. F (2013) *Supervisión y control de la obra Rodaje Golfo 2ª etapa y obras complementarias (Pavimento) Aeropuerto Internacional Benito Juárez, Ciudad de México* (Tesis de Pregrado) Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. México.
- Universidad Mayor de San Simón (2014) *Pavimentos – Texto Guía – Facultad de Ciencias y Tecnología - Carreteras*. Bolivia.
- Ositran (2018) *Análisis de las concesiones aeroportuarias en el Perú*. Perú.
- American Concrete Pavement Association (2002), *Concrete Pavement for General-Aviation, Business and Commuter Aircraft*. United States.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia	133
Anexo 2: Curvas de diseño de pavimento de concreto asfáltico	134
Anexo 3: Curvas de diseño de pavimento de concreto hidráulico.....	148
Anexo 4: Análisis de precios unitarios.....	155
Anexo 5: Presupuesto de construcción de pavimento de concreto hidráulico.....	160
Anexo 6: Presupuesto de pavimento de concreto asfáltico y concreto hidráulico.....	161

Anexo 1: Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA			
TEMA: COMPARACIÓN ENTRE EL CONCRETO ASFÁLTICO Y CONCRETO HIDRÁULICO EN PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS			
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
<p><u>Problema general:</u></p> <p>¿Cuál es el desempeño del pavimento de concreto asfáltico y de concreto hidráulico en pavimento aeroportuarios?</p>	<p><u>Objetivo general:</u></p> <p>Comparar el desempeño del pavimento de concreto asfáltico y del concreto hidráulico en pavimento aeroportuarios, basándonos en investigaciones anteriores.</p>	<p><u>Hipótesis general:</u></p> <p>El desempeño del pavimento de concreto hidráulico es de 20% más que el de pavimento de concreto asfáltico.</p>	<p><u>Variable independiente:</u></p> <p>X: Pavimentos aeroportuarios X1: Pavimento de concreto asfáltico X2: Pavimento de concreto hidráulico.</p>
<p><u>Problemas específicos:</u></p> <p>a) ¿Cómo se diseñan los pavimentos aeroportuarios usando de las metodologías de la FAA?</p> <p>b) ¿Cuánto es la variación de presupuesto de ambos tipos de pavimentos aeroportuarios?</p> <p>c) ¿Qué tipos de fallas se presentan en los pavimentos aeroportuarios?</p> <p>d) ¿Cuál es la variación estructural que poseen los pavimentos aeroportuarios?</p>	<p><u>Objetivos específicos:</u></p> <p>a) Explicar el diseño de los pavimentos aeroportuarios según la metodología AC 150/5320-6D de la FAA y el software FAARFIELD.</p> <p>b) Realizar un análisis de costo y presupuesto de ambos tipo de pavimentos.</p> <p>c) Identificar las fallas que se producen para ambos tipos de pavimentos aeroportuarios.</p> <p>d) Realizar una evaluación estructural de los pavimentos en el software FAARFIELD.</p>	<p><u>Hipótesis específicas:</u></p> <p>a) Existen valores similares en el diseño de los pavimentos aeroportuarios por ambas metodologías de la FAA.</p> <p>b) El costo del pavimento asfáltico es 50% mayor que el pavimento de concreto hidráulico.</p> <p>c) El pavimento de concreto asfáltico presenta fallas más repentinas que el pavimento de concreto hidráulico.</p> <p>d) La evaluación de los pavimentos en FAARFIELD mostrará que el pavimento de concreto hidráulico posee menor deterioro estructural.</p>	<p><u>Variable dependiente:</u></p> <p>Y: Evaluación de los pavimentos Y1: Diseño. Y2: Costo. Y3: Fallas. Y4: Evaluación.</p>

