



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE
LA PISTA DE ATERRIZAJE DE UN AEROPUERTO
INTERNACIONAL EN LA REGIÓN DE PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. SERGIO ELAR COILA MAYTA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO - PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO D
E PAVIMENTOS DE LA PISTA DE ATERRI
ZAJE DE UN AEROPUERTO INTERNACIO
NAL EN LA REGIÓN DE PUNO**

AUTOR

SERGIO ELAR COILA MAYTA

RECuento de palabras

47467 Words

RECuento de caracteres

237722 Characters

RECuento de páginas

224 Pages

Tamaño del archivo

9.5MB

Fecha de entrega

Jun 18, 2024 8:02 AM GMT-5

Fecha del informe

Jun 18, 2024 8:06 AM GMT-5

● **11% de similitud general**

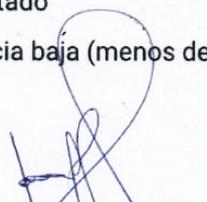
El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 10% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)


Ing. Samuel Huancisco Cáceres
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 2007537

VOS

Ing. Jaime Medina Leiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 910545
SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN
FPIIC

Resumen



DEDICATORIA

A mi padre Santiago y mi madre María por su comprensión, estímulo constante y apoyo total durante mi carrera profesional.

A mis hermanos por motivarme para superarme día a día.

Sergio Elar Coila Mayta



AGRADECIMIENTOS

A Jehová, por permitirme tener y disfrutar a mi familia. A mi familia por confiar en mí y permitirme cumplir con el desarrollo de esta tesis. A mi asesor de tesis Dr. Samuel Huaquisto Cáceres por compartir sus conocimientos de manera desinteresada y su apoyo incondicional. Sus aportes y comentarios han sido muy importantes para poder lograr los objetivos trazados. A mis jurados de tesis: M.Ing. Cesar Edwin Guerra Ramos, M.Sc. Fausto Ponciano Mamani Mamani e Ing. Gleny Zoila De La Riva Tapia por las facilidades brindadas en desarrollo del presente. Y a todos aquellos que han contribuido en la realización de la presente tesis.

Sergio Elar Coila Mayta



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2.1. Problema general.....	21
1.2.2. Problemas específicos	21
1.3. HIPÓTESIS	22
1.3.1. Hipótesis general	22
1.3.2. Hipótesis específicas	22
1.4. JUSTIFICACIÓN	23
1.5. OBJETIVOS.....	25
1.5.1. Objetivo general	25
1.5.2. Objetivos específicos	26
1.6. VARIABLES	26
1.6.1. Variables independientes	26



1.6.2. Variables dependientes..... 27

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	28
2.1.1.	Antecedentes Internacionales	29
2.1.2.	Antecedentes Nacionales	34
2.2.	ENTIDADES DEL TRANSPORTE AÉREO.....	37
2.3.	MARCO LEGAL	39
2.4.	GENERALIDADES.....	40
2.4.1.	Clave de referencia.....	40
2.5.	CONFIGURACIÓN AEROPORTUARIA.....	41
2.5.1.	Pista de aterrizaje	42
2.5.2.	Orientación de pista de aterrizaje de un aeropuerto	47
2.6.	PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS	48
2.6.1.	Pavimento flexible	49
2.6.2.	Pavimento rígido	51
2.6.3.	Juntas en pavimento rígido.....	53
2.6.4.	Barras de unión en juntas	55
2.6.5.	Pasadores en juntas	55
2.7.	DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS	56
2.7.1.	Metodologías para el diseño de pavimentos aeroportuarios	57
2.8.	DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE PARA AEROPUERTOS	58
2.8.1.	Método de la OACI (CBR)	58
2.8.2.	Método de la FAA (capas elásticas).....	63
2.9.	DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO PARA AEROPUERTOS	75



2.9.1. Método de la OACI (Westergaard)	75
2.9.2. Método de la FAA (teoría de elementos finitos).....	82
2.10. DISEÑO DEL MARGEN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS	85
2.11. FAARFIELD EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS	85
2.11.1. Proceso de diseño en FAARFIELD	86
2.11.2. Propiedades del material en FAARFIELD	88
2.12. FACTORES A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO	89
2.12.1. Estudio de tráfico	90
2.12.2. Estudio de suelos.....	93

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE-ESTUDIO	94
3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	97
3.2.1. Enfoque de la investigación	97
3.2.2. Alcance de la investigación.....	97
3.2.3. Diseño de la investigación	98
3.2.4. Población y muestra	98
3.2.5. Instrumentos de recolección de datos	99
3.2.6. Softwares utilizados	99
3.3. ESTUDIO DE VIENTOS	100
3.4. ESTUDIO DE SUELOS	106
3.5. ESTUDIO DE TRÁFICO.....	111
3.5.1. Análisis de la demanda de pasajeros	111
3.5.2. Volumen de operaciones	112
3.5.3. Mix de aeronaves de diseño	115



3.5.4.	Características de las aeronaves de diseño	116
3.6.	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA PISTA.....	131
3.6.1.	Márgenes de las pistas de aterrizaje	135
3.6.2.	Franja de pista y zonas de seguridad.....	135
3.7.	ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO	135

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS ..	138
4.2.	DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR EL MÉTODO OACI	138
4.2.1.	Determinación de la aeronave equivalente	138
4.2.2.	Cálculo de espesores de la pista de aterrizaje	140
4.2.3.	Cálculo de esfuerzos en la estructura de pavimento	143
4.3.	DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR EL MÉTODO FAA	147
4.3.1.	Procedimiento de diseño en FAARFIELD	148
4.3.2.	Cálculo del espesor de pista de aterrizaje.....	150
4.3.3.	Chequeo del diseño por el método racional	152
4.3.4.	Cálculo de las deformaciones admisibles en pavimento flexible.....	152
4.3.5.	Cálculo de esfuerzos y deformaciones de servicio	154
4.4.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS OACI Y FAA	161
4.4.1.	Discusión de resultados.....	163
4.5.	SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	167
4.6.	DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO OACI	171
4.6.1.	Cálculo de espesores de la pista de aterrizaje	172
4.6.2.	Cálculo de esfuerzos y deflexiones en pavimento rígido.....	174
4.7.	DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO FAA.....	176



4.7.1. Procedimiento de diseño en FAARFIELD	177
4.7.2. Cálculo del espesor de la pista de aterrizaje.....	178
4.8. SELECCIÓN DE JUNTAS A UTILIZAR	180
4.9. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PAVIMENTO RÍGIDO	183
4.10. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS OACI Y FAA	189
4.10.1. Discusión de resultados.....	191
4.11. SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	195
4.12. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	198
4.12.1. Presupuesto pavimento flexible y rígido.....	204
4.13. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	206
4.14. VALIDEZ DE LAS HIPÓTESIS.....	207
V. CONCLUSIONES.....	212
VI. RECOMENDACIONES	215
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	217
ANEXOS.....	222

Área: Transportes

Tema: Diseño de pavimentos aeroportuarios

Línea de investigación: Pavimentos

Fecha de sustentación: 27 de junio del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de variables	27
Tabla 2 Clave de referencia para aeropuertos.....	40
Tabla 3 Infraestructura aeroportuaria	41
Tabla 4 Tipos de juntas en pavimento rígido de aeropuertos	54
Tabla 5 Características de los pasadores de acero	55
Tabla 6 Recomendación para separación máxima de juntas	56
Tabla 7 Comparación de pavimentos de aeropuertos y pavimentos de carreteras	57
Tabla 8 Características de las aeronaves para el trazado de las curvas de diseño	61
Tabla 9 Los datos de prueba a gran escala utilizados para el modelo de fatiga	84
Tabla 10 Espesor mínimo de la capa del pavimento de márgenes	85
Tabla 11 Valores de coeficientes de poisson usados en FAARFIELD	89
Tabla 12 Localización y ubicación del aeropuerto	95
Tabla 13 Localización de calicatas	107
Tabla 14 Ensayos de laboratorio realizados	109
Tabla 15 Características físico-mecánicas del suelo de subrasante.....	109
Tabla 16 Cuadro de valores de CBR obtenidos.....	110
Tabla 17 Arribo de turistas nacionales y extranjeros, según provincias 2017 - 2021 .	111
Tabla 18 Aeronaves y aerolíneas que operan en el aeropuerto Manco Cápac	113
Tabla 19 Movimiento aeroportuario del aeropuerto Manco Cápac (2005 - 2019).....	113
Tabla 20 Aeronaves que operan en aeropuertos de la zona sur del Perú.....	114
Tabla 21 Conjunto o mix de aeronaves de diseño	115
Tabla 22 Diferentes pesos de las aeronaves de diseño	115
Tabla 23 Datos técnicos de la aeronave de diseño.....	131
Tabla 24 Ancho mínimo de pista de aterrizaje	132
Tabla 25 Datos para el cálculo de la longitud de la pista de aterrizaje.....	132
Tabla 26 Datos generales de la Estación - Puno.....	136
Tabla 27 Precipitación máxima en 24 horas	137
Tabla 28 Metodologías de diseño de pavimentos aeroportuarios.....	138
Tabla 29 Factores para convertir salidas anuales por aeronave a equivalentes	139
Tabla 30 Determinación de las salidas anuales equivalentes	140



Tabla 31	Determinación de las salidas anuales equivalentes (continuación)	140
Tabla 32	Factores equivalentes para bases de mayor calidad que una base P-209	143
Tabla 33	Datos de entrada para el cálculo de esfuerzos verticales	145
Tabla 34	Opciones de diseño de pavimento flexible para la pista de aterrizaje	150
Tabla 35	Espesores de pavimento flexible para la pista de aterrizaje	151
Tabla 36	Conversión de operaciones a pasadas en el mix de aeronaves	153
Tabla 37	Datos de entrada para el cálculo de esfuerzos y deformaciones.....	156
Tabla 38	Comparación de valores de deformación con parámetros admisibles.....	160
Tabla 39	Comparación de los métodos de diseño de pavimento flexible.....	161
Tabla 40	Comparación de los métodos de diseño de pavimento flexible (cont.).....	162
Tabla 41	Resultados del análisis de sensibilidad	168
Tabla 42	Resultados del análisis de sensibilidad (continuación).....	169
Tabla 43	Resumen del cálculo de espesores obtenidos con el método OACI.....	174
Tabla 44	Datos de entrada para las fórmulas de Westergaard	175
Tabla 45	Esfuerzos y deflexiones en pavimento rígido - Westergaard.....	176
Tabla 46	Opción de diseño para pavimento rígido	176
Tabla 47	Espesores de pavimento rígido para la pista de aterrizaje	179
Tabla 48	Resumen del cálculo de espesores obtenidos con el método FAA.....	180
Tabla 49	Datos de entrada programa Everfe	186
Tabla 50	Esfuerzos y deflexiones en pavimento rígido – Everfe	188
Tabla 51	Comparación de los métodos de diseño de pavimento rígido	189
Tabla 52	Comparación de los métodos de diseño de pavimento rígido (cont.).....	190
Tabla 53	Resultados del análisis de sensibilidad	195
Tabla 54	Resultados del análisis de sensibilidad (continuación).....	196
Tabla 55	Dimensiones de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Ventilla.....	198
Tabla 56	Medido de las partidas de pavimento flexible	199
Tabla 57	Medido de las partidas de pavimento rígido.....	199
Tabla 58	Presupuesto de pavimento flexible	205
Tabla 59	Presupuesto pavimento rígido.....	205
Tabla 60	Propuesta para la pista de aterrizaje.....	207



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Elementos genéricos de un aeropuerto	42
Figura 2 Pista de un aeropuerto	43
Figura 3 Margen de pista	43
Figura 4 Franja de pista	44
Figura 5 Areas de seguridad de extremo de pista (RESA)	44
Figura 6 Zona libre de obstáculos (CLEARWAY= CWY).....	45
Figura 7 Zona de parada (STOPWAY= SWY)	46
Figura 8 Componentes de la pista de despegue y aterrizaje	46
Figura 9 Direcciones del viento para aeronaves	47
Figura 10 Estructura usual de pavimento flexible de aeropuertos.....	49
Figura 11 Transmisión de cargas en pavimento flexible de aeropuertos.....	50
Figura 12 Transmisión de cargas en pavimento rígido de aeropuertos	52
Figura 13 Curvas de diseño tentativas para pavimentos flexibles (1949)	59
Figura 14 Modelo matemático del método de diseño de la OACI	60
Figura 15 Ejemplo de nomograma para el cálculo de pavimentos flexibles	62
Figura 16 Idealización de la teoría de diseño de capas elásticas	63
Figura 17 Idealización del sistema del pavimento por el método de capas elásticas	64
Figura 18 Envoltente inferior para curvas de falla desarrolladas	72
Figura 19 Edealización del planteamiento de Westergaard para pavimento rígido	75
Figura 20 Esfuerzos por carga en la esquina de la losa	76
Figura 21 Ejemplo de nomograma para el cálculo de pavimentos rígidos.....	81
Figura 22 Modelo básico de elementos finitos para pavimentos de hormigón	82
Figura 23 Proceso de diseño de FAARFIELD	88
Figura 24 Tipos de configuración del tren de aterrizaje principal.....	92
Figura 25 Tipos de configuración del tren de aterrizaje principal (continuación).....	93
Figura 26 Mapa de localización del aeropuerto de Ventilla	94
Figura 27 Emplazamiento del aeropuerto de Ventilla	95
Figura 28 Localización del terreno destinado para el aeropuerto de Ventilla	96
Figura 29 Preparación de datos para la rosa de vientos.....	101
Figura 30 Distribución de frecuencias por clase de viento	102



Figura 31	Rosa de vientos para el aeropuerto de Ventilla	103
Figura 32	Orientación de la pista de aterrizaje en el aeropuerto de Ventilla.....	104
Figura 33	Distribución arquitectónica del Aeropuerto de Ventilla.....	105
Figura 34	Croquis de ubicación de calicatas en pista de aterrizaje	107
Figura 35	Excavación de calicatas a cielo abierto	107
Figura 36	Ensayos de laboratorio	108
Figura 37	Vista frontal de la aeronave Airbus a320	116
Figura 38	Vista de elevación y en planta de la aeronave Airbus a320	117
Figura 39	Vista frontal y de elevación de la aeronave Airbus a320 Neo	118
Figura 40	Vista en planta de la aeronave Airbus a320 Neo.....	119
Figura 41	Vista en elevación y en planta de la aeronave Boeing 717	120
Figura 42	Aeronave Boeing 717	121
Figura 43	Vista frontal de la aeronave Boeing 727	121
Figura 44	Vista en planta y en elevación de la aeronave Boeing 727	122
Figura 45	Vista en planta de la aeronave Boeing 737-200	123
Figura 46	Vista en elevación y frontal de la aeronave Boeing 737-200.....	124
Figura 47	Vista en planta y en elevación de la aeronave Boeing 737-800.....	125
Figura 48	Vista frontal de la aeronave Boeing 737-800.....	126
Figura 49	Vista en elevación y en planta de la aeronave Embraer 190.....	127
Figura 50	Aeronave Embraer E-190.....	128
Figura 51	Vista en elevación de la aeronave BAE 146-200	128
Figura 52	Vista en planta y elevación de la aeronave BAE 146-200	129
Figura 53	Vista frontal y en planta de la aeronave BAE 146-300.....	130
Figura 54	Aeronave BAE 146-300	131
Figura 55	Cálculo de la longitud mínima de despegue.....	133
Figura 56	Cálculo de la longitud mínima de aterrizaje.....	134
Figura 57	Histograma de precipitaciones máximas en 24 h	136
Figura 58	Cálculo de espesores de la pista de aterrizaje con el método OACI.....	141
Figura 59	Cálculo de espesor mínimo de base para la pista de aterrizaje	142
Figura 60	Distribución de esfuerzos verticales vs profundidad - pista de aterrizaje ...	145
Figura 61	Registro de tráfico aéreo en FAARFIELD.....	149
Figura 62	Sección previa del pavimento flexible	149
Figura 63	Espesores obtenidos de pavimento flexible para pista de aterrizaje	150
Figura 64	Factor de daño acumulativo del mix de aeronaves en pavimento flexible..	151



Figura 65	Sistema de coordenadas de posición de las cargas en BISAR 3.0	155
Figura 66	Ingreso de datos en BISAR 3.0	156
Figura 67	Ingreso de datos en BISAR 3.0 (continuación).....	157
Figura 68	Hoja de reporte BISAR 3.0	158
Figura 69	Esfuerzos, deformaciones y deflexiones en el pavimento.....	159
Figura 70	Espesores obtenidos por el método de la OACI.....	164
Figura 71	Espesores obtenidos por el método de capas elásticas – FAARFIELD	165
Figura 72	Comparación de los métodos de diseño de pavimento flexible	166
Figura 73	Sensibilidad de la vida útil del pavimento variando el CBR.....	169
Figura 74	Cálculo del módulo de reacción de subrasante	171
Figura 75	Cálculo del coeficiente de balasto de subbase estabilizada.....	172
Figura 76	Cálculo del espesor de losa de concreto para la pista de aterrizaje	173
Figura 77	Sección previa del pavimento rígido	178
Figura 78	Espesores obtenidos del pavimento rígido para pista de aterrizaje	178
Figura 79	Factor de daño acumulativo del mix de aeronaves en pavimento rígido	179
Figura 80	Distribución de juntas en la pista de aterrizaje.....	182
Figura 81	Secciones para la generación de modelos en Everfe.....	183
Figura 82	Secciones para la generación de modelos en Everfe (continuación).....	184
Figura 83	Modelación del pavimento rígido en Everfe 2.26	186
Figura 84	Esfuerzos por carga en la esquina de la losa	187
Figura 85	Esfuerzos por carga en el centro de la losa	187
Figura 86	Esfuerzos por carga en el borde de la losa	187
Figura 87	Espesores obtenidos por el método de Westergaard	193
Figura 88	Espesores obtenidos por el método de elementos finitos – FAARFIELD ..	193
Figura 89	Comparación de los métodos de diseño de pavimento rígido.....	193
Figura 90	Sensibilidad de la vida útil del pavimento.....	196