Anexo 2: Curvas de diseño de pavimento de concreto asfáltico

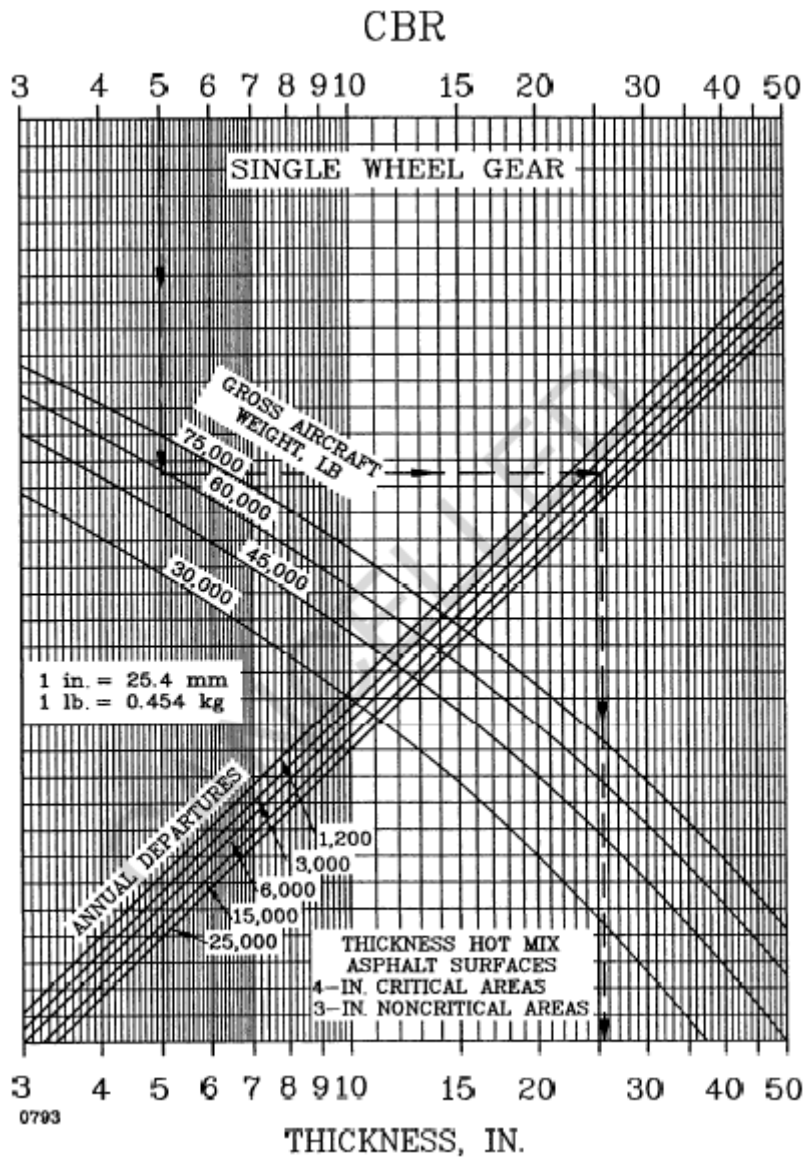


Figura 1

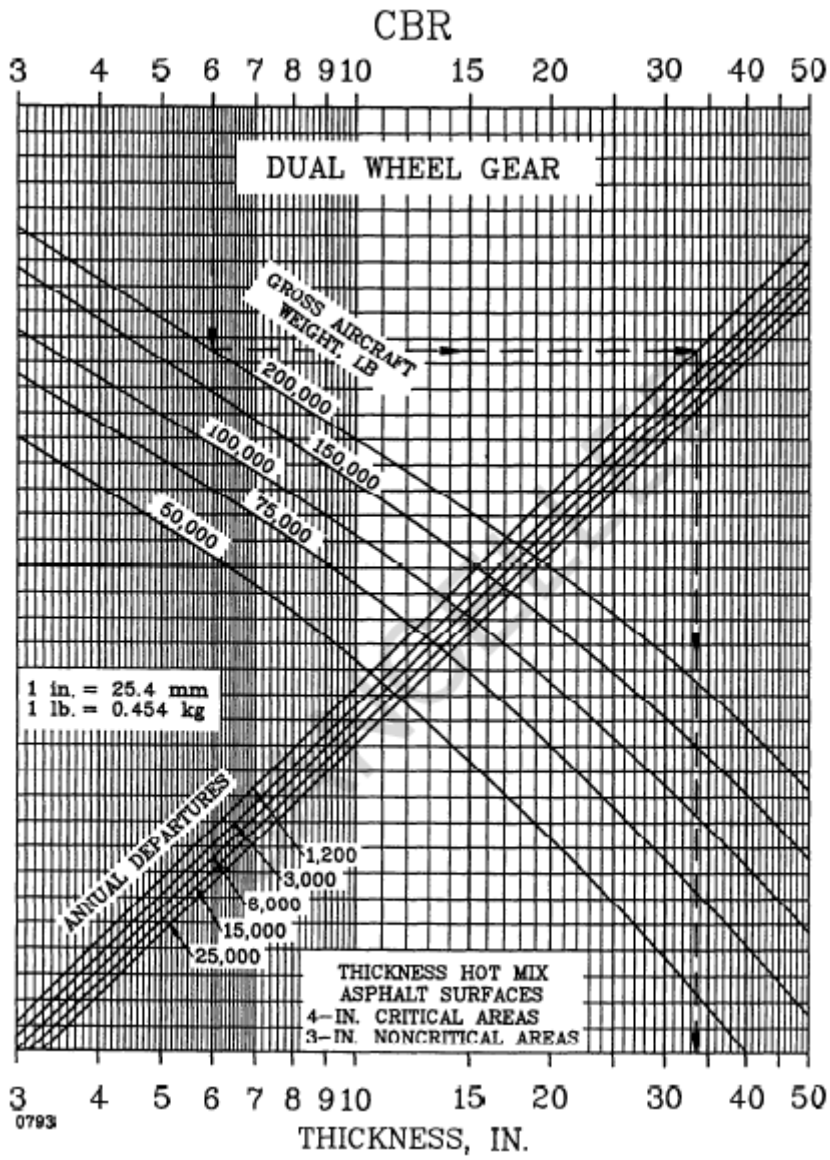


Figura 2

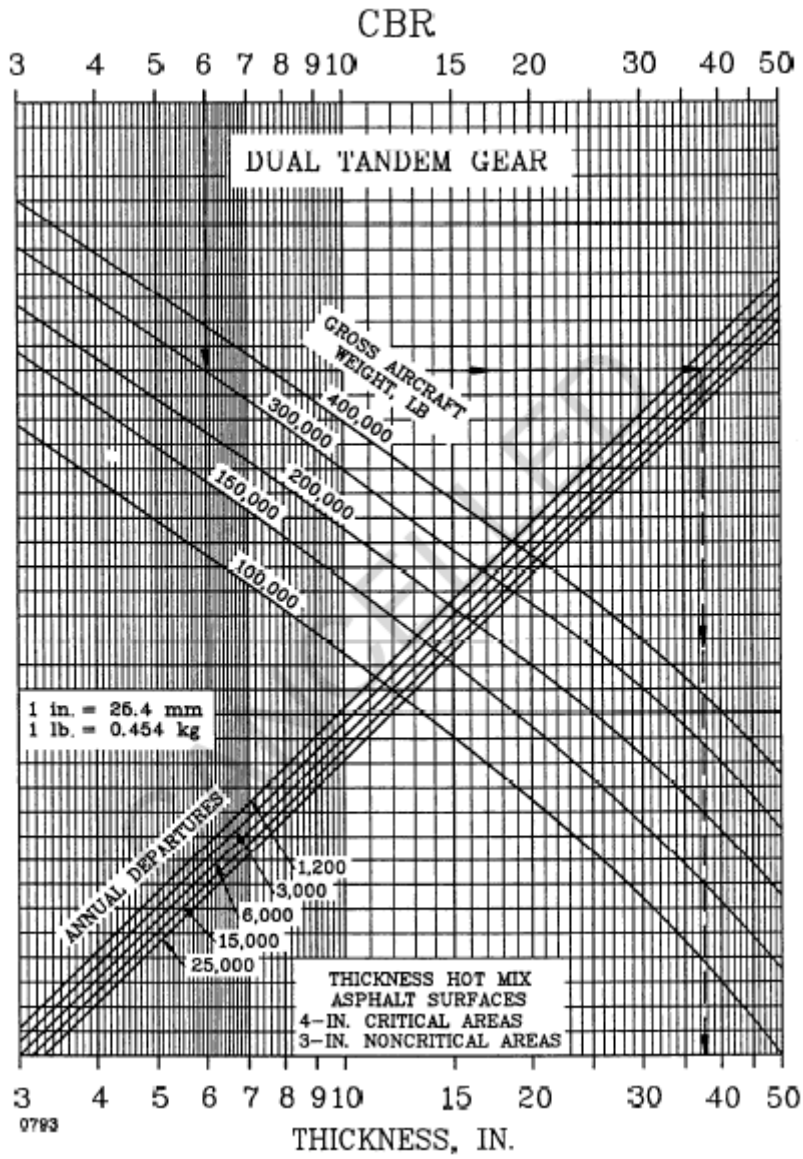


Figura 3

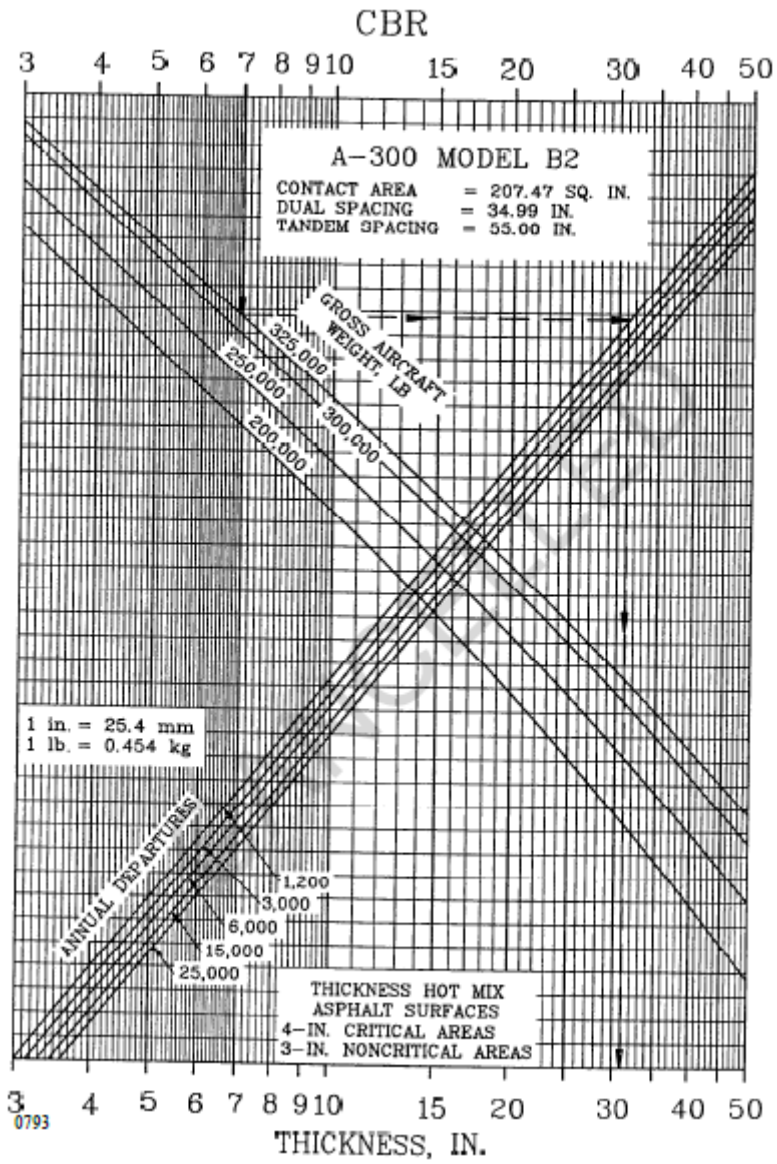


Figura 4