ACRÓNIMOS

IATA:	Asociación Internacional de Transporte Aéreo
FAA:	Administración Federal de Aviación
DGAC:	Dirección General de Aeronáutica Civil
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
RAP:	Regulaciones Aeronáuticas del Perú
MINCETUR:	Ministerio de Comercio Exterior y Turismo
FAARFIELD:	Diseño de Capas Elásticas Iterativas Rígidas y Flexibles
LCR:	Longitud de Campo de Referencia
MPP:	Municipalidad Provincial de Puno
AC:	Circular de asesoramiento
CBR:	Relación de Soporte de California
ASTM:	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
PCC:	Concreto de Cemento Portland
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
LED:	Diseño elástico de capas
MEF:	Teoría de elementos finitos
MTOW:	Peso máximo estructural de despegue



RESUMEN

Este estudio se centra en un análisis comparativo de dos métodos de diseño pavimentos aeroportuarios para el caso del Aeropuerto de Ventilla, esto en respuesta a la necesidad de construir en la región de Puno un nuevo aeropuerto internacional, se ha planteado como tema de estudio el análisis de 2 métodos de diseño estructural de pavimento flexible y rígido para aeronaves. El objetivo fue comparar la aplicación del método empírico de la OACI frente al método mecánico-empírico de la FAA. Es una investigación aplicada que utiliza el enfoque cuantitativo y un diseño no experimental. Consistió en la realización de estudios previos en la zona de estudio, de los cuales se encontró que el viento perjudicial representa el 0.2%, se tiene una subrasante con un CBR promedio de 14%. Los resultados indican que al aplicar el método OACI; se obtiene un pavimento flexible compuesto por 10 cm de carpeta asfáltica, 21.77 cm de base estabilizada y 20.32 cm de subbase granular; y un pavimento rígido compuesto por 39.20 cm de losa de concreto y 15 cm de subbase estabilizada. En cambio, con la aplicación del método FAA; se obtiene un pavimento flexible compuesto por 10 cm de mezcla asfáltica, 15 cm de base estabilizada y 24 cm de subbase granular; y un pavimento rígido compuesto por 37.80 cm de losa de concreto y 15 cm de subbase estabilizada. La comparación se basó en: modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta estructural, modelo de falla, espesores y costo del pavimento. Concluyendo de esta manera que existe una leve variación de espesores totales de pavimento del 5.9% para pavimento flexible y 2.6% para pavimento rígido. Además, con el uso del método FAA se genera un ahorro de S/.569,671.40 en pavimento flexible y S/.1,219,507.50 en pavimento rígido.

Palabras clave: Capas elásticas, Elementos finitos, Nomograma de diseño, Pavimentos aeroportuarios, Westergaard.



ABSTRACT

This study focuses on a comparative analysis of two airport pavement design methods for the case of the Ventilla Airport, this in response to the need to build a new international airport in the Puno region, the analysis has been raised as a study topic. of 2 methods of structural design of flexible and rigid pavement for aircraft. The objective was to compare the application of the ICAO empirical method versus the FAA mechanical-empirical method. It is applied research that uses a quantitative approach and a non-experimental design. It consisted of carrying out previous studies in the study area, of which it was found that harmful wind represents 0.2%, there is a subgrade with an average CBR of 14%. The results indicate that when applying the ICAO method; A flexible pavement is obtained composed of 10 cm of asphalt mixture, 21.77 cm of stabilized base and 20.32 cm of granular subbase; and a rigid pavement composed of 39.20 cm of concrete slab and 15 cm of stabilized subbase. On the other hand, with the application of the FAA method; A flexible pavement is obtained composed of 10 cm of asphalt mixture, 15 cm of stabilized base and 24 cm of granular subbase; and a rigid pavement composed of 37.80 cm of concrete slab and 15 cm of stabilized subbase. The comparison was based on: mathematical model, traffic model, design load, structural response, failure model, thickness and cost of the pavement. Concluding in this way that there is a slight variation in total pavement thicknesses of 5.9% for flexible pavement and 2.6% for rigid pavement. In addition, with the use of the FAA method, a saving of S/.569,671.40 is generated in flexible pavement and S/.1,219,507.50 in rigid pavement.

Keywords: Elastic layers, Finite elements, Design nomogram, Airport pavements, Westergaard.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El tema elegido para la presente investigación trata sobre el análisis comparativo de 2 métodos de diseño estructural de pavimentos para aeropuertos, para dicho efecto se realizará el diseño del pavimento de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Ventilla, localizado en la dirección oeste de la ciudad de Puno. La proyección y posterior construcción de este proyecto podría ser un avance significativo en el desarrollo del turismo en los últimos años en el Perú, comparándose incluso con al mega obra del Aeropuerto Internacional de Chinchero, ubicado en Cusco; así mismo, impulsaría la creación de miles de fuentes de empleo. La investigación consta de IV capítulos, distribuidos de la siguiente manera: Capítulo I: Introducción, se explican los fundamentos del estudio como el planteamiento del problema, enunciación de los problemas, hipótesis, justificación y objetivos. Capítulo II: Revisión de literatura, se describen aspectos teóricos referentes a los aeropuertos, abordando como primer punto los antecedentes y luego las bases teóricas que contiene varios conceptos en los que se fundamenta la investigación. Capítulo III: Materiales y métodos, se da una descripción del lugar de desarrollo de la investigación, se hace referencia al método y diseño de la investigación, se establecen las características geométricas de la pista de aterrizaje del aeropuerto y se realizan los estudios previos necesarios para el diseño de los pavimentos aeroportuarios. El Capítulo IV: Resultados y discusión, se presentan los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles y rígidos por métodos de OACI y FAA, así mismo, se realiza una breve discusión de los resultados obtenidos y un análisis comparativo de las metodologías de diseño. Finalmente, en los últimos capítulos se presentan las conclusiones y recomendaciones



para futuras investigaciones relacionadas al campo de la aeronáutica, las referencias usadas para la realización del presente trabajo y los anexos.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el mundo entero, el transporte aéreo de pasajeros y carga viene afrontando un desarrollo sostenido reflejado en un crecimiento exponencial del tráfico aeronáutico, por ello, los aeropuertos del mundo se están desarrollando cada vez más como medios masivos de conectividad aérea.

Según IATA (2019), América Latina representa el 6% del transporte aéreo mundial y se espera un crecimiento anual en los próximos 20 años entre 4% y 6%. El vicepresidente regional para las Américas de IATA Cerdá (2019) en un foro de Panamá afirmó: “La demanda está ahí y las aerolíneas están listas para crecer y quieren crecer, pero si no hay infraestructura que se lo permita, será muy difícil”, así mismo mencionó que con la infraestructura actual será imposible satisfacer la demanda futura.

En los últimos años la importancia de la infraestructura aeroportuaria en el Perú viene tomando fuerza, ampliaciones de proyectos aeroportuarios en Lima, Piura, Tumbes, Chiclayo, etc., y nuevos como el aeropuerto de Chinchero en Cusco incrementan el desarrollo de la ingeniería aeroportuaria en el país. OSITRAN (2020), en un estudio concluyó que en los últimos años existió una relación directa entre el crecimiento del transporte aéreo y la economía peruana, por lo que es crucial impulsar este medio de transporte. El Banco Interamericano de Desarrollo (2021), destacó que la infraestructura aérea en el Perú tiene 2 problemas; la escasa conexión de vuelos directos entre ciudades peruanas, de modo que, a menudo es necesario pasar por Lima para viajar entre 2 destinos del país; y la poca relevancia que tienen los aeropuertos internacionales en las regiones (Cusco, Arequipa, Iquitos, Trujillo, Juliaca, etc.) como puertas de ingreso para el turismo.



A nivel regional Puno cuenta solo con el Aeropuerto Internacional Inca Manco Cápac, el mismo que está limitado en su entorno por miles de viviendas, por lo que en un futuro será una fuerte limitante para sus operaciones. Muchas hectáreas se están viendo afectadas por la exposición al ruido y además el crecimiento de la población aledaña está cerrando el perímetro. En los últimos años la empresa Aeropuertos Andinos Perú y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones vienen gestionando una posible ampliación del aeropuerto, esto traería mayores problemas puesto que se tendría que expropiar y demoler muchas viviendas, lo que afectaría a miles de personas y a la vez conllevaría a realizar enormes gastos.

Entonces, el problema que afronta la región de Puno es que no cuenta con propuestas de diseño para un nuevo aeropuerto internacional. Esto es causado por el desinterés de las autoridades regionales y locales en llevar a cabo este tipo de infraestructura. En el pasado varias autoridades ya se han comprometido en apoyar con construcción del Aeropuerto Internacional de Ventilla, sin embargo, esto no se hace realidad, por lo que de continuar con esta situación Puno seguirá contando con un inadecuado aeropuerto y no se podrá explotar todo el potencial turístico y económico con el que contamos.

Ante esta problemática desde hace algunos años se cuenta con la intención de algunas autoridades de construir y equipar el Aeropuerto Internacional de Ventilla. Por lo que, para la elaboración del expediente técnico y su posterior ejecución, de tal manera que sea una obra de calidad, que cumpla con estándares internacionales, y pueda perdurar en las próximas décadas, es necesario conocer y comparar los métodos existentes y aplicables al diseño estructural de pavimentos para aeronaves en aeropuertos del Perú, caso del aeropuerto de Ventilla, temática que se abordará en el presente trabajo de investigación; por lo tanto, se realizará una comparación de los parámetros y proceso de



aplicación entre los métodos empíricos tradicionales como el método de la OACI; y métodos modernos como el método de capas elásticas (LED) y la teoría elementos finitos (FEM) para pavimentos flexibles y rígidos respectivamente.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

- Situación problemática: Elección de mejor alternativa de pavimento para la pista de aterrizaje de un aeropuerto.
- Especificidad: Determinar cuál de los dos métodos de diseño OACI o FAA resulta mejor según el parámetro de costos de construcción.
- Ubicación espacial: Terreno destinado para la construcción del Aeropuerto Internacional de Ventilla al oeste de Puno.
- Ubicación temporal: Año 2024
- Unidad de estudio: Pavimento del nuevo aeropuerto internacional.

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es el resultado de comparar el método empírico de la OACI frente al método mecánico - empírico de la FAA para el diseño de pavimento flexible y rígido de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de Puno en cuanto a espesores del pavimento y costos de construcción?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el resultado de realizar los estudios previos al diseño de pavimentos de la pista de aterrizaje de un aeropuerto en la región de Puno?
- ¿Cómo se realiza el diseño estructural de la pista de aterrizaje de un aeropuerto utilizando el método de la OACI para pavimento flexible y rígido?



- ¿Cómo se realiza el diseño estructural de la pista de aterrizaje de un aeropuerto utilizando el método de la FAA para pavimento flexible y rígido?
- ¿Cuál es el método más preciso en cuanto a planteamiento, modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta estructural, modo de falla y espesores obtenidos?
- ¿Cuál será el resultado de realizar un análisis de sensibilidad de cada uno de los parámetros que intervienen en el diseño de pavimento a la vida útil de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de Puno?

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

El análisis comparativo del método empírico de la OACI frente al método mecánico - empírico de la FAA para el diseño de pavimento flexible y rígido de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de Puno nos permitirá conocer cuál de los dos métodos resulta más óptimo para utilizarse según los criterios de espesores del pavimento y costos de construcción.

1.3.2. Hipótesis específicas

H1: Los estudios previos al diseño del pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto en la región de Puno tales como el estudio de vientos, el estudio de suelos, el estudio pluviométrico y el estudio de tráfico; nos permitirá obtener los datos de entrada para el diseño estructural del pavimento.

H2: El método de diseño empírico de la OACI, utiliza básicamente la experiencia del desempeño de pavimentos en servicio, realizando varias simplificaciones.



H3: El método mecánico - empírico de la FAA se acercan más a la realidad, optimizando espesores y reduciendo costos; por lo tanto, es el más optimo en su aplicación.

H4: En cuanto a planteamiento, modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta estructural, modo de falla y espesores obtenidos el método de la FAA es el más preciso Los resultados de la aplicación del método de la FAA son menores en comparación con el método de la OACI.

H5: Un análisis de sensibilidad a la vida útil del pavimento de los parámetros que intervienen en el diseño de pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de puno, nos permitirá conocer que parámetro tiene más influencia en la vida útil del pavimento.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la importancia del transporte aéreo es innegable, pues es la base del mundo globalizado como hoy lo conocemos. Puno es una región turística por naturaleza. De acuerdo con cifras del MINCETUR en los últimos años, Puno fue una de las regiones con más visitantes a los principales lugares turísticos, en su gran mayoría fueron visitantes a sus lugares turísticos más conocidos; es más, hace poco la isla de Taquile fue considerada uno de los mejores lugares turísticos del mundo por la Organización Mundial de Turismo. Sin embargo, no se está explotando todo el poder turístico que tenemos, esto debido a que nuestra infraestructura aeroportuaria, en nuestra región, sigue operando como lo hacía hace más de 20 años y con pocas esperanzas de mejorar, por lo que es necesario resolver esto. Puno tiene gran potencial en turismo por lo que, la implementación de un nuevo aeropuerto impulsaría en gran medida el desarrollo de la región. Tener un aeropuerto que cumpla con las características técnicas y que asegure sus



necesidades de operación sin generar grandes perjuicios es muy importante en nuestra dinámica creciente e integración turística y comercial de la región con el resto del Perú y el extranjero.

Las pampas de Ventilla, un sector que por su ubicación (a 5 km de la ciudad de Puno) es una zona estratégica para la construcción de un gran aeropuerto, esto implicaría que el sector de Ventilla sea la futura expansión de la ciudad. Respecto del aeropuerto de Ventilla, en 2018 el pleno del Consejo Municipal de la M.P.P. presidido por el exalcalde Iván Flores, acordó por unanimidad declarar de interés y necesidad pública la construcción, equipamiento y funcionamiento del Aeropuerto Internacional de Ventilla, para el cual se destinó un área de 240 hectáreas. Dicho acuerdo se refleja en la ordenanza municipal N° 27-2018-MPP. Es así que, si la propuesta ya está hecha y el terreno ya está destinado, solo falta el interés de las autoridades regionales y locales para poder llevar a cabo la construcción de este tan necesario proyecto. Entonces, si los aeropuertos son tan importantes, realizar un estudio sobre los métodos de diseño de pavimentos aeroportuarios es indispensable para tener propuestas óptimas.

Justificación social: se justifica debido a que al realizar el diseño del pavimento cumpliendo las normativas vigentes, este será más seguro y eficiente, por lo que se beneficiará a los usuarios al hacer uso de dicha infraestructura. Así mismo con la construcción y funcionamiento del nuevo aeropuerto se generarían miles de fuentes de empleo lo que se traduce en incremento de la economía de la región.

Justificación económica: Al contar con una propuesta de diseño óptima se logrará que los costos para su mantenimiento sean menores, por lo tanto, los costos en el largo plazo se disminuirán. La planificación será para unos 20 años, pero podría durar 10 años más con una adecuada conservación.



Justificación ambiental: El diseño cumpliría con las regulaciones ambientales locales e internacionales para preservar la biodiversidad y reducir la contaminación. Además, se plantean diseños adecuados para las condiciones climáticas locales de la zona.

Justificación teórica: Se justifica debido a que servirá como una base teórica para futuras investigaciones sobre pavimentos aeroportuarios. Los resultados obtenidos de la propuesta de diseño realizada servirán como base confiable de consulta al momento de proyectar y elaborar el expediente de un aeropuerto en la región, dado que actualmente no se cuenta con mayor información al respecto.

Justificación técnica: Por el aporte que se dará sobre cómo se realiza un correcto diseño de pavimentos cumpliendo normas nacionales e internacionales.

Justificación metodológica: Se justifica por el aporte de la aplicación de una nueva metodología de diseño que se puede utilizar para este u otros aeropuertos.

Justificación tecnológica: El diseño se realizará usando la metodología de la FAA de los EE.UU. Siendo esta una metodología moderna que usa enfoques de capas elásticas y elementos finitos para el análisis de los pavimentos.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

- Realizar el análisis comparativo del método empírico de la OACI frente al método mecánico - empírico de la FAA para el diseño de pavimento flexible y rígido de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de Puno en cuanto a espesores del pavimento y costos de construcción.



1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar los estudios previos al diseño del pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto en la región de puno tales como el estudio de vientos, el estudio de suelos, el estudio pluviométrico y el estudio de tráfico; para obtener los datos de entrada para el diseño estructural del pavimento.
- Diseñar el pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto, aplicando el método de la OACI para pavimento flexible y rígido.
- Diseñar el pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto, utilizando el método de la FAA para pavimento flexible y rígido.
- Determinar el método de diseño más apropiado en base al planteamiento, modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta estructural, modo de falla y espesores obtenidos de la aplicación de los métodos de la OACI y FAA.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en el diseño de pavimento a la vida útil de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de puno.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables independientes

- En este caso las variables independientes son el CBR de la subrasante, el tráfico esperado de aeronaves y la orientación óptima de la pista, debido a que tengo el control total de estas variables.