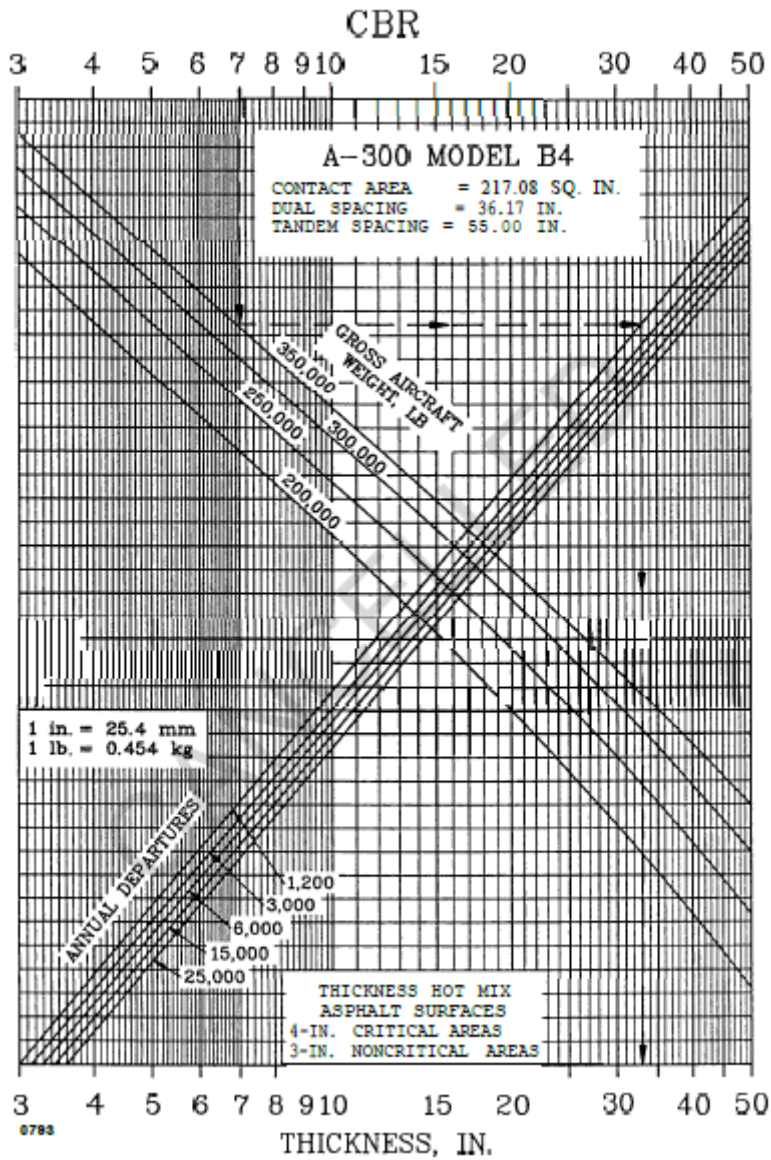


Figure 5

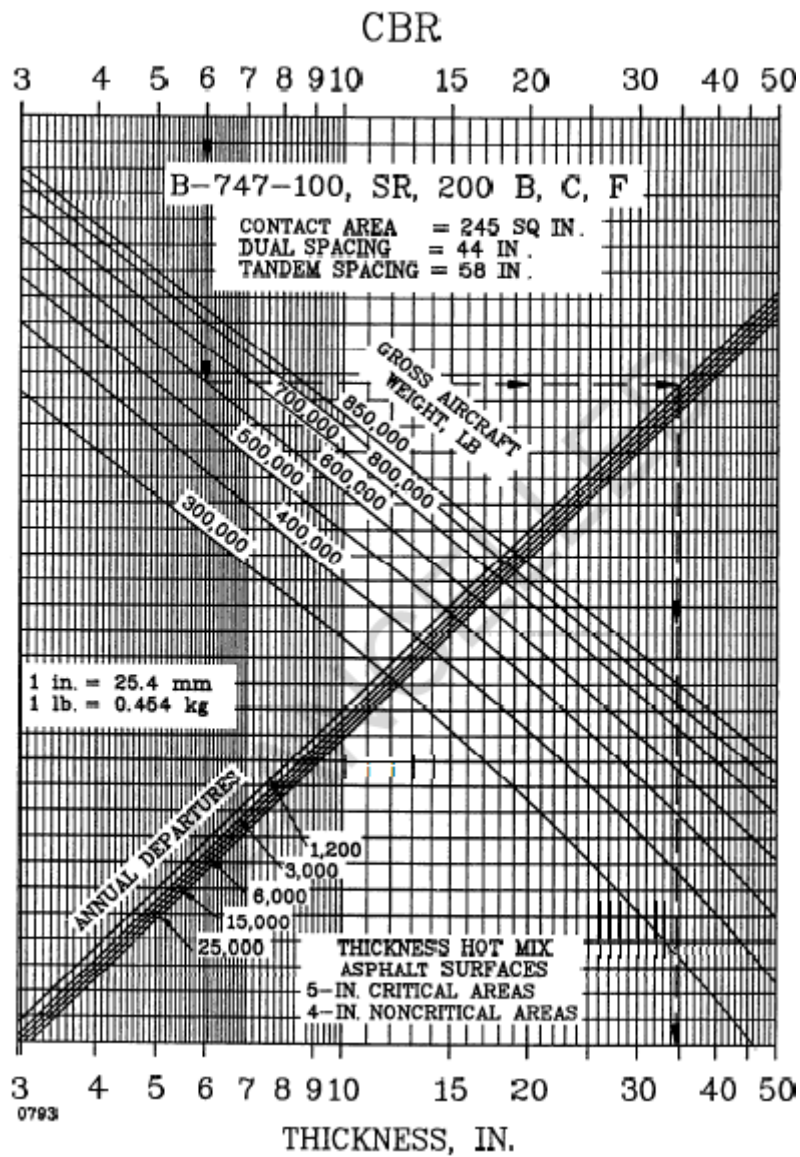


Figura 6

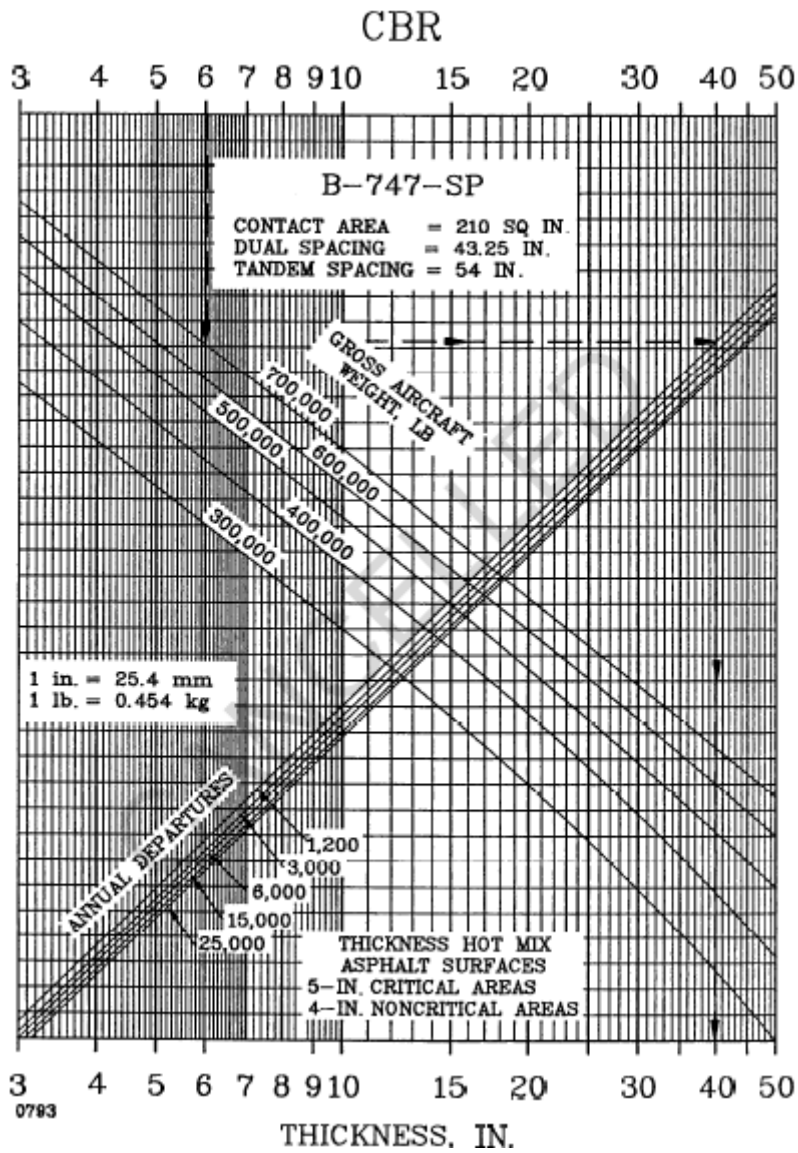


Figura 7

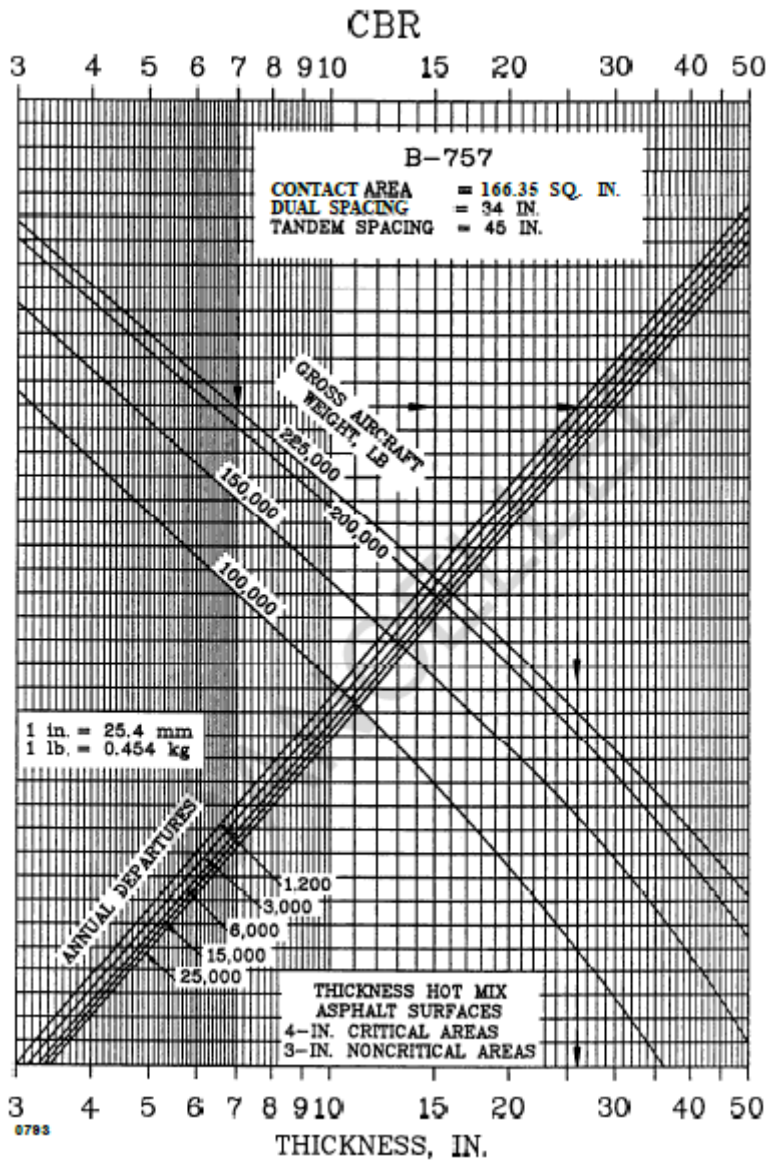


Figura 8

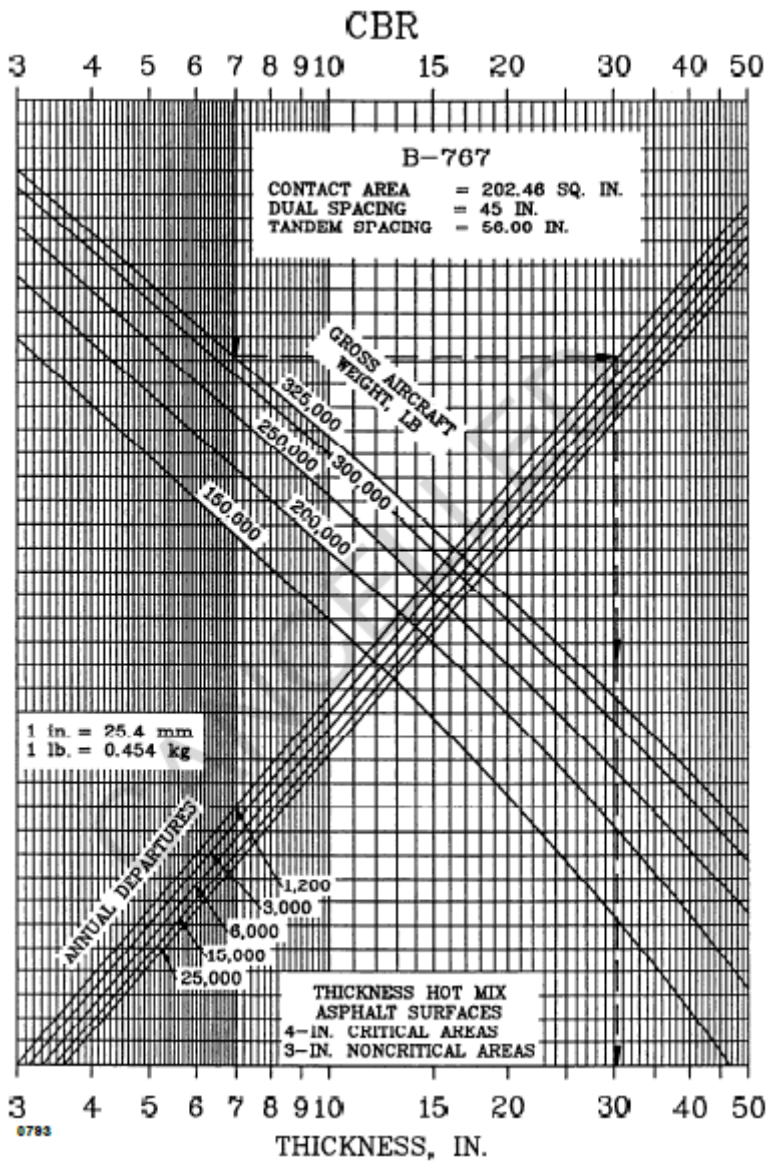


Figura 9

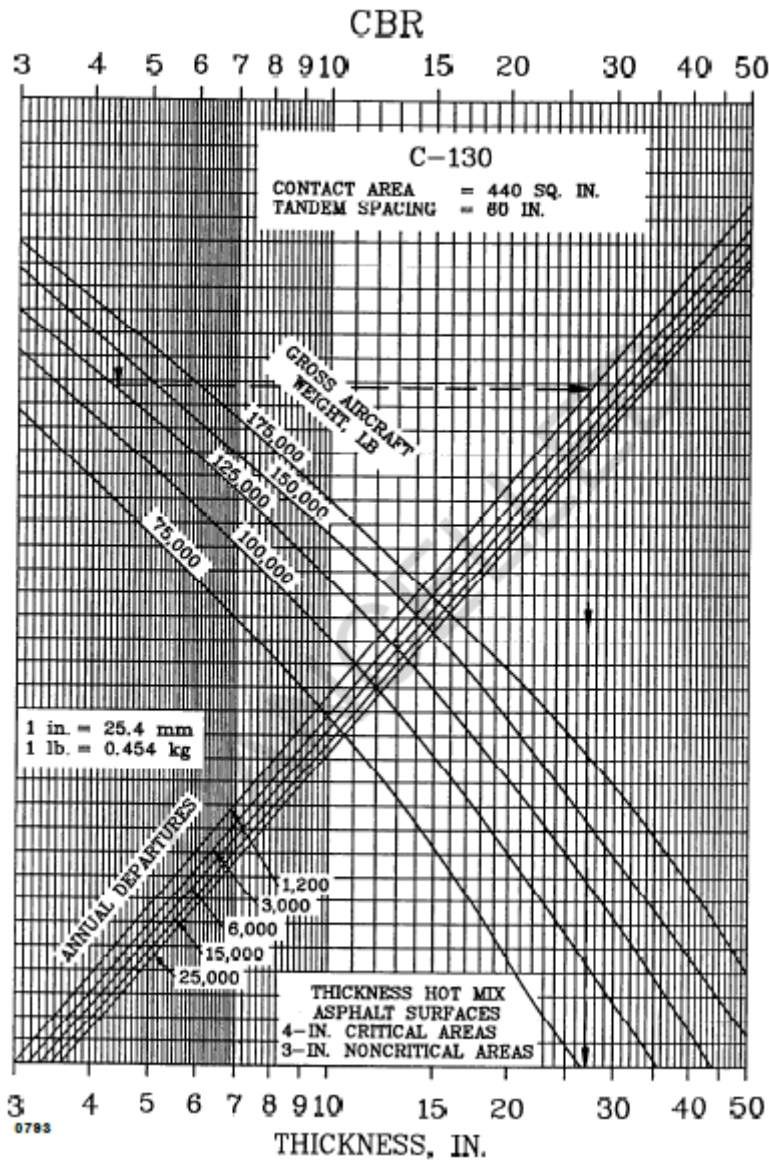