1.6.2. Variables dependientes

- Las variables dependientes de esta investigación son el modelo matemático, el modelo de tráfico, la carga de diseño, la respuesta estructural, el modelo de falla, los espesores del pavimento y costos de construcción de cada método de diseño. Esta variable depende directamente de la alternativa de pavimento elegida.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables independientes	Dimensión	Indicadores	Tipo de variable	Valor
X1: CBR de subrasante	Física	CBR obtenido en laboratorio	Cuantitativa continua	%
X2: Trafico esperado	Operacional	Número de despegues esperados	Cuantitativa discreta	Cant.
Variables dependientes		Indicadores	Tipo	Valor
Y1: Espesores del pavimento	Física	Espesor del pavimento en cm según cada método	Cuantitativa continua	cm
Y2: Costos de construcción	Económica	Costo total en soles de la construcción del pavimento según cada método	Cuantitativa continua	S/.

Nota: Elaboración propia.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

En la revisión de literatura se pone énfasis en la comprensión de los conceptos básicos requeridos en este estudio, desde la descripción de las diferentes zonas aeroportuarias, su nomenclatura, hasta un breve resumen sobre los pavimentos destinados para soportar aeronaves; luego se describen los fundamentos en los que se basa cada método de diseño de pavimentos de aeropuertos. Los métodos de diseño para pavimentos aeroportuarios aplicados y analizados son: el método de la OACI y el método de la FAA para pavimentos flexibles y rígidos.

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de pavimentos para aeropuertos requiere métodos objetivos para evaluar las cargas de las aeronaves y la respuesta estructural del pavimento. Por mucho tiempo se ha reconocido que los esfuerzos inducidos por las cargas en un pavimento y la subrasante dependen de los pesos brutos de la aeronave que lo utiliza; así como la configuración, el espaciado y la presión de las ruedas del tren de aterrizaje. La respuesta del pavimento para resistir estos esfuerzos depende de su espesor, composición, propiedades de los materiales utilizados en su construcción y la resistencia de la subrasante. Los métodos de diseño para pavimentos de aeropuertos han surgido en gran medida de la experiencia del desempeño de los mismos. Para pavimentos rígidos, que se basan en la rigidez a la flexión del hormigón para distribuir las cargas de las ruedas de las aeronaves a la subrasante, se han utilizado desde principios de la década de 1940 los enfoques teóricos desarrollados por Westergaard y otros. Debido a las dificultades encontradas en el desarrollo de un modelo matemático realista para pavimentos flexibles, que dependen de la resistencia mecánica de los agregados compactados, los métodos de diseño empírico como el método



de la OACI todavía se usan comúnmente en muchos países. Sin embargo, a partir de 2008, la Administración Federal de Aviación (FAA) de los EEUU, propone nuevos métodos de diseño que se basan en modelos de software de computadora desarrollados recientemente y son apropiados para las aeronaves de transporte aéreo más pesadas.

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Blanco (2022), en su investigación: “Diferencia entre el diseño del espesor del pavimento y la predicción de la vida útil del pavimento para pavimentos rígidos para aeronaves”, analizó la disparidad entre el diseño del espesor del pavimento y la predicción de la vida útil del pavimento llegando a la conclusión de que el diseño del espesor del pavimento no predice su falla, más bien, determina una combinación razonablemente económica de capas y espesores de materiales que reducen la probabilidad de que el pavimento alcance una condición de falla a un nivel aceptablemente bajo. Para predecir el tiempo hasta que un pavimento alcance la falla, se debe entender la condición de falla, se debe definir la probabilidad de fallar implícita en el método de diseño y se debe considerar una mejor estimación de propiedades y espesores de material del pavimento.

Heymsfield (2021), en su artículo: “Estado de la Práctica en Estructuras de Pavimentos Códigos de diseño/análisis relevantes para el aeródromo Diseño de pavimento”, examinó los enfoques computacionales utilizados para el diseño estructural de pavimentos aeroportuarios de los EEUU y fuera de él, considerando su metodología computacional y sus cualidades intrínsecas. Concluyendo que se utilizan 3 enfoques para el análisis/diseño estructural de pavimentos: empírico, soluciones de forma cerrada y numérico. Generalmente, el método LED se usa para el análisis y diseño estructural de pavimentos flexibles. El análisis y diseño



estructural de pavimento rígido generalmente se realiza utilizando variaciones de un análisis de Westergaard o el FEM.

Tamagusko (2020), en su artículo: “Herramientas de software para el diseño de pavimentos de aeropuertos”, examinó la evolución de los métodos de diseño, sus formulaciones, cómo se aplican estos métodos y, finalmente, cuál es el estado del arte de las herramientas informáticas para el diseño de pavimentos aeroportuarios. Se evaluaron los softwares FAARFIELD (EE.UU.), Alize-Airfield (Francia), APSDS (Australia) y PCASE (EE.UU.). Se concluyó que los principales softwares de diseño de pavimentos aeroportuarios tienen formulaciones similares, sin embargo, el software FAA considera una solución más elegante, con el método LED para pavimento flexible y el método de elementos finitos para pavimento rígido se consiguen resultados más precisos.

Meng y Zhong (2023), en su artículo de investigación denominado “Análisis de respuesta dinámica del pavimento de aeropuerto bajo carga de impacto”, analizó un modelo neumático-pavimento para estudiar las características dinámicas de los pavimentos asfálticos de aeropuertos bajo carga de impacto utilizando el software ANSYS. Tomó como parámetro la aeronave Boeing 737-800, investigó los efectos de la presión de los neumáticos, el ángulo del aterrizaje, la velocidad de descenso y la respuesta dinámica de la pista. Obtuvo como resultado que los valores de esfuerzo, deformación y desplazamiento en el pavimento, son mayores cuando se considera una presión de neumático de 2.0 Mpa que para una presión de 1.0 Mpa. Recomendando finalmente que en la fase de diseño del pavimento aeroportuario se incluya el esfuerzo por tracción en la parte inferior de la capa superficial y el esfuerzo vertical en la parte superior del cimiento de la subrasante.



Torres (2014), en su investigación “Comparación de los resultados y aplicación del programa FAARFIELD 1.305 y el método tradicional para pavimentos flexibles desarrollados por la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos (FAA).”, realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos de la aplicación del método tradicional y utilizando el software FAARFIELD, llegando a la conclusión de que para una subrasante con $CBR=6.3\%$, los espesores obtenidos con el uso de los nomogramas de diseño o con el programa FAARFIELD tienen una leve variación del 2%. Así mismo recomienda el uso software por ser una herramienta de fácil operación.

Guerra (2020), en su investigación: “Análisis del comportamiento de tensiones máximas inducidas en pavimentos rígidos debido al reemplazo parcial de losas”, analizó el comportamiento de los esfuerzos máximos generados en losas de concreto realizando modificaciones en la geometría de la misma. Concluyendo que la posición crítica en el pavimento se produce cuando la carga se ubica en el borde de la losa. Además, recomienda el uso del software everfe 2.26 para el análisis de pavimentos rígidos.

Bórquez (2014), en su investigación titulada: “Diseño de la estructura de pavimento de la pista del aeródromo de Panguipulli”, planteó el diseño del pavimento del aeródromo de Panguipulli en Chile debido a que éste no contaba con una pista pavimentada, lo que generó diversas dificultades. Realizó el diseño del pavimento utilizando el software FAARFIELD y cumpliendo las exigencias establecidas por la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Publicas de Chile y otros reglamentos. Como resultado logró determinar además del diseño, un plan de mantenimiento periódico para evitar daños mayores que podrían provocar reparaciones más costosas o incluso el cierre del aeropuerto.



Villavicencio y Castillo (2016), en su tesis: “Diseño de pavimento rígido o flexible, para plataforma de parqueo de avión Airbus 330 – 200, ubicado en el aeropuerto José Joaquín de Olmedo, Guayaquil”, propuso la reconstrucción del pavimento de la plataforma de dicho aeropuerto como solución a la problemática de la falta de una adecuada estructura para soportar aviones de gran tamaño y dimensiones. Se utilizó el método FAA y el software FAARFIELD para presentar una propuesta de diseño de pavimento rígido y una de pavimento flexible. Luego comparando los resultados se recomendó la opción de pavimento rígido por su mayor durabilidad y mayor resistencia a los esfuerzos, en cambio la opción del pavimento flexible tiene la desventaja del deterioro del mismo producto del derrame de hidrocarburos y por lo tanto el ablandamiento de la capa de rodadura causado por el calentamiento de los aceites utilizados por los aviones. Con esta investigación se obtuvo la mejor opción de pavimento para el aeropuerto de manera que pueda ser beneficioso en lo económico y funcional.

Hughes (2019), en su investigación: “LEAF: un nuevo programa computacional elástico en capas para procedimientos de evaluación y diseño de pavimentos de la FAA”, analizó a fondo el código de programación LEAF para el análisis elástico de capas del diseño de pavimentos flexibles aeroportuarios. Encontrando que el programa está escrito en Visual Basic (VB) 6.0 para Microsoft Windows 95 o superior, tiene una biblioteca de vínculos dinámicos con una interfaz definida. Las cargas de rueda se modelan como cargas circulares con presión vertical constante. El entorno de desarrollo para LEAF es un programa de computadora para retrocalcular los valores de módulo de capa de estructuras de pavimento representadas por capas elásticas lineales de extensión horizontal infinita.



García (2014), en su investigación denominada: “Diseño de pavimentos para aeropistas”, desarrolló el procedimiento para lograr diseños de pavimentos que cumplan con las exigencias mínimas para aeropistas de calidad, garantizando que la distribución de cargas repartidas por las ruedas de las aeronaves se reduzca. Realizó el diseño de los pavimentos: rígido y flexible utilizando el software FAARFIELD, así mismo, utilizó el software COMFAA para determinar la resistencia del pavimento a partir del método ACN-PCN desarrollado por la Organización de Aviación Civil Internacional. Los valores obtenidos del ACN pertenecen a los aviones y su combinación de tráfico; y los del PCN corresponden a las estructuras de pavimento diseñadas. Finalmente, con los resultados de la investigación se obtiene una metodología recomendable para realizar diseños de pavimentos de calidad, con máxima eficiencia económica y funcional.

Chai y Haydon (2016), en su investigación denominada: “Diseño de pavimento de aeródromo para un aeropuerto importante utilizando FAARFIELD y APSDS”, analizó los métodos de diseño de pavimentos aeroportuarios disponibles en EEUU y Australia respectivamente. Encontrando con el uso del método APSDS se obtienen espesores muy similares a los obtenidos con el método FAARFIELD para CBR de subrasante mayores a 10. Además, se requiere un factor de ajuste al método APSDS para generar diseños consistentes con la metodología FAARFIELD para CBR menores de 10.

Quintero (2011), en su investigación denominada: “Aplicación de la metodología racional en el cálculo de espesores de pavimentos flexibles para aeropuertos”, desarrolló una metodología racional y su aplicación en el diseño y revisión de estructuras de pavimento flexible para aeropuertos. Concluyó que el método racional empleado para el chequeo del diseño de pavimentos flexibles de



aeropuertos es un método práctico con buenas posibilidades de aplicación para el estudio de tensiones y deformaciones en los pavimentos, mejorando los procedimientos de cálculo y análisis. Esta metodología utiliza el software BISAR 3.0 y puede aplicarse en forma simultánea a las técnicas que emplea la metodología de la FAA, optimizando así el procedimiento de diseño estructural y logrando mejores resultados apoyados en métodos confiables.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Roel (2018), en su investigación “Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de pisco”, diseño estructuralmente el pavimento de una pista de aterrizaje empleando las metodologías de la OACI y la FAA. Llegando a la conclusión que al aplicar los métodos tradicionales se obtienen espesores de pavimento mayores que a aplicar el software FAARFIELD, esto debido a que con la implementación de nuevos métodos se busca optimizar los pavimentos.

Gonzales y Delgado (2019), en su investigación “Diseño del pavimento en el área de movimiento del aeropuerto Mórrope - Lambayeque.”, realizó el diseño del pavimento de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Lambayeque utilizando la metodología de la FAA; concluyendo que un CBR de subrasante igual a 14.20 % corresponde a la categoría de subrasante buena y que por lo tanto no requiere mejoramiento; además recomienda el uso de pavimento flexible debido al factor económico.

Coaquira y Conza (2020), en su trabajo: “Diseño de pavimentos de la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional de la Joya”, plantea la construcción de un nuevo aeropuerto internacional en el distrito La Joya, Arequipa. Diseñó el pavimento de la pista de despegue y aterrizaje utilizando la metodología de la



FAA y OACI utilizando las Regulaciones Aeronáuticas de Perú (DGAC). Concluyendo que de acuerdo al método de la FAA la mejor opción es utilizar un pavimento flexible para minimizar el costo de construcción.

Barragán (2015), en su investigación denominada “Diseño estructural de pavimentos flexibles aeroportuarios por el método FAA”, analizó el método de capas elásticas de la FAA para el diseño de pavimento flexible de aeropuertos, encontrando que el tránsito es el parámetro más determinante en el diseño de estructuras de pavimento de aeropuertos considerándolo el factor más complejo y de mayor cuidado ya que queda a criterio del diseñador la selección de las aeronaves de diseño.

Loizos (2018), en su estudio “Predicción del comportamiento de pavimento de hormigón de aeropuertos” desarrolló un modelo de respuesta utilizando un programa de elementos finitos para predecir tensiones y deflexiones en pavimentos rígidos. Demostró que es posible simular las respuestas observadas de un pavimento rígido sujeto a la presión de las aeronaves de diseño utilizando la teoría de elementos finitos. Además, desarrolló el modelado con dicha teoría para obtener los esfuerzos máximos y deflexiones en la placa de hormigón y compararlas con las soluciones de Westergaard. Concluyendo que el FEM es una herramienta confiable para el análisis de pavimentos rígidos de aeropuertos.

Chui-Kan y Llerena (2020), en su trabajo: “Comparación entre el concreto asfáltico y el concreto hidráulico en pavimentos aeroportuarios”, con base en estudios previos se comparó el desempeño de pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico. Para ello, diseñó dos tipos de pavimentos utilizando como lineamientos principales la metodología de la FAA, luego analizó sus costos de



construcción y fallas en ambos concretos utilizando el software FAARFIELD. Concluyó que los pavimentos hidráulicos causan menos daño a las superficies de rodadura que los pavimentos asfálticos y que al aumentar el número de salidas el diseño del pavimento hidráulico prevalece contra el concreto asfáltico.

Siviruero (2019), en su tesis titulada: “Relación entre el diseño estructural de pavimentos aeroportuarios y el costo – efectividad de construcción”, determinaron la relación entre el diseño estructural de pavimentos aeroportuarios con el costo - efectividad de construcción; por lo cual, construyeron modelos matemáticos de regresión lineal (ecuaciones) para determinar ratios de costo y plazos de construcción.

Marrugo y Orozco (2015), en su investigación: “Estudio sobre mezclas asfálticas tipo (P-401) y su aplicación a pavimentos aeroportuarios.”, estudió las mezclas asfálticas tipo (P401) aplicada a pavimentos aeroportuarios, concluyó que la mezcla asfáltica en caliente (P-401) consiste en un agregado mineral mezclado en una planta de asfalto con un ligante de cemento asfáltico fabricado según las especificaciones técnicas de la FAA. La mezcla asfáltica se producirá en una instalación de producción que también sea capaz de procesar en frío la dosis necesaria para la fórmula de trabajo utilizada.

Según diversas personalidades como el Ing. Orlando Arapa Roque quien en su momento fue congresista del Perú, el mismo que en el año 2021 presentó un proyecto de ley que declaró de interés nacional la reubicación del aeropuerto Inca Manco Cápac, la propuesta de un aeropuerto internacional en Ventilla no tendría ningún inconveniente desde el aspecto técnico - económico; y es completamente viable su construcción y funcionamiento.