Figura 10

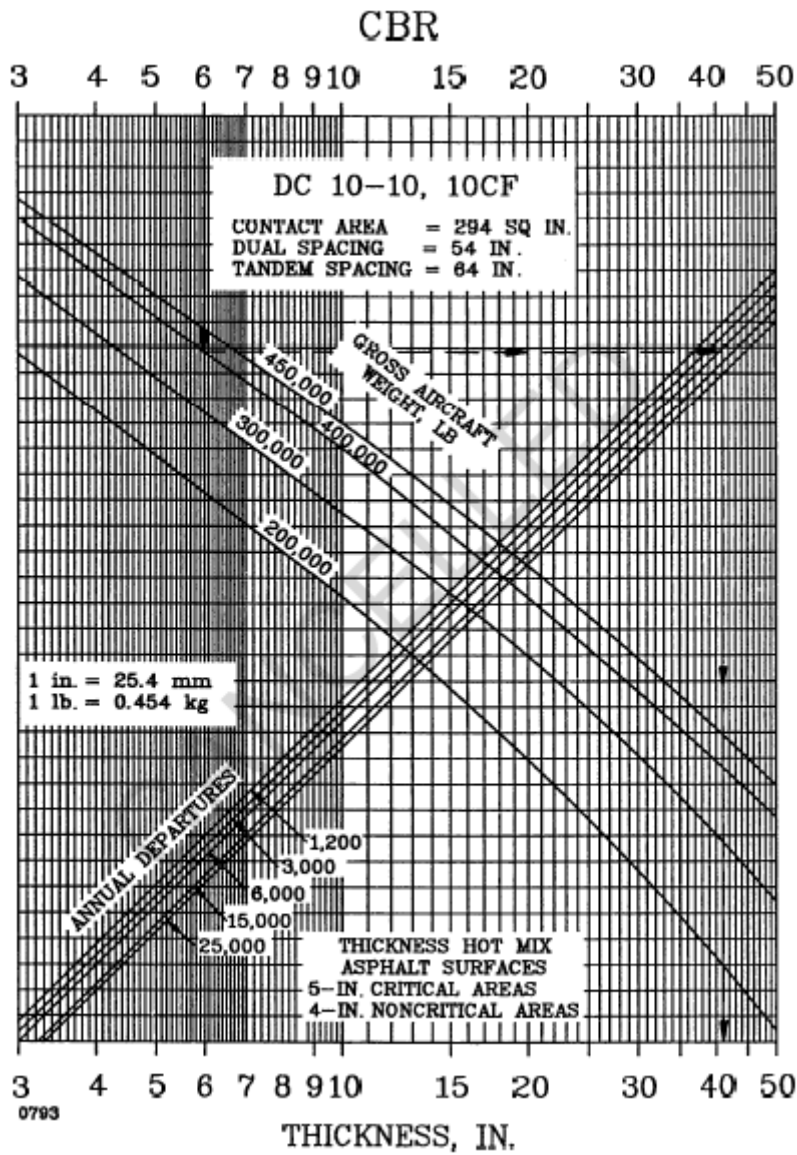


Figura 11

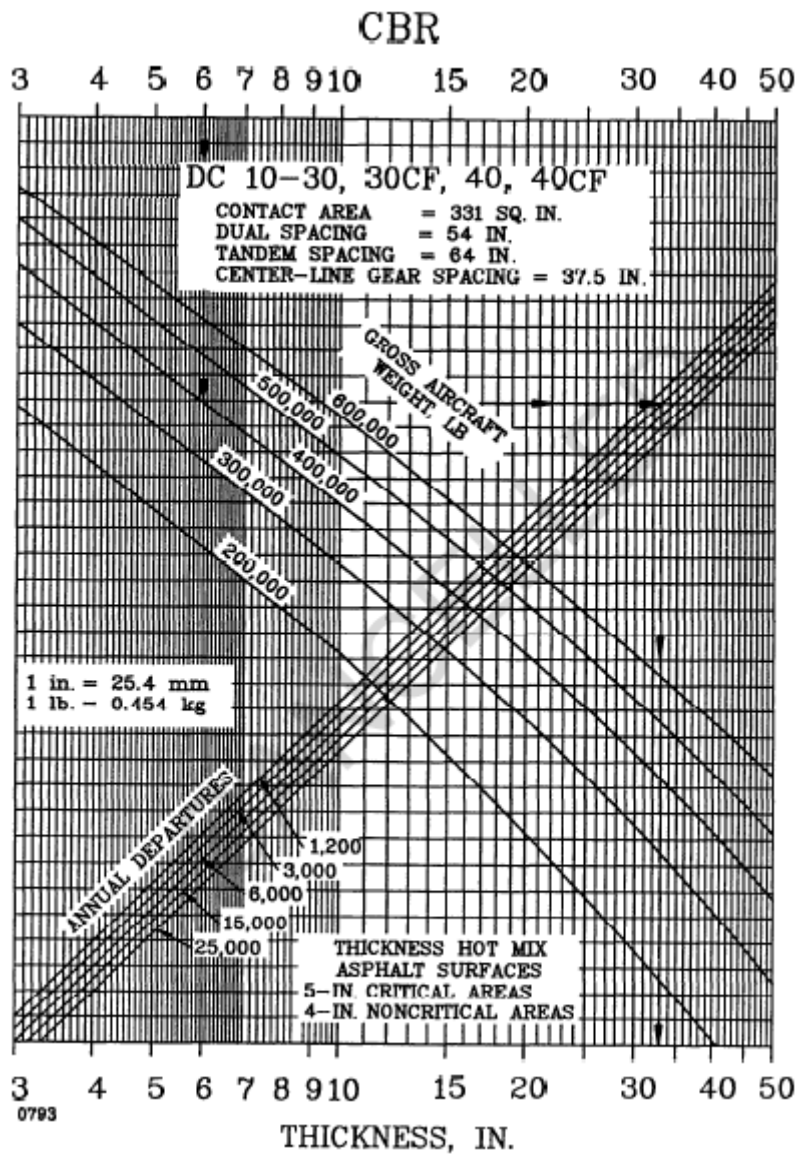


Figura 12

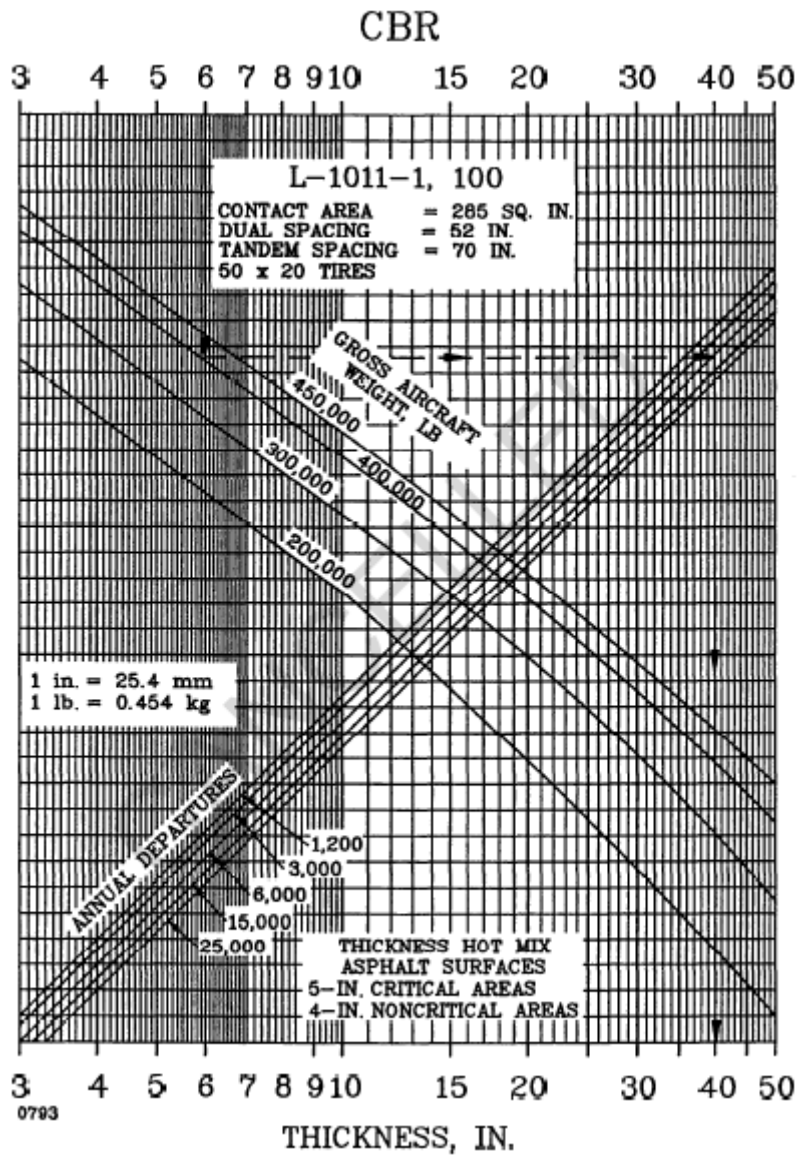


Figura 13

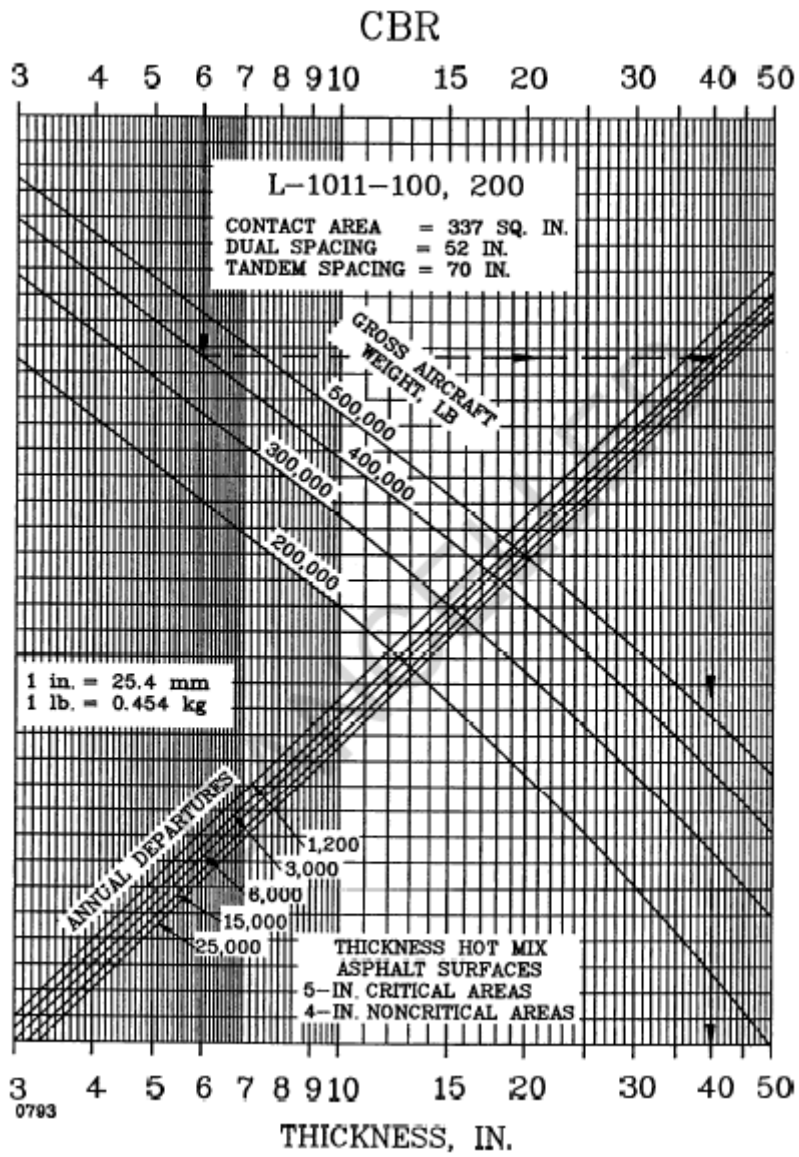


Figura 14

Anexo 3: Curvas de diseño de pavimento de concreto hidráulico.