2.2. ENTIDADES DEL TRANSPORTE AÉREO

Antes de desarrollar esta investigación es necesario conocer a grandes rasgos cómo funciona el transporte aéreo a nivel mundial y nacional, por ello se hará un repaso sucinto de las principales instituciones que están inmersos en este medio de transporte.

a) Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI o ICAO)

Fue fundada el 4 de abril de 1947, su propósito es lograr un desarrollo seguro y ordenado de la aviación civil internacional, colaborar con el desarrollo de las redes de aviación, aeropuertos y equipos y servicios de navegación, así como satisfacer las demandas de la sociedad de contar con un transporte aéreo, eficiente, económico y seguro. Para lograr ello, la OACI instrumenta normas que regulan el desempeño de pilotos de aeronaves, los controladores del tránsito aéreo, cuadrillas terrestres y de mantenimiento (MINCETUR, 2015). Es decir que la OACI, se encarga de regular y velar por el correcto desarrollo del transporte aéreo en los 193 países que lo conforman.

b) Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA)

Fue fundada en Cuba en abril de 1945. Es el instrumento para la cooperación entre aerolíneas, promoviendo la seguridad, fiabilidad, confianza y economía en el transporte aéreo en beneficio de los consumidores de todo el mundo (MINCETUR, 2015). A diferencia de la OACI, IATA se encarga de velar por única y exclusivamente por las flotas de aeronaves. Entre sus principales funciones tenemos:

- Además de la promoción del transporte aéreo seguro, regular y económico en todo el mundo, también promueve comercio aéreo y el estudio de temas relacionados.
- Cooperación entre transportistas relacionados directa o indirectamente con los servicios de transporte aéreo.



c) Administración Federal de Aviación (FAA)

Es un organismo de los Estados Unidos que supervisa y promueve la aviación civil. Creada en agosto de 1958, sustituyó a la antigua Autoridad de Aviación Civil (CAA), que luego se convirtió en una agencia del Departamento de Transporte del estado. Desarrolla y actualiza métodos de diseño relacionados a aeropuertos, aceptados por OACI y por los países que lo conforman (MINCETUR, 2015). Podemos decir que la FAA, ha sido y es pionera en avances e investigaciones respecto del diseño y construcción de aeropuertos en los EEUU. Por ello es que muchos países toman como referencia sus métodos e investigaciones.

d) Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC)

Es el órgano especializado del MTC, encargado de supervisar e inspeccionar todas las actividades aeronáuticas de los explotadores aéreos, a través de procesos orientados a garantizar la seguridad aérea (MINCETUR, 2015, p. 60).

- La Dirección de Seguridad Aeronáutica regula y supervisa el cumplimiento de las normas de seguridad aérea.
- La Dirección de Regulación y Promoción es el organismo regulador y de promoción a nivel nacional que propone y desarrolla normas y/o reglamentos relacionados con el transporte aéreo y la infraestructura aeroportuaria.

Es decir, la DGAC del Perú es la encargada de hacer cumplir lo que manda la OACI y otros organismos internacionalmente aceptados a nivel interno en el país.

e) Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial (CORPAC)

Agencia del gobierno peruano responsable de los servicios de aviación para las aeronaves que ingresan y salen de los aeropuertos del país. Sus funciones principales son:



Establecer y mantener el ordenamiento del tránsito aéreo y su correspondiente control que le asigne el Ministerio de Transportes y Comunicaciones; y operar, equipar y conservar aeropuertos comerciales abiertos al tránsito aéreo (MINCETUR, 2015).

f) Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de uso Público (OSITRAN)

Es una autoridad de control pública y descentralizada que depende del Presidente del Consejo de Ministros del Perú. Fue creado en enero de 1998 y su función es reglamentar, regular, supervisar, fiscalizar e imponer sanciones y medidas correctivas que abarca la explotación de la infraestructura de transporte de uso público como carreteras, aeropuertos, puertos y vías férreas (MINCETUR, 2015).

2.3. MARCO LEGAL

El marco legal aplicable al diseño de aeropuertos es amplio, sin embargo, para el caso del diseño de pavimentos aeroportuarios se ha tomado como principales referentes los siguientes documentos de carácter legal.

Ley N° 27261 - Ley de Aeronáutica Civil del Perú y su reglamento.

- Decreto supremo N° 002-2018-MTC, que modifica el Reglamento de la Ley de Aeronáutica Civil aprobado por decreto supremo N° 050 2001-MTC
- Reglamento Aeronáutico del Perú – RAP 314. Volumen I: “Diseño y operaciones de Aeródromos”, nueva Edición, Enmienda 2.
- Normas y métodos recomendados del anexo 14 por la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional). Volumen I: “Diseño y Operaciones de Aeródromos”.
- Manual de la FAA: Advisory Circular AC N° 150/5320-6G Diseño y Evaluación de Pavimentos Aeroportuarios.

2.4. GENERALIDADES

Aeródromo: Área definida que incluye todos los edificios e instalaciones utilizadas total o parcialmente para la llegada, salida y movimiento de aeronaves en su superficie (DGAC, 2021).

Aeropuerto: Es un aeródromo civil de servicio público que cuenta con obras e instalaciones adecuadas para la operación regular de aeronaves (DGAC, 2021).

2.4.1. Clave de referencia

La finalidad de esta clave es proporcionar un método para relacionar entre sí especificaciones de las características de un aeropuerto con el fin de dotarlo de instalaciones que sean adecuadas para los aviones destinados a operar en el mismo (DGAC, 2021).

Tabla 2

Clave de referencia para aeropuertos

Primer elemento de la clave		Segundo elemento de la clave	
Número de clave	Longitud de campo de referencia de la aeronave crítica (LCR)	Letra de clave	Envergadura de la aeronave crítica
1	< que 800 m	A	Hasta 15 m
2	\geq que 800 m y < que 1200 m	B	\geq que 15 m y < que 24 m
3	\geq que 1200 m y < que 1800 m	C	\geq que 24 m y < que 36 m
4	> que 1800 m	D	\geq que 36 m y < que 52 m
		E	\geq que 52 m y < que 65 m
		F	\geq que 65 m y < que 80 m

Nota: En la presente tabla se muestran las características necesarias para asignar a un aeropuerto su clave de referencia. Adaptada de Aeródromos, Volumen 1: Diseño y operaciones de aeródromos, por la (DGAC), 2021.

La clave está compuesta de 2 elementos relacionados con las características físicas de las aeronaves: El elemento 1 es un número basado en la longitud de campo de referencia (LCR) del avión de diseño, y el elemento 2 es una letra basada en la envergadura del avión de diseño (DGAC, 2021). Ambos elementos se determinan a partir la tabla 2.

2.5. CONFIGURACIÓN AEROPORTUARIA

Los componentes típicos de un aeropuerto son los mostrados en la Tabla 3 y la Figura 1, sin embargo, podrían variar dependiendo del tipo de aeropuerto que se proyecte.

De todos los componentes del aeropuerto, en el presente estudio se aborda el diseño estructural solo de la pista de despegue y aterrizaje debido a que esta es componente crítico y en donde ocurre la interacción de aeronave-pavimento, que es lo que se pretende analizar y estudiar.

Tabla 3

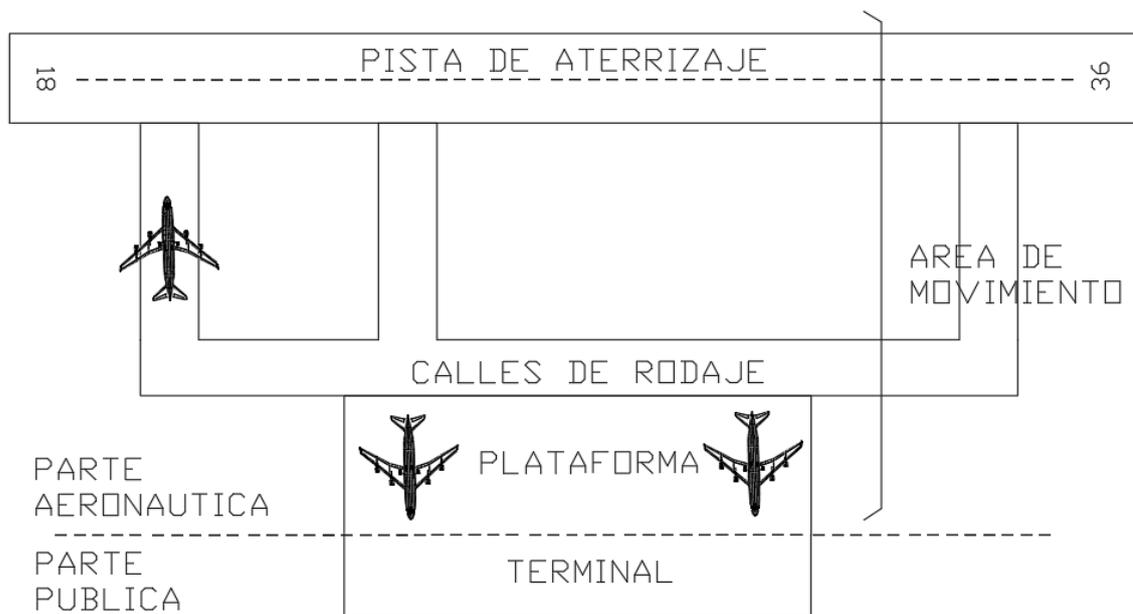
Infraestructura aeroportuaria

Componentes genéricos de un aeropuerto		
Parte pública	Área terminal	Terminal de pasajeros
		Terminal para bodegas
		Edificios varios
Complementos	Vías para el acceso	
	Estacionamiento de vehículos	
Parte aeronáutica	Área de movimiento	Área de maniobras
		Área de aterrizaje
		Área de rodaje
Elementos de apoyo	Torre de control, estación de salvamento y extinción, cercos, etc.	Plataforma

Nota: En la presente tabla se muestran los componentes genéricos que conforman un aeropuerto.

Figura 1

Elementos genéricos de un aeropuerto



Nota: Se muestran los elementos que generalmente conforman un aeropuerto.

2.5.1. Pista de aterrizaje

Es un área designada en un aeropuerto preparada para el aterrizaje y frenado de aeronaves. Está conformadas por la pista, márgenes, franjas, zonas libres de obstáculos, áreas de seguridad de extremo de pista y zonas de parada.

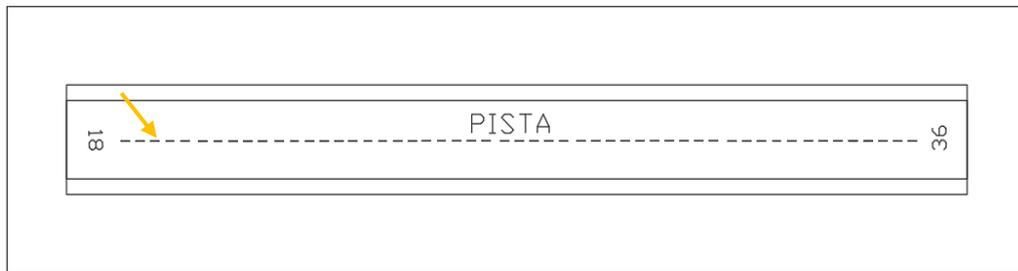
En vista de la función vital que desempeñan las pistas en lo que respecta a la seguridad y eficiencia del despegue y aterrizaje de las aeronaves, al proyectar esas instalaciones y servicios es imprescindible tener en cuenta las características operacionales y físicas de los aviones que habrán de utilizar las pistas (Llerena, 2020).

a) Pista (RWY)

Se le denomina pista al área rectangular definida en un aeródromo terrestre preparada para el aterrizaje y despegue de las aeronaves (DGAC, 2021).

Figura 2

Pista de un aeropuerto



Nota: En la presente figura se muestra la pista de aterrizaje de un aeropuerto.

b) Margen de pista

Se denomina margen a la banda de terreno que bordea un pavimento, preparada de modo que sirva como transición entre ese pavimento y el terreno adyacente (DGAC, 2021). Ayudan a prevenir la erosión del suelo causada por el chorro de reactor y pueden usarse para el mantenimiento de la pista o para transportar equipos de emergencia.

Figura 3

Margen de pista



Nota: En la presente figura se muestra el margen de la pista de aterrizaje de un aeropuerto.

c) Franja de pista

Es una superficie definida, que incluye la pista y la zona de parada (si las hay), diseñada para disminuir el riesgo de daños a las aeronaves que abandonan la pista y para proteger a las aeronaves que sobrevuelan la pista durante el

despegue o el aterrizaje. La franja incluye una porción de terreno que debe prepararse para que no cause daños en el tren de proa al salir el avión de la pista (DGAC, 2021).

Figura 4

Franja de pista



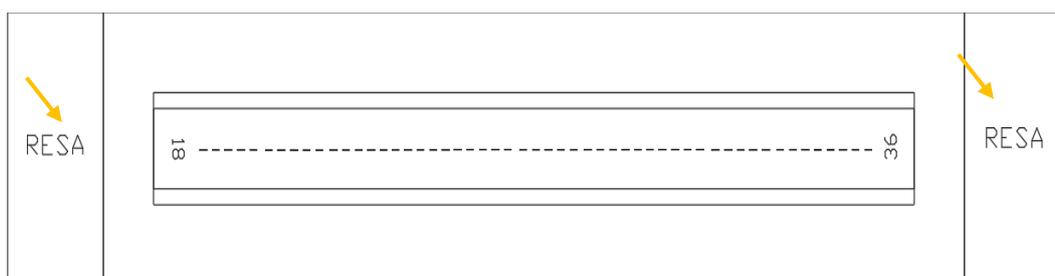
Nota: En la presente figura se muestra la franja de pista de un aeropuerto.

d) Área de seguridad de extremo de pista (RESA)

Se trata de una zona simétrica a la prolongación del eje de la pista y adyacente al final de la misma, y tiene como objetivo reducir el riesgo de daños a las aeronaves que efectúen un aterrizaje demasiado largo (p. 1-1). Al decidir las dimensiones del área se deberá considerar proporcionar un área lo suficientemente amplia para contener los aterrizajes que resulten de los factores operacionales más adversos (DGAC, 2021).

Figura 5

Áreas de seguridad de extremo de pista (RESA)



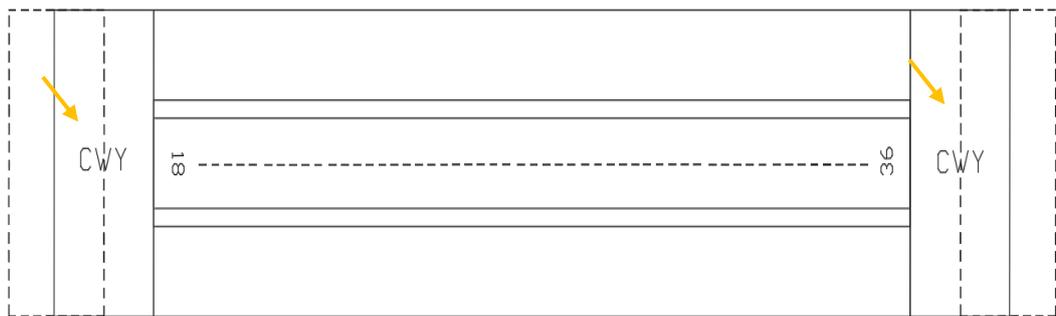
Nota: Se muestra la ubicación de las áreas de seguridad de extremo de pista las cuales se encuentran fuera de la franja de pista.

e) Zona libre de obstáculos (CWY)

La DGAC (2021) define esta zona como el área rectangular definida en tierra o en agua preparada de tal manera que un avión puede efectuar el despegue hasta una altura especificada (p. 1-9). Están situadas en los extremos del recorrido de despegue disponible y su función es proteger a las aeronaves desde que se eleva hasta que alcancen los 15 m de altura, por ello no debe existir obstáculos que generen dificultades para su despegue.

Figura 6

Zona libre de obstáculos (CLEARWAY= CWY)



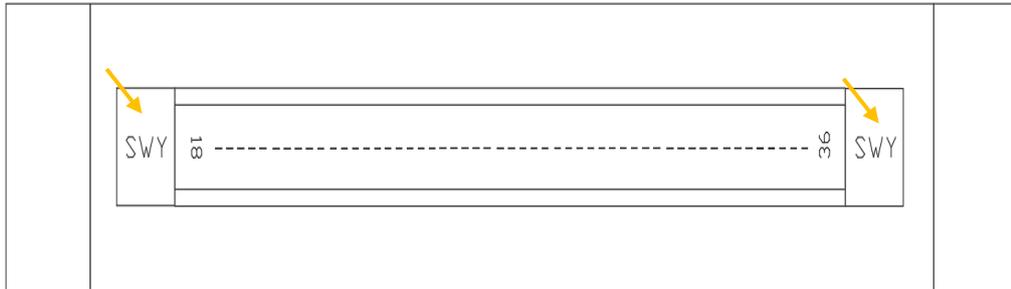
Nota: En la presente figura se muestra la ubicación de la zona libre de obstáculos en un aeropuerto.

f) Zona de parada (SWY)

La DGAC (2021) lo define como un área rectangular detrás de la ruta de despegue, tal como se muestra en la Figura 7, que está preparada para que la aeronave se detenga cuando se aborte el despegue (p. 1-9). Situados en los extremos de pista, su función es proteger a las aeronaves cuando realicen maniobras de aceleración o parada dando una zona sin obstáculos, donde pueden acelerar o parar con seguridad.

Figura 7

Zona de parada (STOPWAY= SWY)

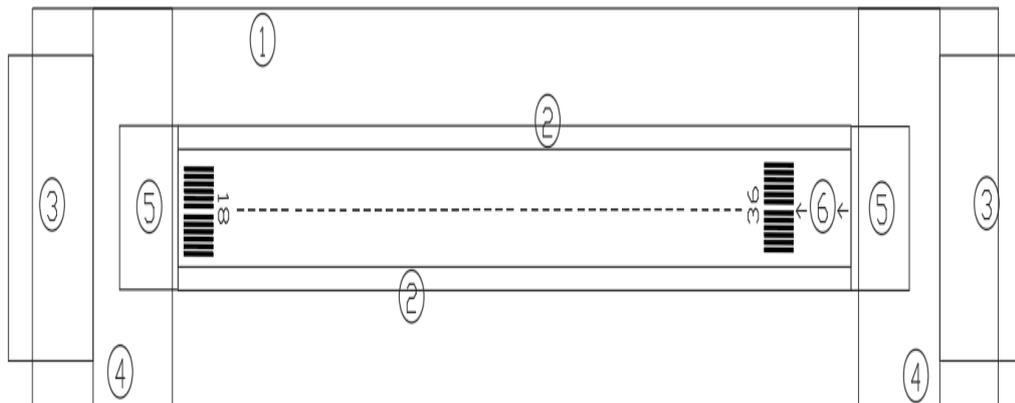


Nota: En la presente figura se muestra la ubicación de la zona libre de obstáculos en un aeropuerto.

Los elementos conformantes de la pista de aterrizaje de un aeropuerto y desarrollados anteriormente, así como su ubicación, se muestran en la figura 8; cabe mencionar que dichos componentes son indispensables para correcta planeación de la pista de un aeropuerto.

Figura 8

Componentes de la pista de despegue y aterrizaje



Nota: en la presente figura se observa la ubicación de todos los elementos que conforman una pista de aterrizaje de un aeropuerto. Donde: 1. Franja de pista, 2. Margen de pista, 3. RESA de (90 a 240 m), 4. Zona libre de obstáculos (CWY), 5. Zona de parada (SWY=STOPWAY), 6. Umbral desplazado.

2.5.2. Orientación de pista de aterrizaje de un aeropuerto

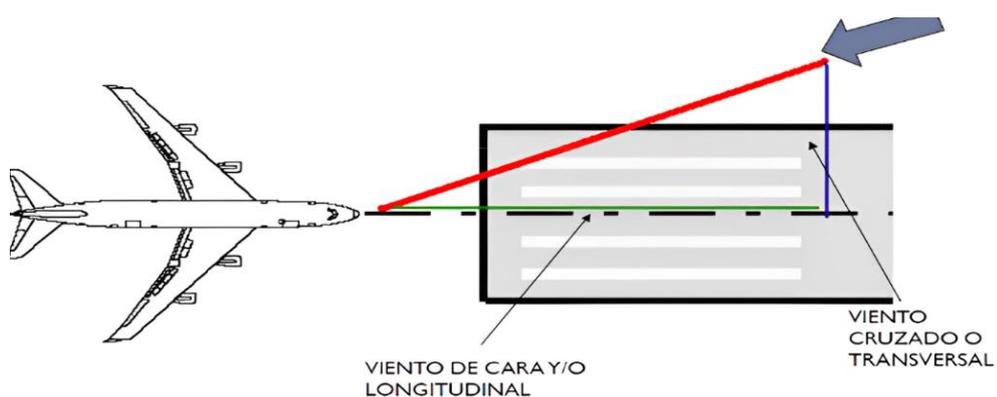
La pista debe orientarse de acuerdo con la dirección del viento predominante y el factor de utilización no debe ser inferior al 95%. Se deberá recopilar información meteorológica de oficinas estatales de meteorología, en caso de nuevos emplazamientos deberán consultarse registros de estaciones cercanas (OACI, 2016).

La DGAC (2021) establece que para la elección de la componente transversal máxima admisible del viento para una óptima orientación de pista debe suponerse que impide el despegue de una aeronave, una velocidad del viento que exceda de:

- 37 km/h, en aviones con LCR \geq 1500 m
- 24 km/h, en aviones con $1200 \text{ m} \leq \text{LCR} < 1500 \text{ m}$
- 19 km/h, en aviones con LCR $< 1200 \text{ m}$

Figura 9

Direcciones del viento para aeronaves



Nota: en la presente figura se muestran las direcciones de viento cuando una aeronave está en vuelo. Tomada de Diseño del pavimento de la pista del Aeropuerto Internacional de la Joya (p. 19), por W. Coaquira, 2020, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA).

Las estadísticas de viento que se utilizan para calcular los factores de utilización están clasificadas en grupos basados en la velocidad y dirección, y la



precisión de los resultados depende de la distribución supuesta de las observaciones en esos grupos. A falta de información fiable de la verdadera distribución de los vientos, se suele suponer una distribución uniforme (OACI, 2016).

2.6. PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS

Son elementos estructurales diseñados y construidos para soportar cargas de aeronaves durante su periodo de vida útil, es un conjunto de capas sobrepuestas de diferentes espesores, las cuales deben recibir y repartir los esfuerzos recibidos y reducir las presiones sobre el terreno de fundación.

Según la circular AC 150/5320-6G (2021) el pavimento de un aeropuerto es una estructura compleja de ingeniería y su análisis requiere interacciones principalmente de factores como la subrasante natural del suelo, el material de las capas y las características de las cargas aplicadas (p. 1-1).

a) Diferencias entre pavimentos de carreteras y pavimentos de aeropuertos

Las superficies del pavimento de los aeropuertos deben ser más duras que las carreteras porque tienen que soportar mayores cargas y presiones de los grandes neumáticos de los aviones. Algunas diferencias que según Huang (2004) debemos tener presente son:

- El número de repeticiones de carga en pavimentos aeroportuarios es generalmente mucho menor que en pavimentos de carreteras.
- En carreteras, el diseño de un pavimento se fundamenta en la aplicación de cargas y su repetición cada cierto tiempo para un comportamiento elástico. En cambio, el

pavimento de un aeropuerto estará sujeto a la aplicación de cargas en la pista y cargas más lentas o estacionarias en la plataforma del aeropuerto.

Para García (2014) la principal diferencia es que en los pavimentos para aeropuertos la repetición de cargas no es tan relevante ya que su distribución es mucho mejor, pero se deberá considerar incidente la repetición de cargas en movimiento lento y/o cargas estacionarias en zonas como las calles de rodaje, plataforma y extremos de pistas (p. 22).

La estructura del pavimento de un aeropuerto está constituida por capas de materiales de alta calidad, normalmente: capa de rodadura, base y subbase.

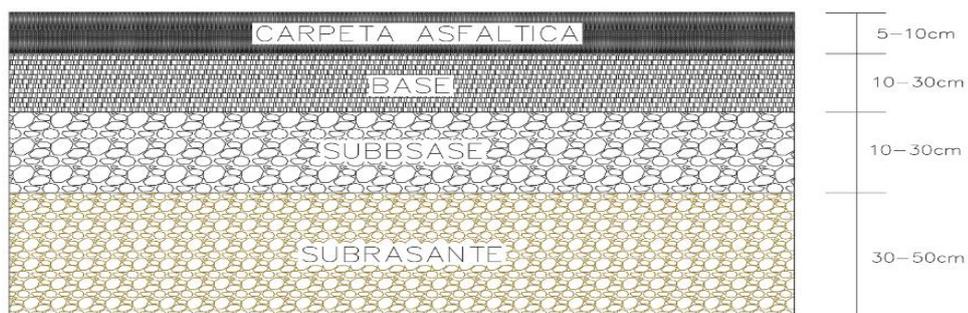
Sin embargo, cualquiera sea el tipo de pavimento, este tiene la misión de repartir las cargas de las ruedas de las aeronaves en superficies tales que la carga no llegue a producir su falla.

2.6.1. Pavimento flexible

Como lo sostiene la AC 150/5320-6G (2021), el pavimento flexible de un aeropuerto está conformado por una capa compuesta de mezcla de asfalto (HMA), una base estabilizada o no y una subbase para proteger la subrasante (p. 3-26).

Figura 10

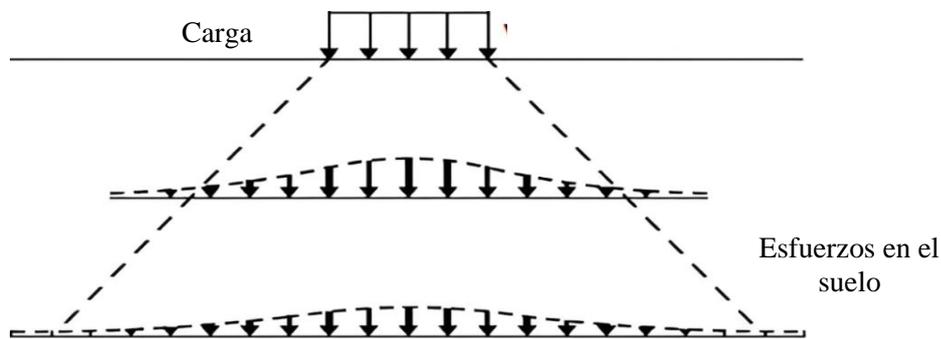
Estructura usual de pavimento flexible de aeropuertos



Nota: En la presente figura se muestra la estructura genérica del pavimento flexible.

Figura 11

Transmisión de cargas en pavimento flexible de aeropuertos



Nota: La carga de la aeronave se distribuye principalmente a través de la resistencia al corte del material de pavimentación. Tomada de *Diseño de pavimentos de aeropuertos*, por T. Barreto, 2020, Universidad de Coímbra.

Cuando la carga se aplica en la parte superior de la capa superficial, se produce una deformación debajo del área de contacto con el neumático (Figura 11), con gran parte de esa deformación recuperable y una cantidad menor es permanente. Dicho esto, el esfuerzo es mayor en la superficie y se reduce con la profundidad, por lo tanto, aquellos materiales de mejor calidad deben estar cerca de la superficie. Por lo anterior decimos que el nombre de pavimento flexible se debe a este efecto de deformación y recuperación que se produce en el momento de la aplicación repetitiva de las cargas.

a) Capa de rodadura

Delgado y Quispe (2012) señalan que es una mezcla asfáltica conformada por agregados y ligante bituminoso que deben prevenir el ingreso de agua las capas inferiores, ser una superficie lisa y capaz de resistir los esfuerzos cortantes producidos por las presiones de las ruedas de las aeronaves (p. 17). La FAA establece que se debe usar el ítem P-401 (Mescla asfáltica en caliente) para pavimentos que sirvan a aeronaves con peso bruto mayor de 27215 kg y el ítem P-403 (Mescla asfáltica) en pavimentos con aviones que pesen 27215 kg o menos.



b) Capa base

Según la AC 150/5320-6G (2021) esta capa debe ser de tal calidad y espesor para evitar su falla, soportar las tensiones, resistir esfuerzos verticales que tienden a producir consolidación que generen fisuras en la capa de rodadura, y soportar las variaciones de volumen. Se clasifica como estabilizada y no estabilizada que se diferencian en la carga de diseño, cuando en el conjunto de tráfico de diseño se tienen pesos brutos de 45360 kg o mayores, se requiere una base estabilizada.

c) Capa subbase

La AC 150/5320-6G (2021) señala que la subbase puede ser granular o de agregado tratado y son requeridas solo cuando se tenga una subrasante de baja calidad con un CBR < 20%. Las especificaciones del material no son tan rigurosas como para la base debido a que esta estará expuesta a menores esfuerzos.

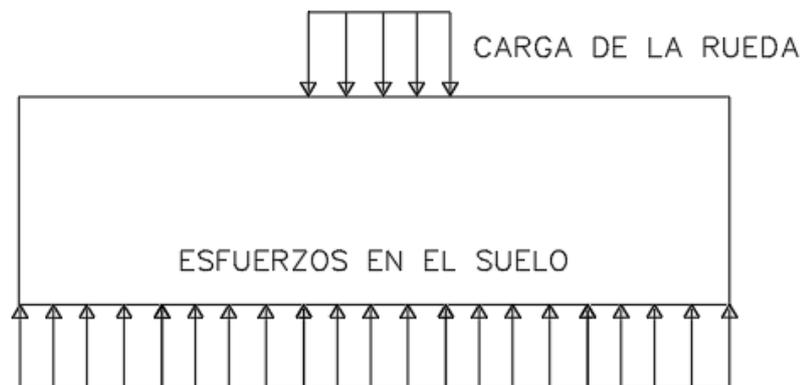
2.6.2. Pavimento rígido

Según la circular AC 150/5320-6G (2021) el pavimento rígido de un aeropuerto consiste en una losa de concreto de Cemento Portland (PCC), colocada sobre una subbase estabilizada o no la cual se apoya sobre la subrasante, además menciona que principal resistencia a las cargas del tráfico de aviones proviene de la losa de hormigón (p. 3-31).

Para Montejo (2006) la capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas de concreto y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño de este pavimento (p. 4,5,509 y 565).

Figura 12

Transmisión de cargas en pavimento rígido de aeropuertos



Nota: La losa de PCC distribuye la carga de la aeronave a la subrasante a través de su rigidez a la flexión.

La carga aplicada se distribuye sobre un área grande (Figura 12). En consecuencia, una de las principales consideraciones del diseño de pavimento rígido es la falla por fatiga del pavimento debido a las cargas repetidas causadas por el tráfico diario.

a) Capa superficial de hormigón

Rolland (2018) afirma que está conformada por una mezcla de agregados pétreos, cemento y agua; debe ser capaz de resistir las cargas, el desgaste y los efectos del rodamiento provocados por las aeronaves, así como por el intemperismo (p. 10).

b) Capa base o subbase

La circular AC 150/5320-6G (2021) sostiene que esta capa proporciona un soporte estable para la placa de hormigón. Cuando los aviones en el conjunto del tráfico tienen pesos brutos máximos ≥ 45360 kg se requiere una subbase estabilizada.

2.6.3. Juntas en pavimento rígido

Horonjeff (2010) considera que los cambios de temperatura pueden ocasionar variaciones de volumen en las placas de concreto, lo que potencialmente crea tensiones significativas. Para dividir al pavimento en losas de menor tamaño y reducir las tensiones y minimizar el agrietamiento aleatorio, se debe usar juntas. La colocación de juntas en pavimento rígido se realiza buscando cumplir con:

- Proporcionar la transferencia adecuada de las cargas.
- Controlar agrietamientos provocados por contracciones y por los efectos combinados de las cargas de las ruedas y el alabeo en la losa.
- No permitir que materiales extraños ingresen al pavimento.
- Seccionar el pavimento en proporciones adecuadas para facilitar su construcción.

Las juntas se clasifican de acuerdo a la función que cumplen, las categorías son de dilatación, contracción y de construcción.

a) Juntas de dilatación (tipos A, A1)

Son muy útiles si el pavimento limita con otra estructura o cuando se requiera aislar la intersección del pavimento donde se pueden producir diferencias en la dirección del movimiento. Por ejemplo, entre la pista principal y las vías de rodaje de aeronaves

b) Juntas de contracción (tipos B, C y D)

Cuando el pavimento se contrae debido a variaciones en el contenido de humedad o en la temperatura, se forman las llamadas grietas controladas.

Tabla 4

Tipos de juntas en pavimento rígido de aeropuertos

Tipo	Descripción	Longitudinal	Transversal
A	Junta de dilatación de borde espesado	Usar en: - Intersección de pavimentos. - Cuando se ubica al borde en una expansión futura. - Bordes de estructuras.	Usar en: - Si el cruce de pavimentos se produce en ángulo. - Cuando se ubica al borde en una expansión futura. - Cuando el pavimento sea adyacente a otra estructura.
A-1	Junta de dilatación reforzada	Para placas de concreto con espesor > 9 in (23 cm). Usar en: - Intersección de pavimentos. - Cuando se ubica al borde en una expansión futura.	Para losas de hormigón con espesor > 9 in (23 cm). Se usa: - Intersección de pavimentos - Cuando se ubica al borde en una expansión futura.
B	Junta de contracción articulada	Juntas de contracción longitudinal en losas de hormigón con espesor < 9 in (23 cm). Juntas de contracción ubicadas a 6 m o menos de un borde libre en losas con espesor < 9 in (23 cm).	No son utilizadas, excepto en losas con espesor < 9 in (23 cm) cuando usen "anillo de tensión".
C	Junta de contracción con pasadores	Para juntas de contracción longitudinal ubicadas a 6 m o menos de un borde libre de pavimento en losas con espesor > 9 in (23 cm)	Utilizada en las últimas tres juntas desde un borde libre, y en las tres juntas a cada lado de una junta de dilatación.
D	Junta de contracción ficticia	Para las demás juntas en los pavimentos.	Para las demás juntas en los pavimentos.
E	Junta de construcción con pasadores	Todas las juntas de construcción a excepción de las juntas de dilatación.	Para juntas de construcción en zonas que dividan operaciones de pavimentación.
F	Junta de construcción a tope	En las juntas de construcción en pavimentos donde operen aeronaves con peso menor que 13610 kg sobre una base estabilizada	Para las juntas de construcción en pavimentos donde operen aeronaves con peso menor que 13610 kg.

Tomada de Circular de asesoramiento AC N° 150/5320-6G (p. 3-38), por la FAA, 2021.

c) Juntas de construcción (tipos E y F)

Se requieren cuando se vierte hormigón sobre dos losas adyacentes en diferentes momentos (por ejemplo, al final de la jornada laboral o entre carrieles pavimentados). Las juntas de construcción tipo E deben usarse en pavimentos donde operarán aeronaves que pesen 13608 kg o más.

2.6.4. Barras de unión en juntas

Según la FAA (2021) las barras de unión se usan en losas con espesor ≤ 22.5 cm, las juntas de contracción dentro de los 6 m de un borde se deben unir para mantener las caras de la losa en contacto. Estas barras no actúan como dispositivos de transferencia de carga, sino que impiden la apertura de la junta. Para losas de más de 15 cm de espesor, estas barras deben ser barras N° 5, tener 76.2 cm de largo y estar espaciadas a 76.2 cm.

2.6.5. Pasadores en juntas

Las barras de unión o pasadores en juntas, proporcionan transferencia de carga a través de la misma y evitan el desplazamiento vertical relativo de los extremos de losas adyacentes. Permiten el movimiento relativo de las losas adyacentes (p. 3-44).