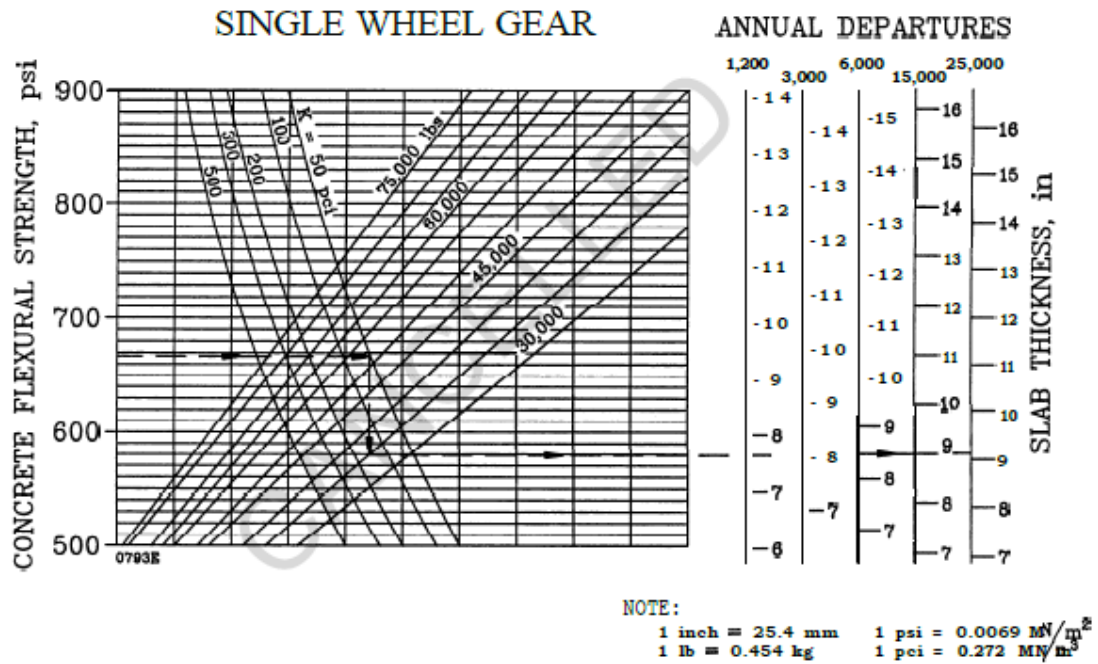


Figura 1

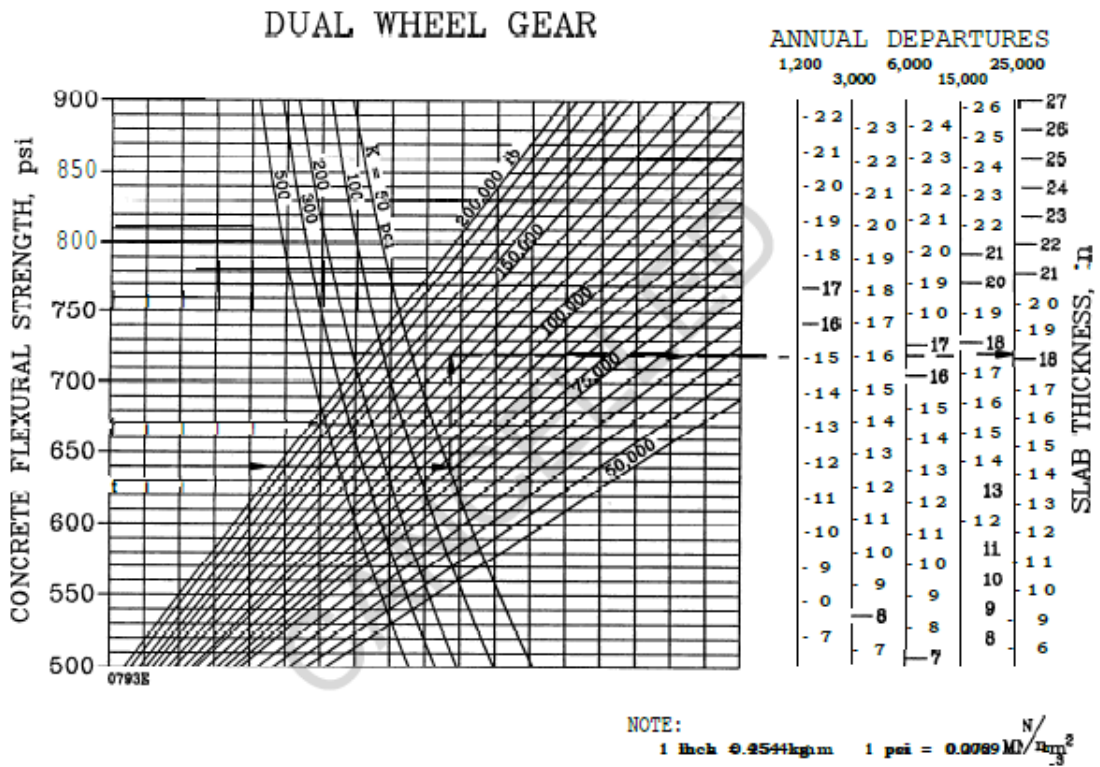


Figura 2

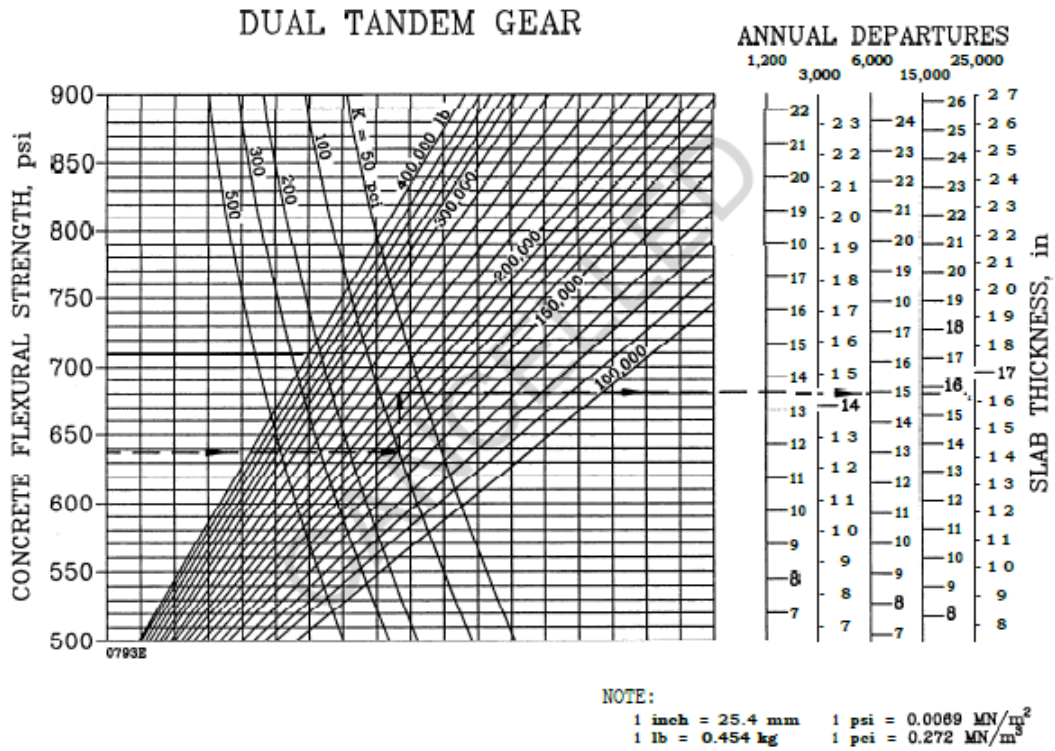


Figura 3

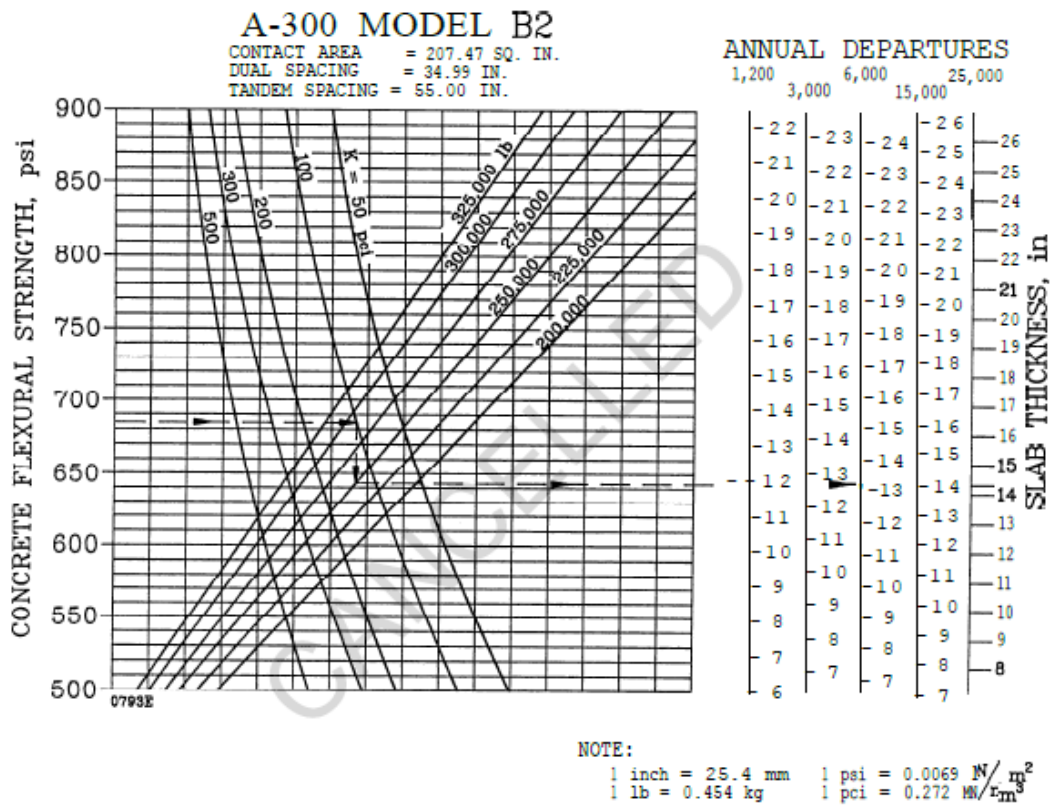


Figura 4

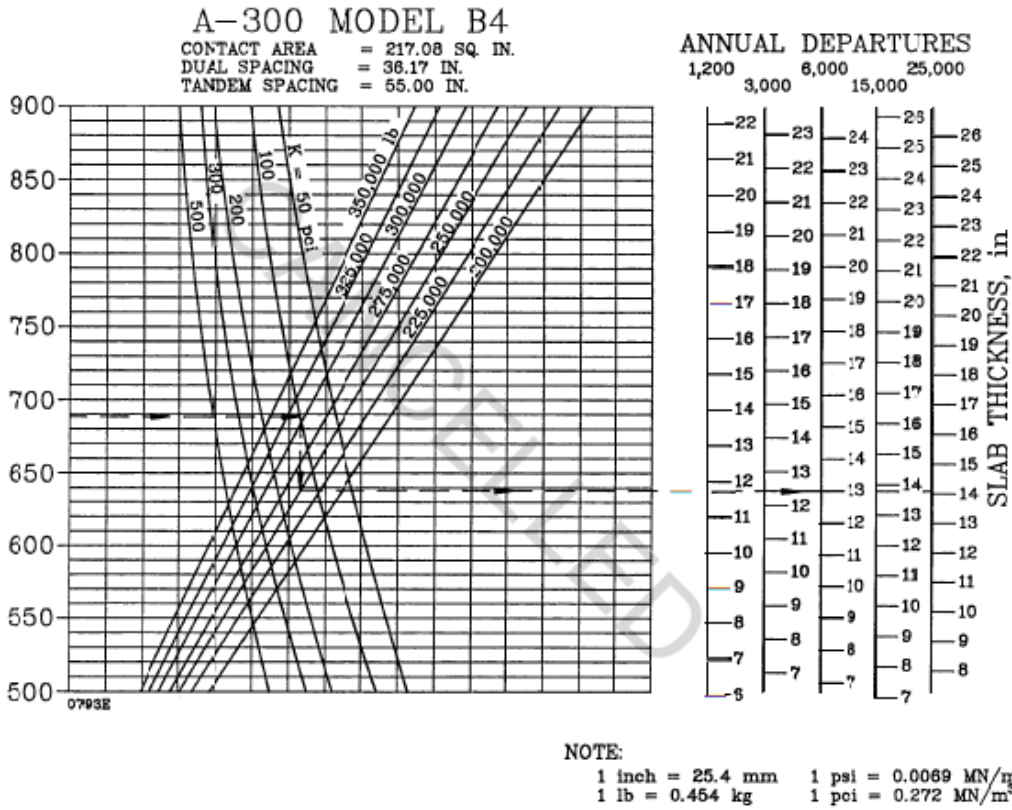


Figure 5

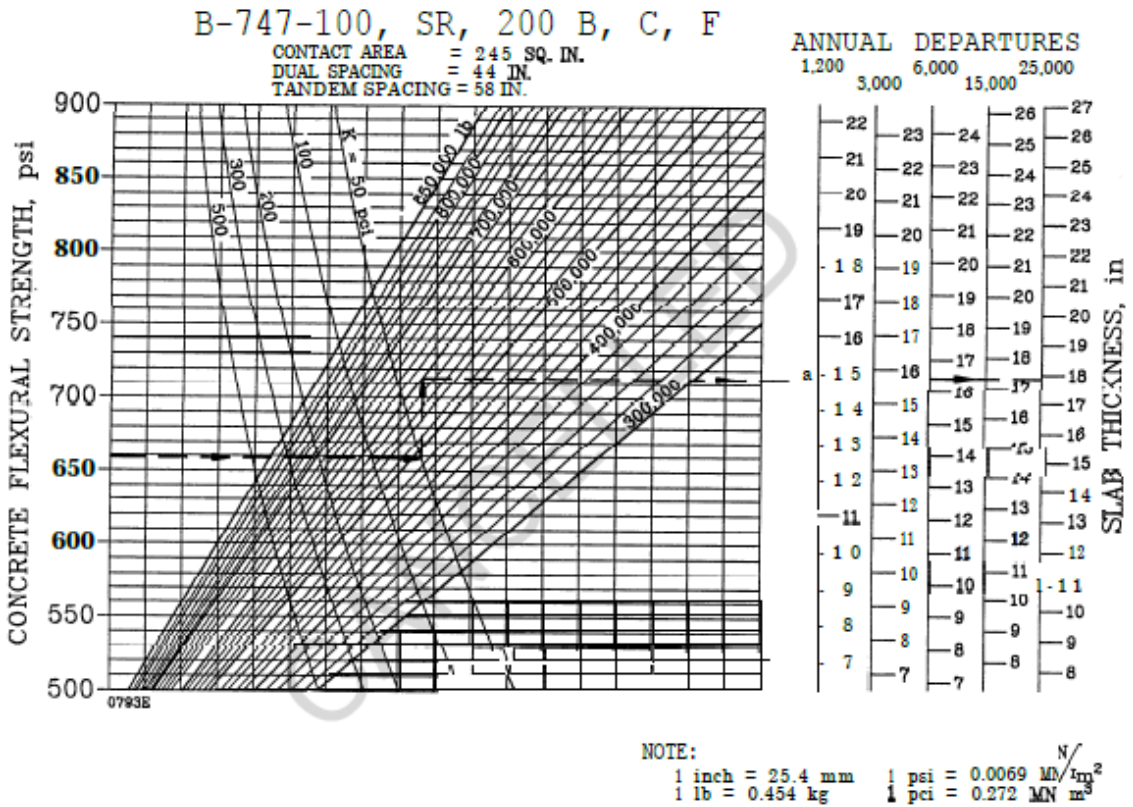


Figure 6

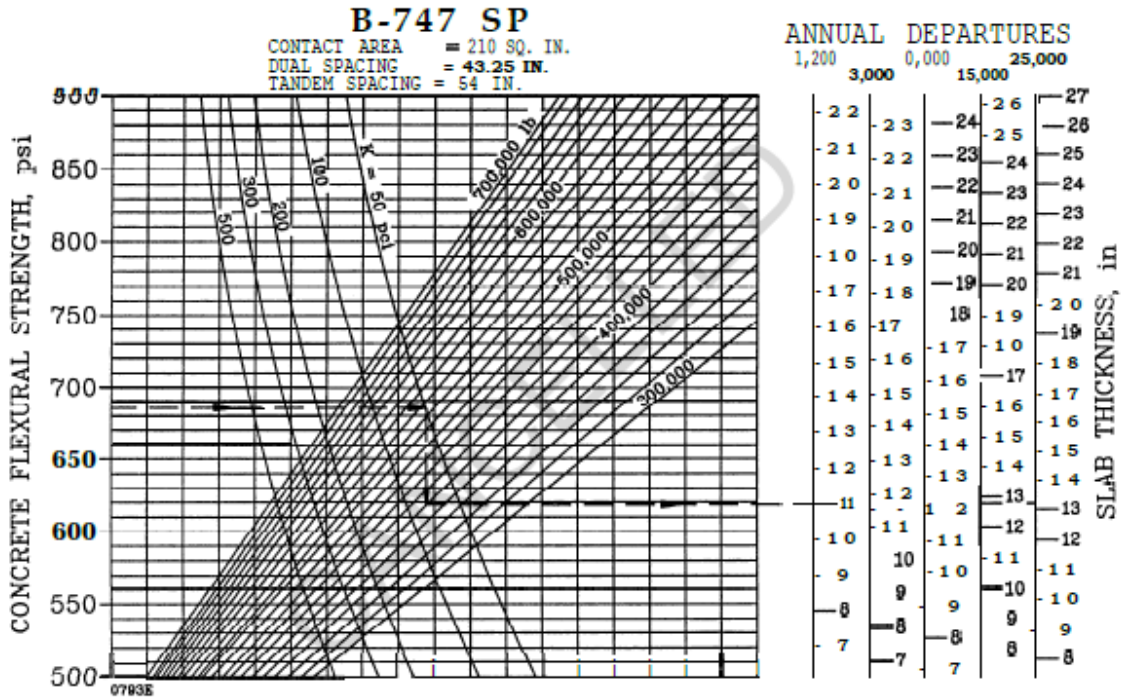


Figura 7