Tabla 5

Características de los pasadores de acero

Espesor de placa	Diámetro	Longitud	Separación
7.5 - 12 in (19.1 – 30.5 cm)	1 in (2.5 cm)	19 in (48.0 cm)	12 in (30.5 cm)
12.5 - 16 in (31.8 – 40.6 cm)	1 ¼ in (3.0 cm)	20 in (51.0 cm)	15 in (38.0 cm)
16.5 - 20 in (41.9 – 45.8 cm)	1 ½ in (4.0 cm)	20 in (51.0 cm)	18 in (46.0 cm)

Tomada de Circular AC N° 150/5320-6G (p. 3-44), por la FAA, 2021.

La circular AC 150/5320-6G (2021) sostiene que el espaciamiento de juntas depende del espesor de la losa. Establece la separación máxima de juntas se muestra:

Tabla 6

Recomendación para separación máxima de juntas

Sin subbase estabilizada		Con subbase estabilizada	
Espesor de la placa	Sep. de juntas	Espesor de la losa	Sep. de juntas
< 6 in (15.2 cm)	12.5 ft (3.8 m)	8–10 in (20.3–25.4 cm)	12.5 ft (3.8 m)
6.5–9 in (16.5–22.9 cm)	15 ft (4.6 m)	10.5–13 in (26.7–33.0 cm)	15 ft (4.6 m)
> 9 in (22.9 cm)	20 ft (6.1 m)	13.5–16 in (34.3–40.6 cm)	17.5 ft (5.3 m)
		> 16 in (40.6 cm)	20 ft (6.1 m)

Tomada de Circular AC N° 150/5320-6G (p. 3-47), por la FAA, 2021.

2.7. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS

Según Horonjeff (2010), la FAA y la OACI son consideradas las fuentes más importantes para el diseño de pavimentos aeroportuarios. Estas organizaciones presentan estándares mundialmente aceptados y aplicados en el diseño de pavimentos para aeropuertos. Diversos autores señalan que los pavimentos de aeropuertos deben construirse siguiendo estrictas directrices y especificaciones de la FAA y la OACI.

Los pavimentos de carreteras y aeropuertos no son sustancialmente diferentes, y los principios básicos para el diseño, la construcción y el mantenimiento son similares, sin embargo, lo que es diferente es la magnitud de las cargas aplicadas, que en el caso de aeropuerto es mucho mayor, además, debe tenerse en cuenta que los aviones son menos tolerantes al deslizamiento o la desviación que los automóviles, por lo que el nivel de demanda de una infraestructura aeroportuaria es mayor (Barreto, 2020).

Tabla 7*Comparación de pavimentos de aeropuertos y pavimentos de carreteras*

Característica	Pavimentos de aeropuertos	Pavimentos de carreteras
Repeticiones de carga	Bajo, a menudo 100.000 o menos.	Alto, a menudo 1.000.000 o más.
Distribución del tráfico	Alto, mejor distribución de aeronaves a lo ancho del pavimento.	Bajo, tráfico muy canalizado en carriles designados.
Carga de rueda	Alto, hasta 25 toneladas por rueda.	Bajo, generalmente solo hasta 3 toneladas por rueda.
Presión de llanta	Alto, por lo general, hasta 1,7 MPa y, a veces, hasta 2,5 MPa.	Moderado, generalmente no más de 0,8 MPa.
Estancamiento de agua	Alto, en especial para pavimentos granulares.	Alto, especial para pavimentos granulares.
Textura de superficie	Moderado, por los bajos volúmenes de tráfico que se tienen generalmente	Alto, especialmente para mantener la resistencia al deslizamiento.
Durabilidad	Alto, en zonas de contacto donde se produce el aceleramiento de ruedas.	Moderado, en giros e intersecciones, menos en tramos rectos.

Tomada de Diseño de pavimentos de aeropuertos (p. 27), por T. Barreto, 2020, Universidad de Coímbra.

2.7.1. Metodologías para el diseño de pavimentos aeroportuarios

El diseño de pavimentos aeroportuarios se refiere a la determinación del espesor de las capas del pavimento (capa superficial, base y subbase), y no al diseño de los materiales que conforman dichas capas (por ejemplo, HMA o PCC) (FAA, 2004). El cálculo de espesores de pavimentos aeroportuarios se puede analizar desde 2 enfoques diferentes:

- a) Analítico o racional: El cual estima los parámetros básicos del diseño como, tráfico, clima, costos y otros parámetros inherentes, de forma explícita, para determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones (FAA, 2004).
- b) Empírico: Considera los anteriores factores de manera global e implícita, utiliza la experiencia del comportamiento de pavimentos ya construidos.



Ambos enfoques tienen como fin el dimensionamiento de pavimentos y con el tiempo se han ido combinando dando como resultado métodos semi-empíricos. Las variables que afectan el diseño y desempeño del pavimento incluyen:

- Estructurales: El suelo de cimentación o subrasante, implica determinar la resistencia del suelo de subrasante.
- Tránsito: Su finalidad es conocer el nivel de sollicitación que producen los aviones sobre la estructura de pavimento, para lo cual es importante analizar el tamaño de las cargas, las características del tren de aterrizaje y el volumen del tráfico estimado.
- Clima: Son las condiciones atmosféricas de la región del proyecto, determinados por los valores medios de temperatura, lluvias, vientos, etc.
- Costos: Desde la fase del diseño, se debe optimizar los costos de construcción, intentando equilibrar los aspectos técnicos con los procesos constructivos.
- Factores intrínsecos: Relacionados al comportamiento mismo de la estructura de pavimento tales como la resistencia estructural, la deformabilidad, y la durabilidad.

2.8. DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE PARA AEROPUERTOS

2.8.1. Método de la OACI (CBR)

El procedimiento de diseño de la OACI, desarrollado originalmente en la década de 1940 para el diseño de pavimentos flexibles de aeropuertos, se basa en gráficos de aproximación elaborados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE), mediante estudios en pistas de prueba y observaciones de pavimentos en servicio, dichos estudios consistieron en la construcción de

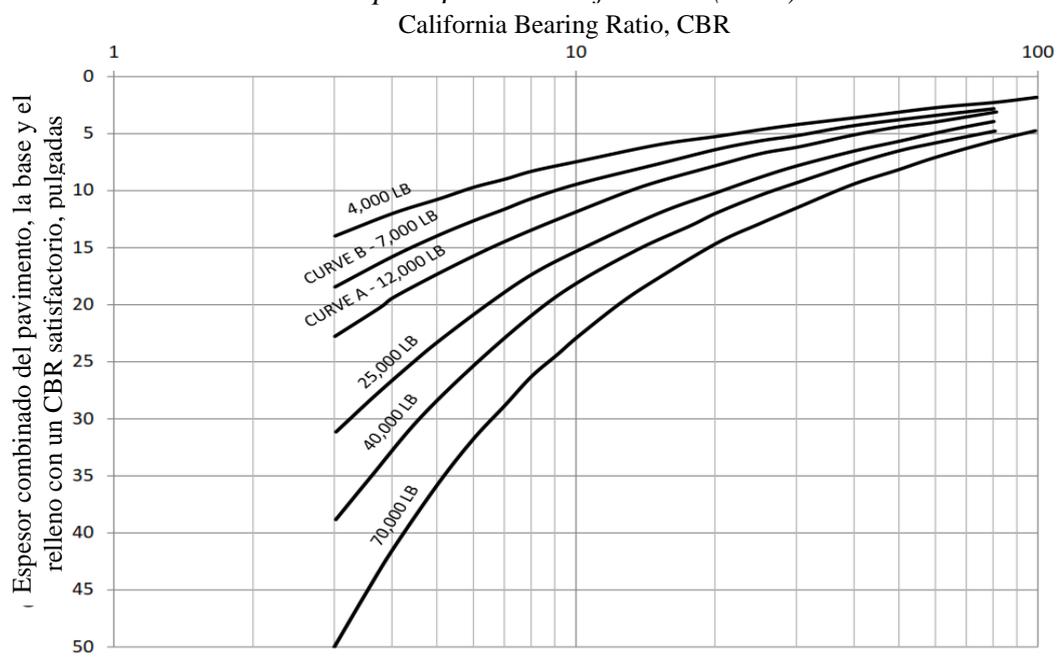
pistas a gran escala, en donde se evaluó el comportamiento de los pavimentos ante las cargas de las ruedas de aeronaves (González, 2015).

a) Pruebas y estudios a gran escala

Las curvas de diseño usaron el criterio de una sola rueda estática y se desarrollaron inicialmente para cargas de rueda de 7000 y 12000 lb en 1949. Posteriormente, mediante la extrapolación, se proporcionaron curvas de diseño para cargas de rueda mayores como se aprecia en la Figura 13. Las secciones de prueba eran variables, consistieron en una capa base compactada de arena y grava, aumentando gradualmente en espesor de 6 pulg. a 48 pulg. (152 mm a 1219 mm) y una capa de hormigón asfáltico de 3 pulg. (76 mm) (González, 2015).

Figura 13

Curvas de diseño tentativas para pavimentos flexibles (1949)



Tomada de Development of a stress for the design of flexible pavements, por G. Rubén, 2015.

Se establece esta aproximación como un procedimiento para obtener un espesor de pavimento suficiente para reducir al mínimo la deformación por corte en la subrasante.

b) Validación de curvas de diseño tentativas

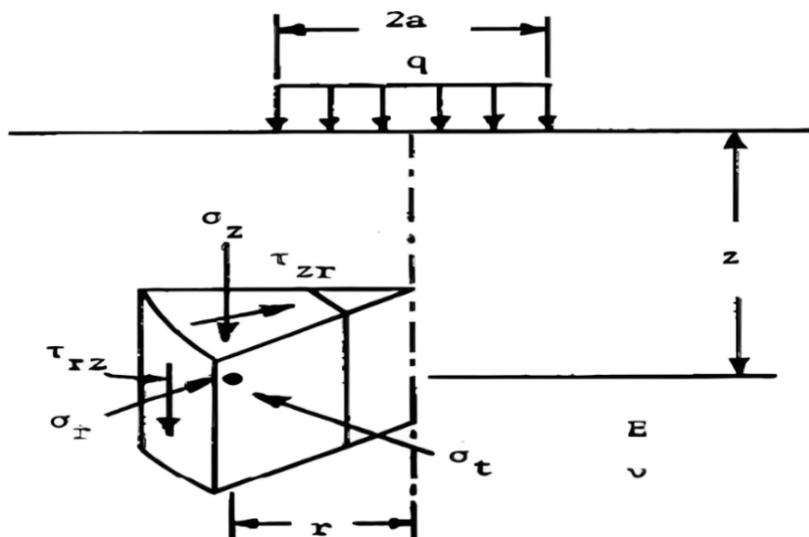
Se realizaron pruebas de carga estática en aeropuertos existentes y se construyeron secciones especiales de pavimentos para pruebas de tráfico. Sin embargo, incluso con las extensas pruebas y evaluaciones de pavimentos flexibles, las curvas de diseño tentativas no sufrieron cambios significativos, pero si se ajustaron para incluir las repeticiones de carga en términos de salidas anuales equivalentes (González, 2015).

c) Modelo matemático

El modelo matemático para esfuerzos, deformaciones y deflexiones se extiende a una sola capa uniforme (homogénea e isotrópica) con carga estática en la superficie. Las curvas de diseño de pavimentos para aeropuertos emplean la teoría de distribución de tensiones de Boussinesq en un semiespacio homogéneo, complementadas con extensas pruebas de campo y la experiencia de pavimentos aeroportuarios en servicio (González, 2015).

Figura 14

Modelo matemático del método de diseño de la OACI



Tomada de Pavement Analysis and Design (p. 58), por Y. Huang, 2004.

d) Modo de falla

Para este procedimiento de diseño se supone una falla de la subrasante por exceso de esfuerzo vertical. El criterio de falla se basa en 1 pulg. de ahuellamiento (falla por corte en la subrasante) en la ruta del tráfico o agrietamiento significativo (el agrietamiento en la capa HMA ha ocurrido hasta tal punto que el pavimento ya no es impermeable) (González, 2015).

e) Trazado de curvas de diseño

Las curvas de cálculo para pavimentos flexibles se trazaron para el peso neto máximo del avión, suponiendo que el 95% del mismo será resistido por tren de aterrizaje principal y el 5% del peso neto será soportado por las ruedas delanteras. Además, se supone que las salidas anuales ocurren a lo largo de una vida útil de 20 años y no admite cambios en este valor (Barreto, 2020).

Los pavimentos se calculan con base del análisis de cargas estáticas. Se considera que las cargas por impacto no incrementan los requisitos de las capas del pavimento. Las repeticiones de carga se representan en las curvas de diseño en términos de salidas anuales equivalentes.

Tabla 8

Características de las aeronaves para el trazado de las curvas de diseño

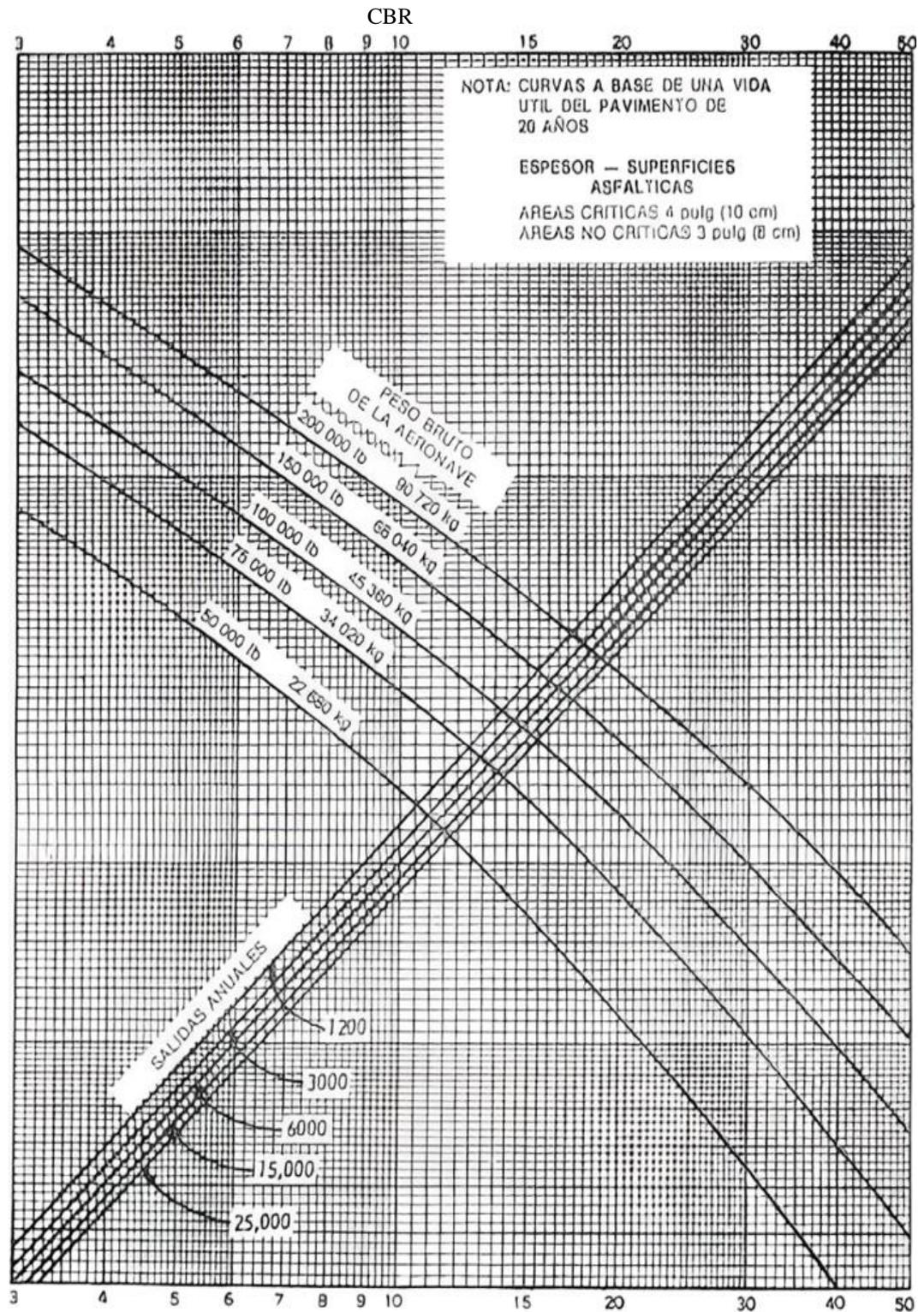
Peso bruto		Presión de neumáticos		Espaciado entre ruedas gemelas	
Lb	kg	Lb/pulg ²	MN/m ²	Pulg.	cm
50000	22700	90	0.55	20	51
75000	34000	110	0.76	21	53
100000	45000	140	0.97	23	58
150000	68000	160	1.10	30	76
200000	90700	200	1.38	34	86

Adaptada de Manual de diseño de aeródromos (Doc. 9157-AN/901) - Parte 3, OACI, pág. 3-319.

En la tabla precedente, se muestran, las características de las aeronaves para un conjunto de tren de aterrizaje correspondiente al tipo de ruedas gemelas.

Figura 15

Ejemplo de nomograma para el cálculo de pavimentos flexibles



Adaptada de Manual de diseño de aeródromos (Doc. 9157-AN/901) - Parte 3, OACI.

Espesor total (pulg.)

f) Procedimiento básico de diseño

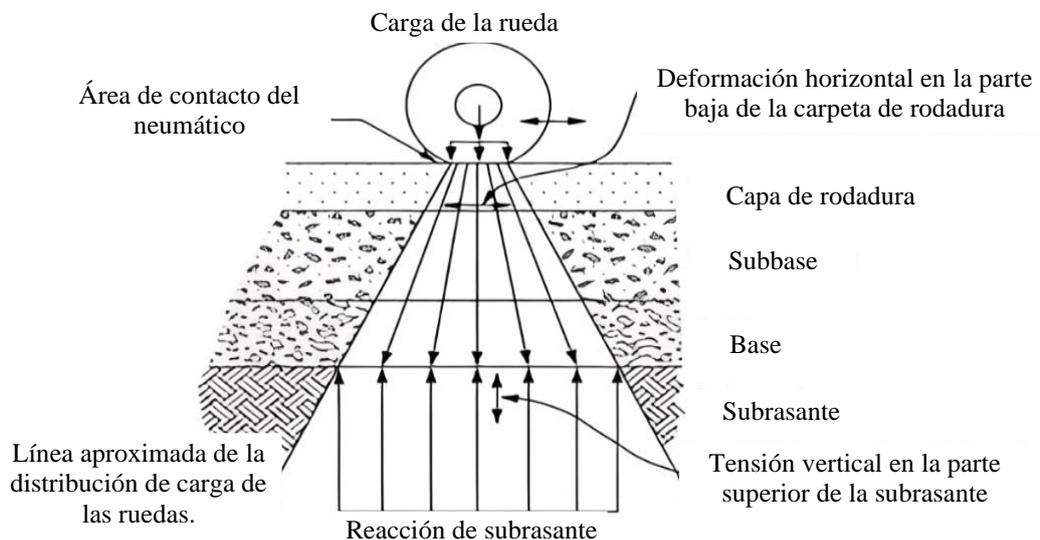
El procedimiento se basa en determinar las salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño y calcular el espesor de la sección del pavimento a partir de los nomogramas de diseño del USACE. Un ejemplo de un nomograma de cálculo para un tren de aterrizaje del tipo ruedas gemelas se muestra en la Figura 15.

2.8.2. Método de la FAA (capas elásticas)

Aplicado originalmente en 1995 específicamente para las aeronaves más pesadas, luego a partir de 2008, la FAA adoptó oficialmente este método mecánico - empírico de diseño elástico de capas (LED) para pavimentos flexibles aeroportuarios (Barreto, 2020).

Figura 16

Idealización de la teoría de diseño de capas elásticas



Tomada de Planificación y diseño de aeropuertos (p. 274), por Horonjeff, 2010.

a) Modelo matemático

- Es un sistema compuesto por capas homogéneas, isótropas y elásticas lineales con propiedades definidas por el módulo de elasticidad y la relación de poisson (Horonjeff, 2010).

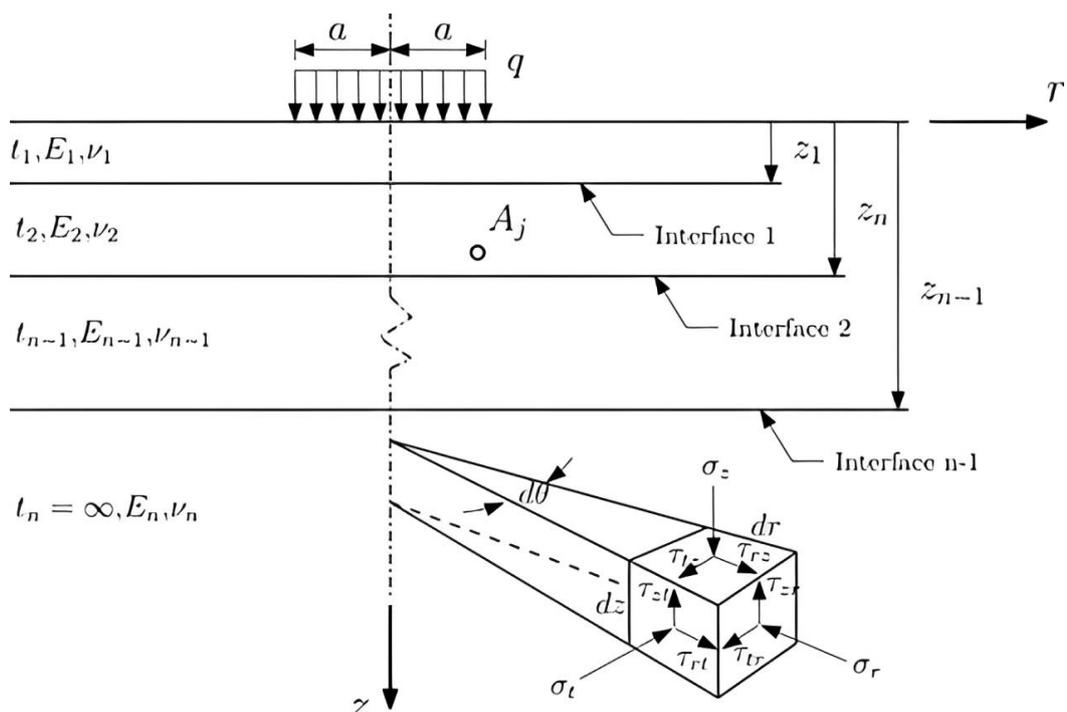
- Todas las capas del pavimento se ven afectadas por esfuerzos, deformaciones y deflexiones tanto verticales como horizontales.
- Se toma en cuenta un área circular de contacto entre la rueda de la aeronave y la superficie del pavimento.
- Todas las capas son de espesor uniforme e infinitas en dirección horizontal. La última capa del sistema se extiende infinitamente en el plano vertical.
- Existe continuidad de repuestas estructurales en las interfaces de las capas.

b) Respuesta estructural

El conjunto de respuestas estructurales que se calculan a partir de las ecuaciones elásticas de capas son esfuerzos, deformaciones y deflexiones (Horonjeff, 2010). Se basa en el semiespacio de múltiples capas idealizado tal como se muestra a continuación:

Figura 17

Idealización del sistema del pavimento por el método de capas elásticas



Tomada de LEAF: Un nuevo programa computacional elástico en capas, por Hayhoe, 2002.

Se sintetiza en resolver los sistemas de ecuaciones del medio continuo alrededor de un pequeño diferencial de volumen, para ello Valliappan (1981) presentó las siguientes ecuaciones de equilibrio en coordenadas cilíndricas r (radial), θ (tangencial) y z (vertical):

- Ecuaciones de equilibrio de esfuerzos: Relacionan 3 esfuerzos normales y 3 esfuerzos cortantes que se combinan en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r} * \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{1}{r} * \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{1}{r} * \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \quad (3)$$

- Relaciones deformación–desplazamiento: Indican la proporción entre los esfuerzos y el cambio del volumen en el continuo.

3 deformaciones normales

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} * \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (4)$$

3 deformaciones cortantes

$$\gamma_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}, \quad \gamma_{\theta z} = \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} * \frac{\partial u_z}{\partial \theta}, \quad \gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} * \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \quad (5)$$

3 desplazamientos

$$u_r, \quad u_z, \quad u_\theta \quad (6)$$

- Ecuaciones de compatibilidad de deformaciones (ley de conservación de la masa): Definen las interrelaciones entre las deformaciones normales y

cortantes de manera que el elemento diferencial tenga la posibilidad de cambiar de forma, pero siempre conserve la posición relativa de sus aristas:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{rz}}{\partial r \partial z} \quad (7)$$

$$-r \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 (r * \varepsilon_\theta)}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 (r * \gamma_{r\theta})}{\partial r \partial \theta} \quad (8)$$

$$r^2 \frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial z^2} + r \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial \theta^2} - r \frac{\partial \gamma_{rz}}{\partial z} = r \frac{\partial^2 \gamma_{\theta z}}{\partial z \partial \theta} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial (r * \gamma_{r\theta})}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r * \gamma_{r\theta}) - \frac{\partial \gamma_{rz}}{\partial \theta} \right] = 2r \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r * \varepsilon_r) - \varepsilon_r \right] \quad (10)$$

$$r^2 \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r * \gamma_{\theta z}) - \frac{\partial \gamma_{rz}}{\partial \theta} \right] \right\} - \frac{\partial^2 (r * \gamma_{r\theta})}{\partial z \partial r} = 2 \frac{\partial^2 (r * \varepsilon_r)}{\partial z \partial \theta} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial \gamma_{r\theta}}{\partial z} - r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\gamma_{\theta z}}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial \gamma_{rz}}{\partial \theta} \right] = -2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial \theta} \right) \quad (12)$$

- Ecuaciones constitutivas: Relacionan las deformaciones en todas las direcciones con el estado de esfuerzos tridimensionales en función E y ν :

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)], \varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)], \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \quad (13)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}}{G}, \quad \gamma_{\theta z} = \frac{\tau_{\theta z}}{G}, \quad \gamma_{zr} = \frac{\tau_{zr}}{G} \quad (14)$$

Donde: E es el módulo de elasticidad y ν es la relación de poisson.

Ecuaciones básicas de elasticidad del solido: En un punto del continuo tenemos 15 incógnitas: 6 esfuerzos, 6 deformaciones y 3 desplazamientos. Y para resolver el sistema tenemos 15 ecuaciones; 3 de equilibrio de esfuerzos, 6 de compatibilidad de deformaciones y 6 constitutivas (Vásquez, 2021). Cabe mencionar cada elemento de las ecuaciones para la solución del medio continuo no son de valores constantes, sino que son funciones para efecto general de todo

el continuo; pero se convierten en valores cuando se resuelve un caso puntual (Vásquez, 2021).

Para la solución del sistema de ecuaciones planteadas se tienen varios enfoques. Para el caso de un problema de un sólido en coordenada r, z, θ , Burmister propuso la existencia de una función de esfuerzo (φ) para definir los esfuerzos y desplazamientos:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right], \sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right], \sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] \quad (15)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] \quad (16)$$

$$u_z = w = \frac{1 + \nu}{E} \left[(1 - 2\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right], \quad u_r = u = -\frac{1 + \nu}{E} \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right] \quad (17)$$

- Función de esfuerzo: Se asumen una función de esfuerzo, φ , para cada capa que satisface la ecuación diferencial:

$$\nabla^4 \varphi = 0 \quad (18)$$

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (19)$$

Huang (2004) propone la siguiente solución para la función φ con coordenadas normalizadas con el espesor del pavimento:

$$\varphi_i = \frac{H^3 J_0(m\rho)}{m^2} \left[A_i e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} - C_i m \lambda e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i m \lambda e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \right] \quad (20)$$

Donde:

- H es el espesor total del pavimento, $H = \sum_{i=1}^{n-1} h_i$.
- J_0 es una función de Bessel de primera clase y de orden cero. m es un parámetro de integración.

- Las coordenadas normalizadas del punto de análisis son: $\rho = \frac{r}{H}$ y $\lambda = \frac{z}{H}$.
- λ_{i-1} es la cota normalizada superior de la capa i y λ_i es la cota inferior de la capa i .
- $A_i \dots D_i$ son las constantes de integración, derivadas de las condiciones de frontera e interfaces entre capas.

Reescribiendo las ecuaciones de esfuerzo y desplazamiento con la función de esfuerzo de Huang obtenemos una ecuación que se puede resolver numéricamente:

- Esfuerzo vertical:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] \quad (21)$$

$$(\sigma_z^*)_i = -m J_0(m\rho) \left\{ \begin{array}{l} [A_i - C_i(1 - 2\nu_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} \\ + [B_i - D_i(1 - 2\nu_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \end{array} \right\} \quad (22)$$

- Desplazamiento vertical:

$$u_z = w = \frac{1 + \nu}{E} \left[(1 - 2\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] \quad (23)$$

$$(w^*)_i = -H \frac{1 + \nu_i}{E_i} J_0(m\rho) \left\{ \begin{array}{l} [A_i - C_i(2 - 4\nu_i - m\lambda)] e^{-m(\lambda_i - \lambda)} \\ - [B_i - D_i(2 - 4\nu_i + m\lambda)] e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \end{array} \right\} \quad (24)$$

Siguiendo el mismo procedimiento se encuentran ecuaciones para los esfuerzos normales en las direcciones r y θ , el esfuerzo cortante en el plano rz y el desplazamiento horizontal u (Vásquez, 2021). Estas respuestas se deben a una carga igual a $-m J_0(m\rho)$, por lo tanto, se debe realizar la integración para obtener las respuestas reales debidas a una presión q distribuida en un área circular de radio “ a ” (Vásquez, 2021).

- Solución bajo un área circular cargada

Se emplea la transformación de Hankel para la carga uniforme aplicada en la superficie. Si R^* es uno de los esfuerzos o desplazamientos debidos a la carga $-mJ_0(m\rho)$, se puede obtener el valor real, R , de dicho esfuerzo o desplazamiento debido a la carga q mediante la siguiente ecuación:

$$R = q\alpha \int_0^\infty \frac{R^*}{m} J_1(m\alpha) dm \quad (25)$$

Donde J_1 es una función de Bessel de orden y clase 1, α es el radio normalizado del área circular cargada ($\alpha = \frac{a}{H}$), y q es la presión aplicada. El análisis de capas implica los siguientes pasos:

1. Asignar valores sucesivos de m de 0 a un número positivo hasta que R converja.
 2. Para cada valor de m determine las constantes de integración $A_i \dots D_i$ de cada capa.
 3. Sustituya estas constantes en la ecuación correspondiente de R^* . Obtenga R mediante integración numérica.
- Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera en la superficie son ($i = 1, \lambda = 0$). Solo existe aplicación de la carga vertical.

$$(\sigma_z^*)_1 = -mJ_0(m\rho) \quad y \quad (\tau_{rz}^*)_1 = 0 \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} e^{-m\lambda_1} & 1 \\ e^{-m\lambda_1} & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -(1-2\nu_1)e^{-m\lambda_1} & 1-2\nu_1 \\ 2\nu_1 e^{-m\lambda_1} & 2\nu_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

Los esfuerzos y desplazamientos son cero (0) cuando $\lambda \rightarrow \infty$ (subrasante), de tal forma que las constantes de integración son nulas $A_n = C_n = 0$. En cualquier

interface intermedia con continuidad de esfuerzos σ_z y τ_{rz} , y los desplazamientos w y u , se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} 1 & F_i & -(1 - 2v_i - m\lambda_i) & (1 - 2v_i + m\lambda_i) * F_i \\ 1 & -F_i & 2v_i + m\lambda_i & (2v_i - m\lambda_i) * F_i \\ 1 & F_i & 1 + m\lambda_i & (1 - m\lambda_i) * F_i \\ 1 & -F_i & -(2 - 4v_i - m\lambda_i) & -(2 - 4v_i + m\lambda_i) * F_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} & 1 & -(1 - 2v_{i+1} - m\lambda_i) * F_{i+1} & 1 - 2v_{i+1} + m\lambda_i \\ F_{i+1} & -1 & (2v_i + m\lambda_i) * F_{i+1} & 2v_{i+1} - m\lambda_i \\ R_i * F_{i+1} & R_i & (1 + m\lambda_i) * R_i * F_{i+1} & -(1 - m\lambda_i) * R_i \\ R_i * F_{i+1} & -R_i & -(2 - 4v_{i+1} - m\lambda_i) * R_i * F_{i+1} & -(2 - 4v_{i+1} + m\lambda_i) * R_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

Donde:

$$F_i = e^{-m(\lambda_i - \lambda_{i-1})}$$

$$R_i = \frac{E_i}{E_{i+1}} * \frac{1 + v_{i+1}}{v_i}$$

Para la resolución del sistema de ecuaciones anterior el método (LED) utiliza el programa computacional de capas elásticas LEAF, que es un software informático de análisis elástico de capas desarrollado como componente para su uso como en los programas de aplicación de diseño de pavimentos aeroportuarios (Vásquez, 2021).

c) Modo de falla

El criterio de falla se estableció con base en pruebas recientes a gran escala en la Instalación Nacional de Pruebas de Pavimentos de Aeropuertos (NAPTF). Estas pruebas fueron realizadas por la necesidad de desarrollar procedimientos de diseño de pavimentos para la nueva generación de grandes aeronaves (Maoyun, 2017). Las especificaciones para los últimos pavimentos de prueba son:

- Los pavimentos de prueba miden 900 pies (274.3 m) de largo por 60 pies (18.3 m) de ancho.



- 9 elementos de prueba independientes en la pista (6 flexibles y 3 rígidos) contruidos sobre tres materiales de subrasante distintos: baja resistencia CBR de 4, media resistencia CBR de 8 y alta resistencia CBR de 20.
- 12 ruedas de prueba capaces de representar 2 sistemas de trenes de aterrizaje completos que tengan de 2 a 6 ruedas por camión y ajustables hasta 20 pies (6.1 m) hacia adelante y hacia los lados.
- Cargas de rueda ajustables a un máximo de 75,000 lb (34018.4 kg) por rueda.

Considera dos modelos críticos de falla, la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de la capa de asfalto (falla por fatiga) y la deformación vertical por compresión en la parte superior de la subrasante (falla de la subrasante) (FAA, 2017).

El primer modelo está relacionado con las capas superficiales que pueden estar sujetas a mantenimiento, mientras que el segundo está relacionado con la falla del suelo de la subrasante, por lo tanto, con la vida útil del pavimento.