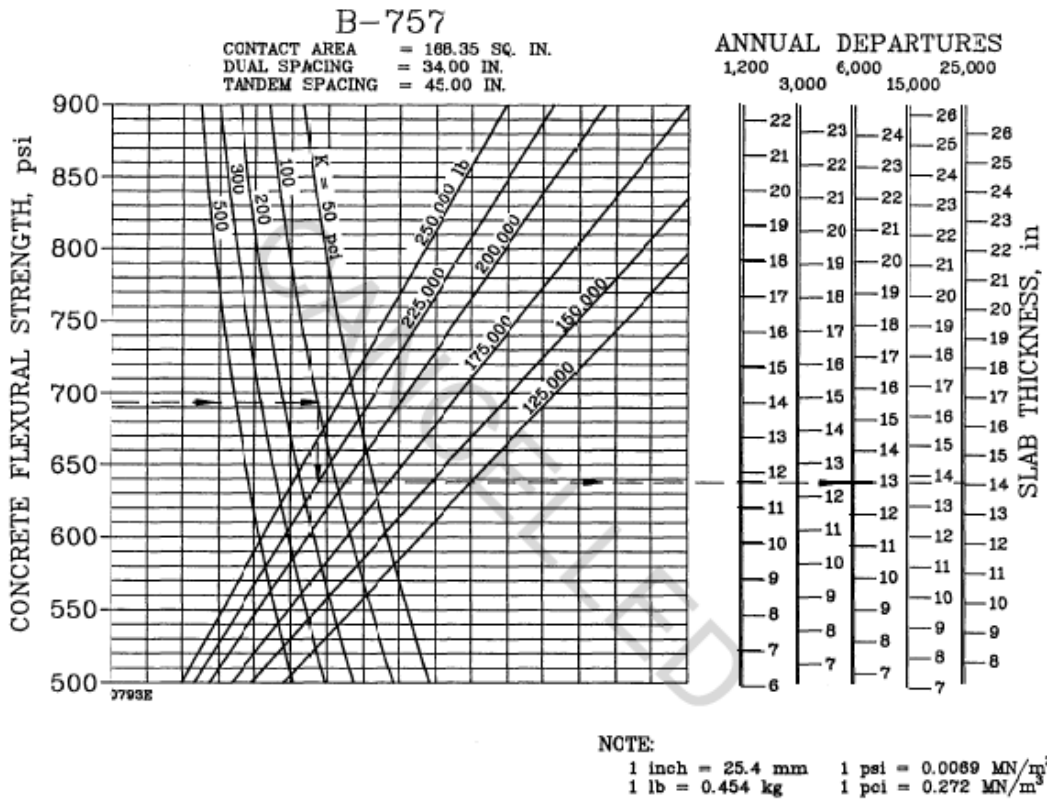


Figura 8

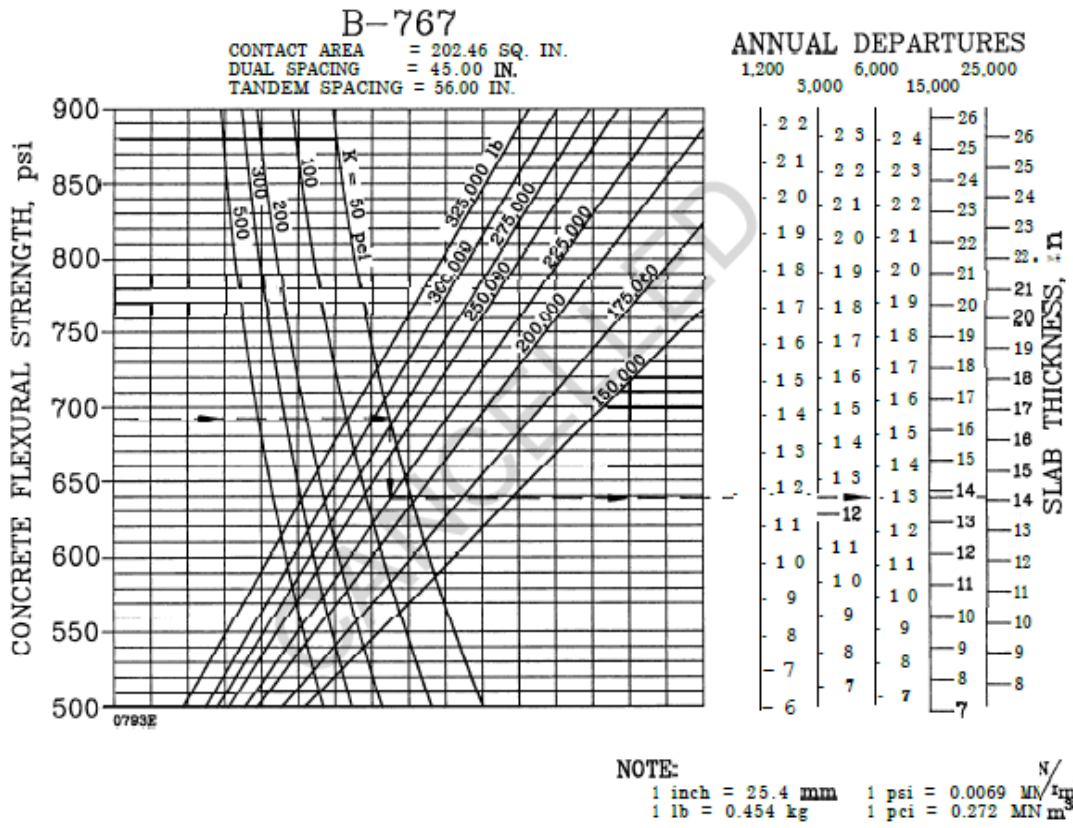


Figura 9

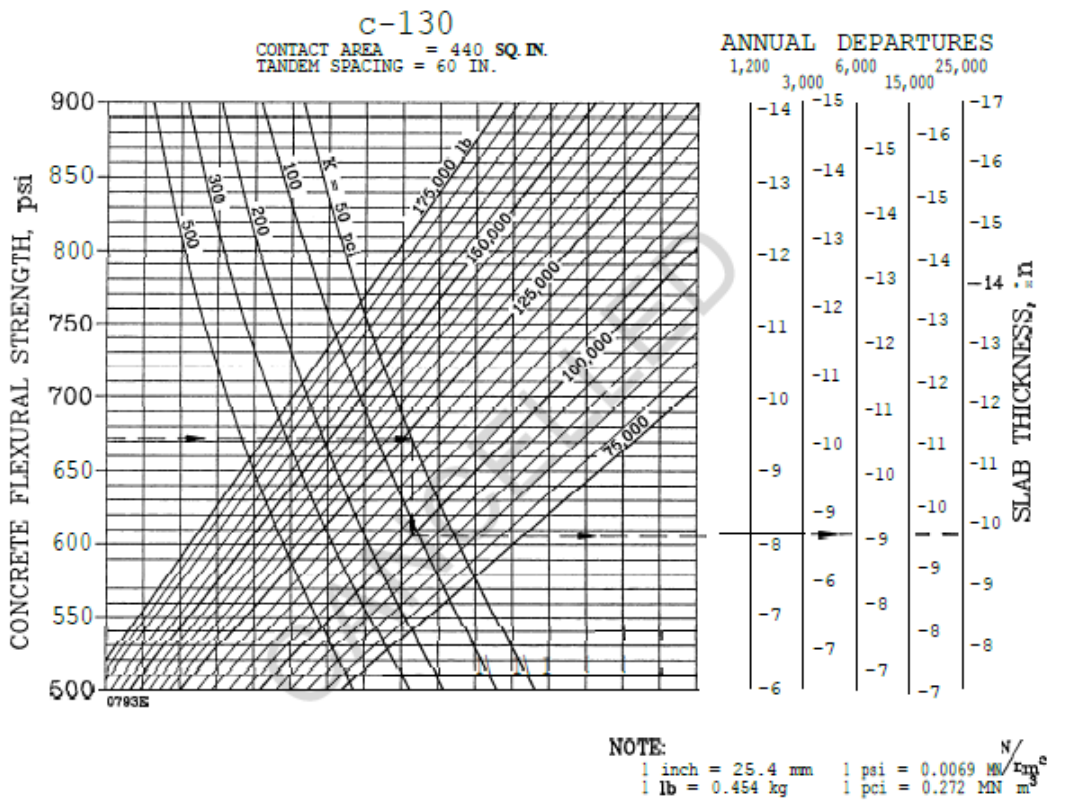


Figura 10

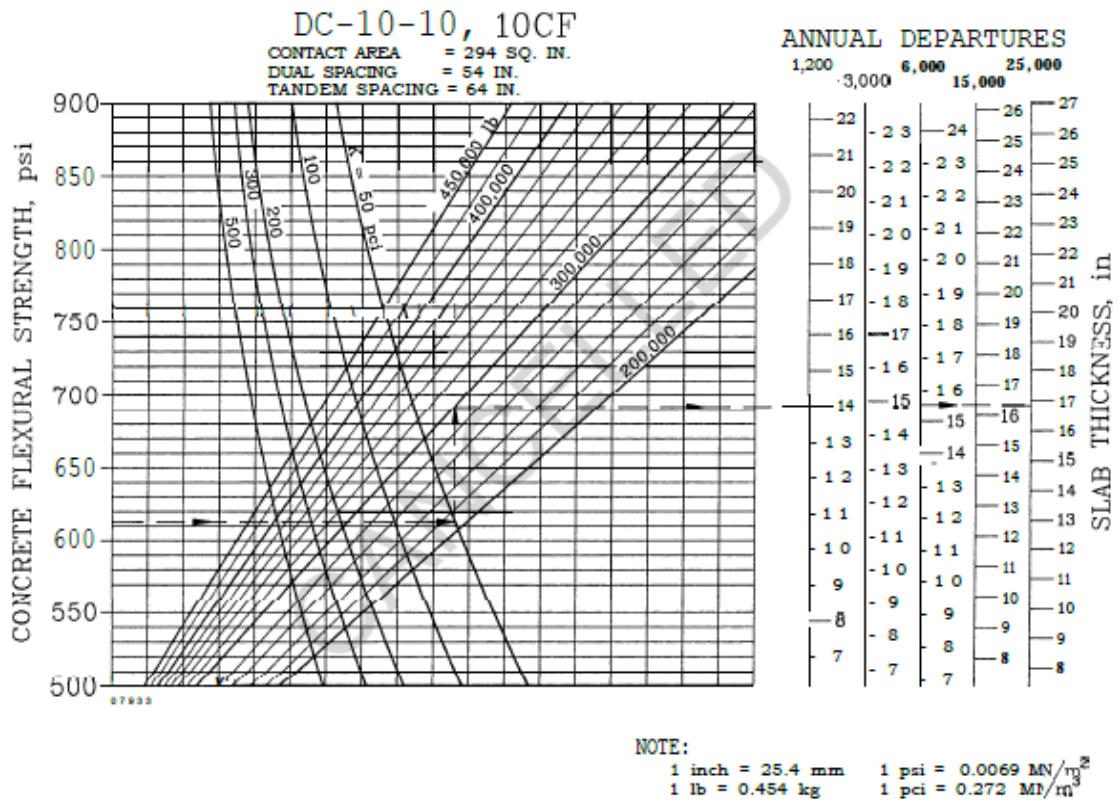


Figura 11

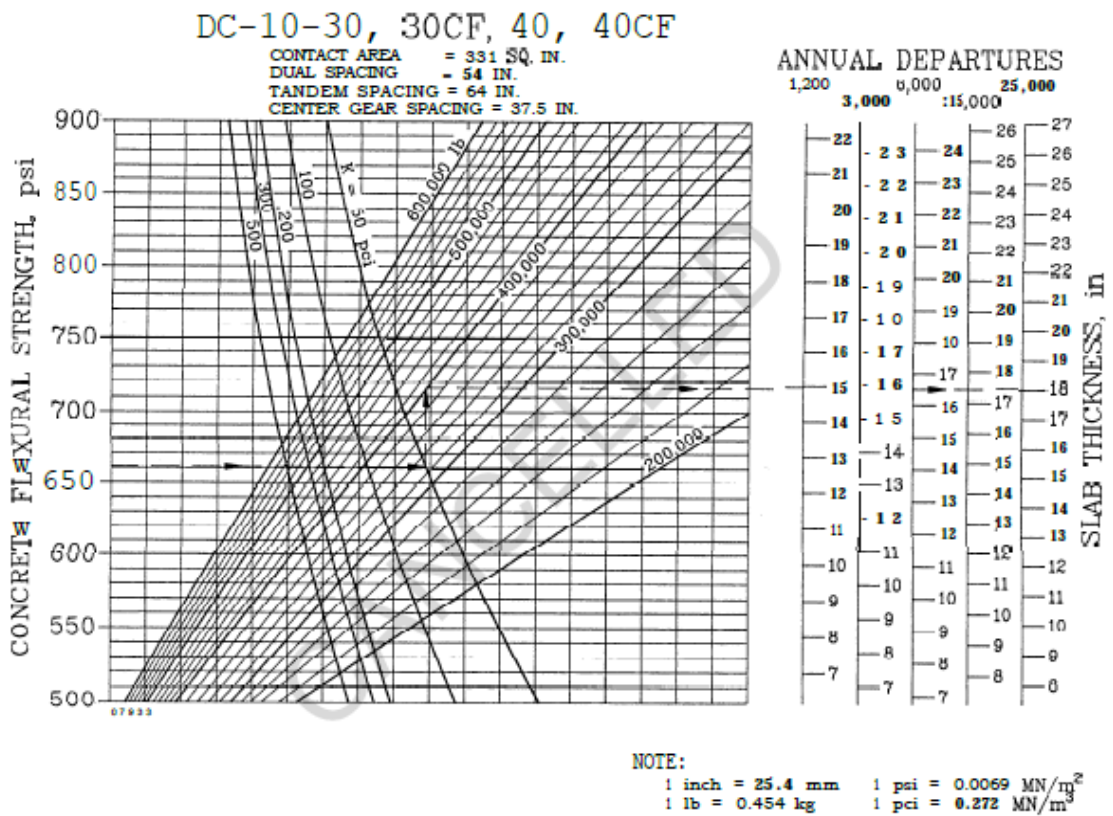


Figura 12

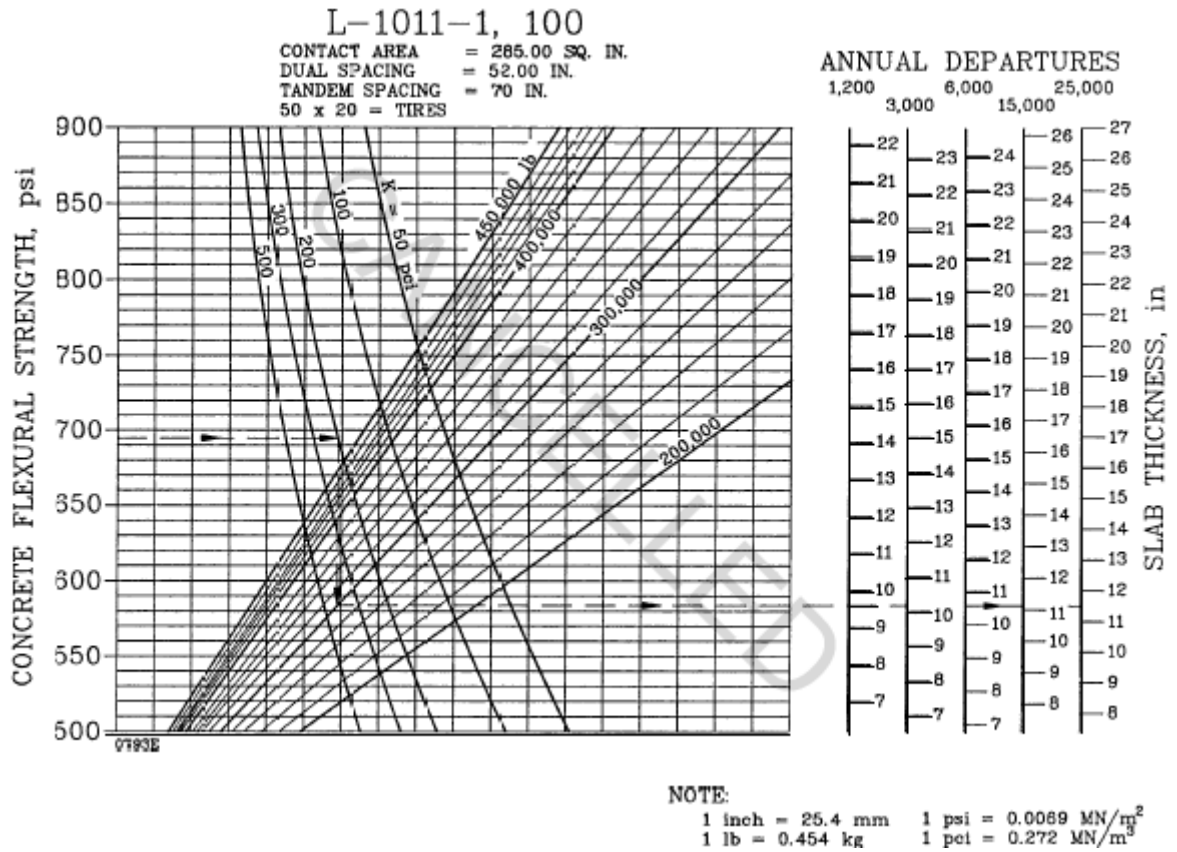


Figura 13

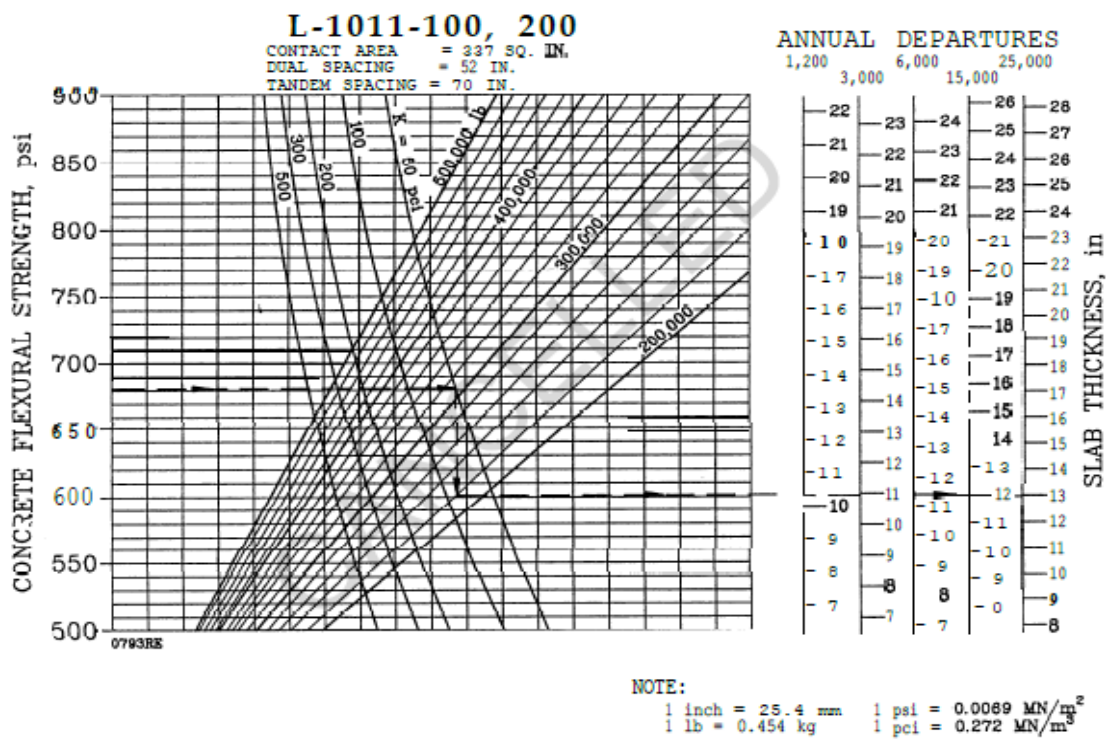


Figura 1

Anexo 4: Análisis de precios unitarios

Partida		1.01 Excavación a nivel de subrasante					
Rendimiento	m³/día M.O.:		570 EQ		570	Costo unitario directo por m³	5.19
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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	0.57	0.03
T tractor de orugas de 190-240 HP		hm		1	0.0140	310.88	4.36
							4.39

Partida		1.02 Apilamiento de material procedente de la excavación					
Rendimiento	m³/día M.O.:		650 EQ		650	Costo unitario directo por m³	4.29
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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	0.57	0.03
T tractor de orugas de 190-240 HP		hm		1	0.0123	310.88	3.83
							3.86

Partida		1.03 Eliminación de material excedente procedente de las excavaciones					
Rendimiento	m³/día M.O.:		480 EQ		480	Costo unitario directo por m³	6.95
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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	4.17
Camión volquete de 15 m³		hm		1	0.0167	145	2.42
							6.59

Partida		1.04 Conformación de la subrasante					
Rendimiento	m³/día M.O.:	1200 EQ		1200		Costo unitario directo por m²	10.82
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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		m³		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	m³/día M.O.:	462 EQ		462		Costo unitario directo por m²	55.22
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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		m³		0.1200	38.94		4.67
Material de subbase		m³		1.2500	32.7		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	m³/día M.O.:	396 EQ		396		Costo unitario directo por m²	69.95
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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		m³		0.1200	38.94		4.67
Material de subbase		m³		1.2500	43.20		54.00
							58.67
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5	1.71		0.07
Rodillo liso vibratorio autopropulsado		hm	1	0.0202	203.88		4.12
Motoniveladora de 145-150 HP		hm	1	0.0202	270.41		5.46
							9.65

Partida		2.02.01 Concreto premezclado con resistencia a flexión 50 kg/cm ²					
Rendimiento	m ³ /día M.O.:		400 EQ		400	Costo unitario directo por m ²	431.25
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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	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 ³ /día M.O.:		650 EQ		650	Costo unitario directo por m ²	4.23
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
Mano de obra							
Capataz		hh	0.2	0.0025	24.34	0.06	
Operario		hh	2	0.0246	18.72	0.46	
Peón		hh	4	0.0492	13.99	0.69	
						1.21	
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 ³ /día M.O.:		14 EQ		14	Costo unitario directo por m ²	71.67
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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	6.1	0.61	
Desmoldante		kg		0.4000	26.94	10.78	
Estacas de madera		und		4.0000	0.9	3.60	
Triplay de 19 mm para encofrado		pln		0.1200	98.5	11.82	
						26.81	
Equipos							
Herramientas manuales		%mo		5	38.35	1.92	1.92

Partida		2.02.07 Junta de construcción					
Rendimiento	m³/día M.O.:		200 EQ		200	Costo unitario directo por m²	12.08
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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 construcción					
Rendimiento	m³/día M.O.:		180 EQ		180	Costo unitario directo por m²	12.84
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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	1.22	0.06	
Costadora de pavimento inc. Disco		hm	25	1.1111	5.63	6.26	
						6.32	

Partida		2.03.01 Imprimación asfáltica					
Rendimiento	m³/día M.O.:		4500 EQ		4500	Costo unitario directo por m²	3.72
		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Descripción del recurso							
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	1.5	1.81	
						1.81	
Equipos							
Compresora neumática 87 HP 250-330 PCM		hm	1	0.0018	115.91	0.21	
Minicargador 70 HP 0.5 YD		hm	1	0.0018	102.81	0.19	
Camión imprimador 210 HP 2000 GLN		hm	1	0.0018	181.55	0.33	
Herramientas manuales		%mo		5.0000	0.2	1.00	
						1.72	

Partida	2.03.02 Pavimento de concreto asfáltico en caliente						
Rendimiento	m ³ /día M.O.:		239 EQ	239		Costo unitario directo por m ²	241.04
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		216.59
							216.59
Equipos							
Pavimentadora sobre orugas 105 HP		hm		1	0.0335	182.06	6.10
Rodillo neumático autopropulsado 135 HP 9-26 TN		hm		1	0.0335	166.14	5.57
Rodillo tandem vibratorio autopropulsado 111-130 HP 9-11 TN		hm		1	0.0335	246.71	8.26
Herramientas manuales		%mo		5.0000	5.35		0.27
							20.20

Fuente: “Diseño de pavimento del aeropuerto internacional de Pisco”, por Karla R. Rondo, 2018.

Anexo 5: Presupuesto de construcción de pavimento de concreto hidráulico

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	Precio (S/.)	Parcial (S/.)
1.00	Movimiento de tierras				S/ 3,608,078.75
1.01	Corte a nivel de subrasante	m ³	113442.00	4.75	S/ 538,849.50
1.02	Perfilado y compactación de subrasante	m ²	155400.00	0.78	S/ 121,212.00
1.03	Eliminación de material de corte y/o demolición	m ³	147474.60	19.99	S/ 2,948,017.25
2.00	Pavimentos				S/ 26,704,976.49
2.01	Subbase granular	m ³	51282.00	34.63	S/ 1,775,895.66
2.02	Concreto + Pavimentadora	m ³	62160.00	377.6	S/ 23,471,616.00
2.03	Alisado, acabado y curado	m ³	62160.00	3.04	S/ 188,966.40
2.04	Barras de amarre $\Phi 5/8"$ x 0.75 @ 0.75 m	kg	27119.19	2.95	S/ 80,001.61
2.05	Dowels $\Phi 1\frac{1}{2}$ x.51m @.45	kg	206279.72	3.52	S/ 726,104.61
2.06	Corte de juntas	ml	38455.60	1.52	S/ 58,452.51
2.07	Sellado de juntas	ml	38455.60	4.33	S/ 166,512.75
2.08	Canastilla para dowels	ml	20955.60	11.33	S/ 237,426.95
Costo total directo		S/	30,313,055.25		

Fuente: "Diseño del pavimento de un aeropuerto", por Fabiola Delgado y Candy Quispe, 2012.

Anexo 6: Presupuesto de pavimento de concreto asfáltico y concreto hidráulico.

Presupuesto						
Presupuesto	0213001 DISEÑO DEL PAVIMENTO EN EL ÁREA DE MOVIMIENTO DEL AEROPUERTO MÓRROPE . LAMBAYEQUE					
Subpresupuesto	001 PAVIMENTO FLEXIBLE					
Ciudad	MORROPE				Costo al	2019
Lugar	LAMBAYEQUE - LAMBAYEQUE - MORROPE					
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.	
01	TRABAJOS PRELIMINARES				35,420.11	
01.01	MOVILIZACION Y DEMOVILIZACION DE EQUIPO Y MAQUINARIA	gib	1.00	30,000.00	30,000.00	
01.02	TRAZO Y REPLANTEO	km	6.60	821.23	5,420.11	
02	MOVIMIENTO DE TIERRAS				6,209,644.93	
02.01	CORTE	m ³	139,236.90	6.00	834,905.44	
02.02	RELLENO COMPENSADO	m ³	8,666.50	4.01	34,737.95	
02.03	RELLENO CON MATERIAL DE CANTERA	m ³	119,550.71	10.25	1,225,932.06	
02.04	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE CON VOLQUETES	m ³	130,570.40	8.42	1,098,940.84	
02.05	PERFILADO COMPACTADO Y CONFORMACION DE SUBRASANTE	m ²	271,800.00	11.39	3,096,178.64	
03	PAVIMENTOS				50,873,255.70	
03.01	SUB BASE					
03.01.1	CAPA DE SUB BASE e = 0.40M (02 CAPAS DE 0.20M)	m ²	159,000.00	20.80	3,307,015.94	
03.01.2	CAPA DE SUB BASE e = 0.50M (02 CAPAS 0.15M + 01 CAPA DE 0.20M)	m ²	6,900.00	26.79	184,842.90	
03.01.3	CAPA DE SUB BASE e = 0.55M (03 CAPAS DE 0.15M + 01 CAPA DE 0.20M)	m ²	99,000.00	34.98	3,463,369.36	
03.02	BASE					
03.02.1	CAPA DE BASE e = 0.15M (01 CAPAS DE 0.15M)	m ²	112,800.00	11.28	1,272,496.56	
03.02.2	CAPA DE BASE e = 0.20M (01 CAPA DE 0.20M)	m ²	159,000.00	12.70	2,018,744.26	
03.03	IMPRIMACION					
03.03.1	IMPRIMACION ASFALTICA	m ²	271,800.00	2.44	664,421.13	
03.03.2	RIEGO DE LIGA	m ²	172,800.00	2.44	422,413.44	
03.04	PAVIMENTO ASFÁLTICO EN CALIENTE					
03.04.1	CARPETA ASFALTICA DE E=2"	m ³	6,330.00	731.81	4,632,387.50	
03.04.2	CARPETA ASFALTICA DE E=3"	m ³	23,850.00	1,463.63	34,907,564.60	
	Costo Directo				57,199,370.74	
SON: Cincuenta y Siete Millones Ciento Noventa y Nueve Mil Trescientos Setenta Soles Con 74/100						

Figura 1: Presupuesto de diseño de pavimento flexible. Fuente: José Delgado y José Gonzales, 2019

Presupue	0203001 DISEÑO DEL PAVIMENTO EN EL ÁREA DE MOVIMIENTO DEL AEROPUERTO MÓRROPE - LAMBAYEQUE				
Subpresu	001 PAVIMENTO RÍGIDO				
Cliente	MORROPE			Costo al	2019
Lugar	LAMBAYEQUE - LAMBAYEQUE - MORROPE				
Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio S/.	Parcial S/.
01	TRABAJOS PRELIMINARES				35,420.11
01.01	MOVILIZACION Y DEMOVILIZACION DE EQUIPO Y	glb	1.00	30,000.00	30,000.00
01.02	TRAZO Y REPLANTEO	km	6.60	821.23	5,420.11
02	MOVIMIENTO DE TIERRAS				6,440,828.77
02.01	CORTE	m3	147,699.90	6.01	887,065.53
02.02	RELLENO COMPENSADO	m3	13,784.20	4.06	55,947.97
02.03	RELLENO CON MATERIAL DE CANTERA	m3	118,898.22	10.71	1,273,153.50
02.04	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE CON VOLQUETES	m3	129,305.70	8.69	1,123,150.06
02.05	PERFILADO COMPACTADO Y CONFORMACION DE	m2	271,800.00	11.41	3,101,511.70
03	PAVIMENTOS				61,313,400.13
3.01	BASE				
3.01.01	CAPA DE BASE e = 0.20M (01 CAPAS DE 0.20M)	m2	159,000.00	12.69	2,017,233.46
3.01.02	CAPA DE BASE e = 0.30M (02 CAPAS DE 0.15M)	m2	13,800.00	22.54	311,093.29
3.01.03	CAPA DE BASE e = 0.45M (03 CAPA DE 0.15M)	m2	54,000.00	33.81	1,825,982.35
3.02	LOSA DE CONCRETO MR=42KG/CM2				
03.02.01	CONCRETO MR = 42	m3	123,360.00	360.52	44,474,325.76
03.02.02	DOWELS Ø 2" x 0.60 m @ 0.45 m	kg	1,208,943.44	3.53	4,263,527.64
03.02.03	BARRAS DE AMARRE ø 5/8 x 75m @ 0.75m	kg	51,368.47	6.04	310,218.83
03.02.04	CORTE DE JUNTAS	ml	263,640.00	2.42	638,879.02
03.02.05	SELLADO DE JUNTAS	ml	263,640.00	25.98	6,848,209.29
03.02.06	CURADO DE LOSA DE CONCRETO	m2	271,800.00	2.30	623,930.49
	Costo Directo				67,789,649.01
SON	Sesenta y Siete Millones Setecientos Ochenta y Nueve Mil Seiscientos Cuarenta y Nueve Soles Con 01/100				

Figura 2: Presupuesto de pavimento rígido. Fuente: José Delgado y José Gonzales, 2019