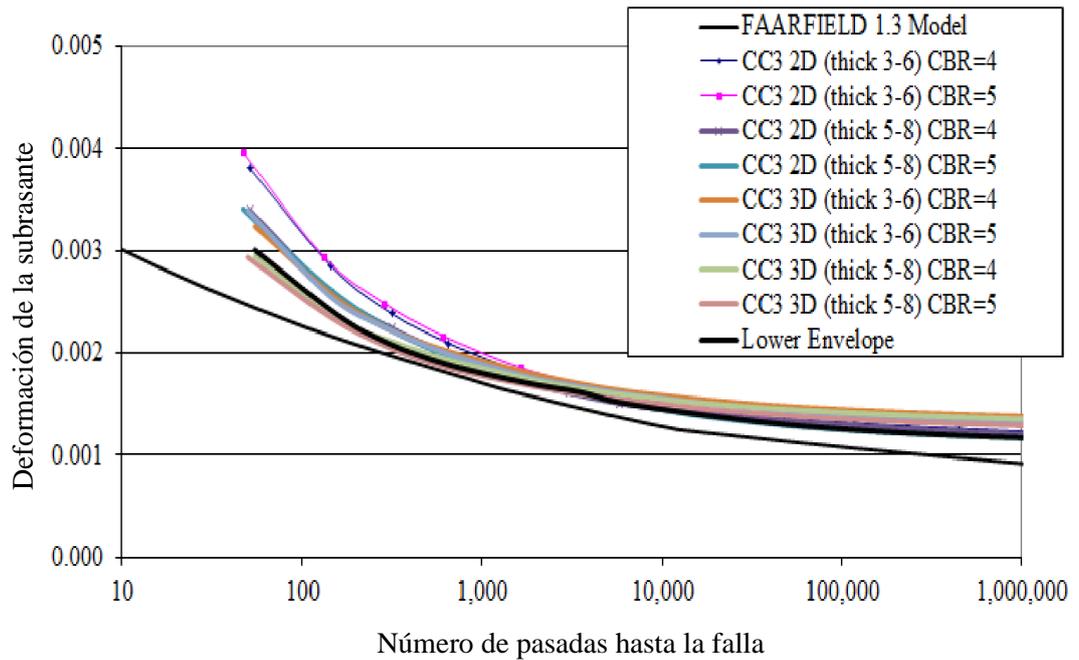
1. Deformación admisible por compresión en la subrasante

El criterio de deformación admisible en la parte superior de la subrasante fue desarrollado por la FAA en base al estudio y cálculo retrospectivo del comportamiento de pavimentos en servicio. Al desarrollar curvas de deformación versus coberturas, se analizaron 2 tipos de estructuras típicas. El Tipo I constó de una mezcla asfáltica en caliente (HMA) superficial P-401 de 3 pulg, una capa base P-403 de 6 pulg y una subbase P-154. El tipo II consistió en una superficie HMA P-401 de 5 pulg, una capa base P-209 de 8 pulg y una subbase P-154. Las propiedades de los materiales se basaron en las mejores estimaciones de datos proporcionados en los informes de pruebas anteriores a gran escala. El criterio de

falla técnica aplicado fue el desarrollo de al menos 1 pulg. de levantamiento superficial fuera de los límites del área de tránsito, lo que indica una falla general por corte de la subrasante (FAA, 2017).

Figura 18

Envolvente inferior para curvas de falla desarrolladas



Nota: Se muestra la envolvente de las deformaciones en la subrasante. Tomada de Desarrollo de nuevo modelo de falla de subrasantes para pavimentos flexibles en FAARFIELD, FAA, 2017.

Para determinar la deformación admisible en la subrasante de un pavimento en base al número máximo de pasadas admisibles, se emplea las siguientes expresiones, descritas en DOT/FAA/TC-17/28, teniendo en cuenta las consideraciones para cada caso (FAA, 2017).

$$C = \left(\frac{0.004}{\epsilon_v} \right)^{8.1} \quad \text{Cuando } C \text{ es } \leq a \text{ 12100} \quad (30)$$

$$C = \left(\frac{0.002428}{\epsilon_v} \right)^{14.2} \quad \text{Cuando } C \text{ es } > a \text{ 12100} \quad (31)$$



Donde: C es el total de pasadas que generan la falla y ϵ_v es la deformación vertical admisible por compresión antes de la falla que ocurre encima del suelo de subrasante.

2. Deformación admisible por tracción en la capa de rodadura

Como criterio se considera que la deformación por tracción en la base de la capa de rodadura debe ser menor que la deformación admisible. Varios investigadores han demostrado que la relación entre las repeticiones de carga a la falla N_f y la deformación del material asfáltico depende de la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa unida con asfalto y del módulo de la mezcla asfáltica.

Heukelom y Klomp (1962) sugirieron la siguiente relación entre el número de repeticiones de carga hasta la falla y la deformación en el concreto asfáltico: $N_f = 10^{-x}$, donde N_f es el número de aplicaciones de carga al fallo, $x = 5 * \text{Log}_{10} \epsilon_{AA} + 2.665 \text{Log}_{10} \left(\frac{E_A}{14.22} \right) + 0.392$. La FAA tomó dicho criterio y adaptándolo para el caso de aeropuertos presentó la siguiente expresión descrita por Quintero (2011):

$$\text{Log}_{10} C = 2.68 - 5 * \text{Log}_{10} \epsilon_{AA} - 2.665 * \text{Log}_{10} E_A \quad (32)$$

Donde: C es el número de pasadas que generan la falla, E_A es el módulo de concreto asfáltico en lb/pulg y ϵ_{AA} es la deformación por tracción en la base de la capa asfáltica (admisibles).

d) Factor de daño acumulativo (CDF)

El factor de daño acumulativo es el valor de vida útil estructural que ha agotado un pavimento en servicio. Se expresa como la relación entre las



repeticiones de la carga aplicada y las repeticiones de la carga permitida hasta la falla, para una combinación de tráfico establecida o, para un avión y sus salidas anuales equivalentes (FAA, 2017). Con base en la regla de Miner el CDF para una flota de aeronaves dada está determinada por:

$$CDF = \sum \frac{\text{coberturas aplicadas}}{\text{coberturas a la falla}} \quad (33)$$

Un CDF de 1 indica que el pavimento ya ha alcanzado el final de su vida a la fatiga, $CDF < 1$ significa que el pavimento tiene aún un porcentaje de vida, y el valor del CDF nos proporcionará la fracción de la vida utilizada; y $CDF > 1$ significa que toda la vida útil del pavimento se ha terminado y que por lo tanto este ya habrá fallado por fatiga.

2.9. DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO PARA AEROPUERTOS

2.9.1. Método de la OACI (Westergaard)

Este método está basado en las teorías de Harold Westergaard. El análisis de Westergaard para el diseño de pavimentos se fundó a mediados de la década de 1920 y se centró en el cálculo teórico de esfuerzos y deflexiones en pavimentos de hormigón debido a las cargas aplicadas de las ruedas de las aeronaves (Hernández, 2012).

a) Modelo matemático

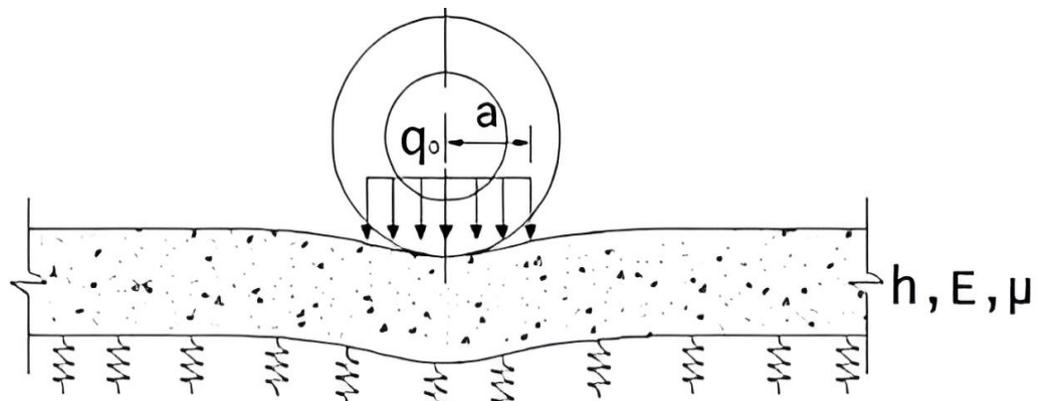
Westergaard supuso que la losa de pavimento es una placa delgada que descansa sobre una subrasante líquida densa (fundación winkleriana) que se consideraba elástica verticalmente (Hernández, 2012). Es decir, la reacción es proporcional a la deflexión de la subrasante:

$$p = k * z \quad (34)$$

Donde z es la deflexión y k es el módulo de reacción de subrasante.

Figura 19

Idealización del planteamiento de Westergaard para pavimento rígido



Tomada de: Estado actual del conocimiento en modelado de pavimento rígido, por Hernández, 2012.

Según Mallick y El-Korchi (2013), en la teoría desarrollada por Westergaard, se adoptan algunas simplificaciones, tales como:

- La losa de pavimento es una placa delgada sostenida por una subrasante que se considera elástica solo en la dirección vertical; es un sólido homogéneo, elástico e isotrópico, y está en total contacto con la subrasante.
- La carga de las ruedas de las aeronaves se distribuye sobre un área circular.

Aunque estos supuestos no satisfacen la teoría en un sentido estricto, los resultados se comparan razonablemente con las observaciones.

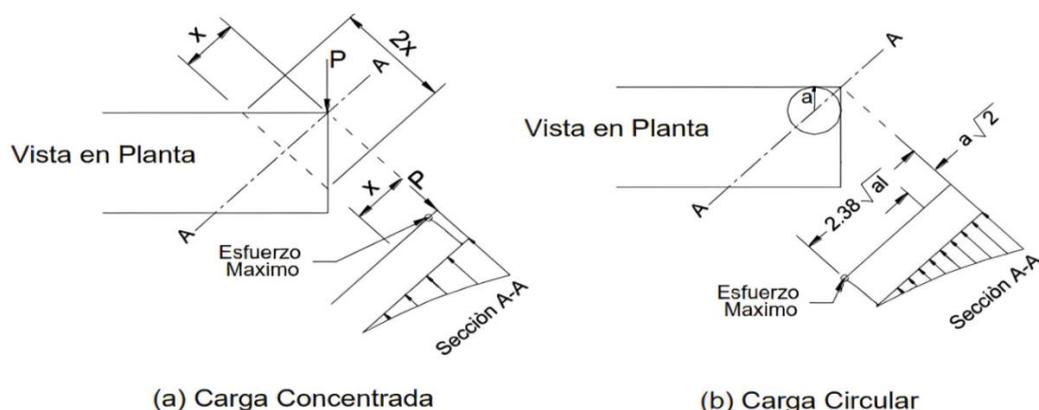
b) Ecuaciones de Westergaard

Para evaluar los esfuerzos y las deflexiones de la losa, Westergaard presentó ecuaciones cerradas en 3 puntos críticos de la losa rígida:

- Carga en la esquina: Este esfuerzo se produce en forma de grietas en la esquina de la losa, la magnitud del esfuerzo depende directamente de la carga aplicada y su configuración, el espesor de la losa, el módulo de reacción de la subrasante y el radio de rigidez de la losa.

Figura 20

Esfuerzos por carga en la esquina de la losa



Nota: Se muestra el efecto de una carga puntual en la esquina de una losa.

La fórmula de Gold beck (1919) como se muestra en la Figura 20, ofrece una solución exacta cuando se tiene una carga concentrada cerca de la esquina. Las tensiones producidas en la losa son simétricas respecto a su diagonal, considerando una distancia x de la equina a la sección transversal, el momento flector es Px y la anchura de la sección es $2x$, el esfuerzo en la losa es:

$$\sigma_c = \frac{Px}{\frac{(2x)h^2}{6}} = \frac{3P}{h^2} \quad (35)$$

Donde σ_c es el esfuerzo de tensión en la cara superior de la losa en $lb/pulg$, P es la carga en lb y h es el espesor de la losa en $pulg$.

Westergaard aplicó aproximaciones continuadas y dedujo las siguientes ecuaciones para calcular tensiones y deflexiones por carga con un área circular en la esquina del pavimento:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (36)$$

$$\Delta_e = \frac{P}{klh^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (37)$$

Dónde: σ_e es el esfuerzo de tensión en la placa en $lb/pulg^2$, Δ_e es la deflexión en la esquina de la placa en $pulg$, h es el espesor de la placa en $pulg$, a es el radio del área circular de carga en $pulg$, P es la carga en lb , k es el módulo de reacción de la subrasante en $lb/pulg^2$ y l es el radio de rigidez en $pulg$:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E * h^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad (38)$$

Dónde: E es el módulo de elasticidad del concreto en $lb/pulg^2$, μ es la relación de poisson del concreto y k es el módulo de reacción de la subrasante.

- Carga en el borde: Este esfuerzo se produce en forma de grietas transversales en la mitad de la placa. En 1948 Westergaard presentó soluciones generales para el esfuerzo y deflexión producida por áreas de carga circular y semicircular en el borde de la losa. Según el análisis de Loannides (1985) son aplicables las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_c(\text{circular}) = \frac{3(1 + \mu)P}{\pi(3 + \mu)h^2} \left[\text{Ln} \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4\mu}{3} + \frac{1 - \mu}{2} + \frac{1.18(1 + 2\mu)a}{l} \right] \quad (39)$$

$$\Delta_c(\text{circular}) = \frac{\sqrt{2 + 1.2\mu P}}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0.76 + 0.4\mu)a}{l} \right] \quad (40)$$

$$\sigma_c(\text{semicircular}) = \frac{3(1 + \mu)P}{\pi(3 + \mu)h^2} \left[\text{Ln} \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4\mu}{3} + \frac{(1 + 2\mu)a}{2l} \right] \quad (41)$$

$$\Delta_c(\text{semicircular}) = \frac{\sqrt{2 + 1.2\mu P}}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0.323 + 0.17\mu)a}{l} \right] \quad (42)$$

Dónde: σ_c es el esfuerzo en el borde de la losa en $lb/pulg^2$, Δ_c es la deflexión en el borde de la placa $pulg$, μ es la relación de poisson del concreto, h es el espesor de la placa en $pulg$, a es el radio del área circular de carga en $pulg$, P es la carga en lb , l es el radio de rigidez relativa en $pulg$, k es el módulo de reacción de la subrasante en $lb/pulg^3$ y E es el módulo de elasticidad del concreto en $lb/pulg^2$.

- Carga en el interior: Esta carga está relacionada a la aparición de fisuras transversales. Son aplicables las siguientes ecuaciones desarrolladas por Westergaard para calcular esfuerzos y deflexiones en el interior de la losa:

$$\sigma_i = \frac{3(1 + \mu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{l}{b} + 0.6159 \right) \quad (43)$$

$$b = a \text{ cuando } a \geq 1.724h, b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675 * h \text{ cuando } a < 1.724h$$

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2l} \right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\} \quad (44)$$

Donde: σ_i es el esfuerzo en el interior de la placa en $lb/pulg^2$, Δ_i es la deflexión en el interior de la placa en $pulg$, μ es la relación de poisson del concreto, P es la carga en lb , h es el espesor de la placa en $pulg$, λ es el radio de rigidez relativa en $pulg$ y k es el módulo de reacción de subrasante en $lb/pulg^3$.

El método derivado de las ecuaciones de Westergaard es bastante utilizado y ha sido considerado adecuado para el análisis estructural del comportamiento de pavimentos rígidos, pero, existen algunas condiciones adicionales por mencionar, entre ellas tenemos que las fórmulas suponen una losa de dimensiones infinitas para carga en el interior y de dimensiones semi - infinitas para carga en el borde y en la esquina. Además, se asume una losa con un espesor uniforme, lo que dificulta estudiar losas con espesores mayores en los bordes o en casos de losas con espesores no uniformes (Gonzales, 2015).

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. aplicó la teoría y fórmulas de Westergaard para la creación de nomogramas de aproximación y curvas de diseño. Los parámetros influyentes para la estimación del espesor de la losa rígida son: la resistencia a la flexión del concreto, el módulo de reacción de la subrasante k , el peso bruto máximo de la aeronave de diseño (MTOW) y las salidas anuales equivalentes (FAA, 2017).

c) **Modo de falla**

Se basa en la falla por agrietamiento longitudinal a la mitad de la losa y con esto se determinaron los esfuerzos máximos. La falla se manifiesta cuando al



menos el 50% de las losas contienen una o más grietas debido a las cargas. No considera la deformación por cortante (OACI, 1983).

d) Trazado de los nomogramas de diseño

Los nomogramas de cálculo para pavimentos rígidos de basan en el análisis de Westergaard de una losa cargada en el borde, que se apoya sobre una fundación líquida densa. Las tensiones de carga en el borde se reducen en un 25% para tener en cuenta la transferencia de las cargas por las juntas. Se trazaron para el peso bruto de la aeronave, suponiendo que el 95% de ese peso es soportado por el conjunto del tren de aterrizaje principal y el 5% restante por el conjunto del tren de proa (OACI, 1983).

Los pavimentos se calculan utilizando el enfoque de cargas estáticas. Se considera que las cargas por impacto no incrementan los requisitos de los espesores. Las repeticiones de carga se representan en las curvas de diseño en términos de salidas anuales (OACI, 1983).

e) Datos de entrada del diseño

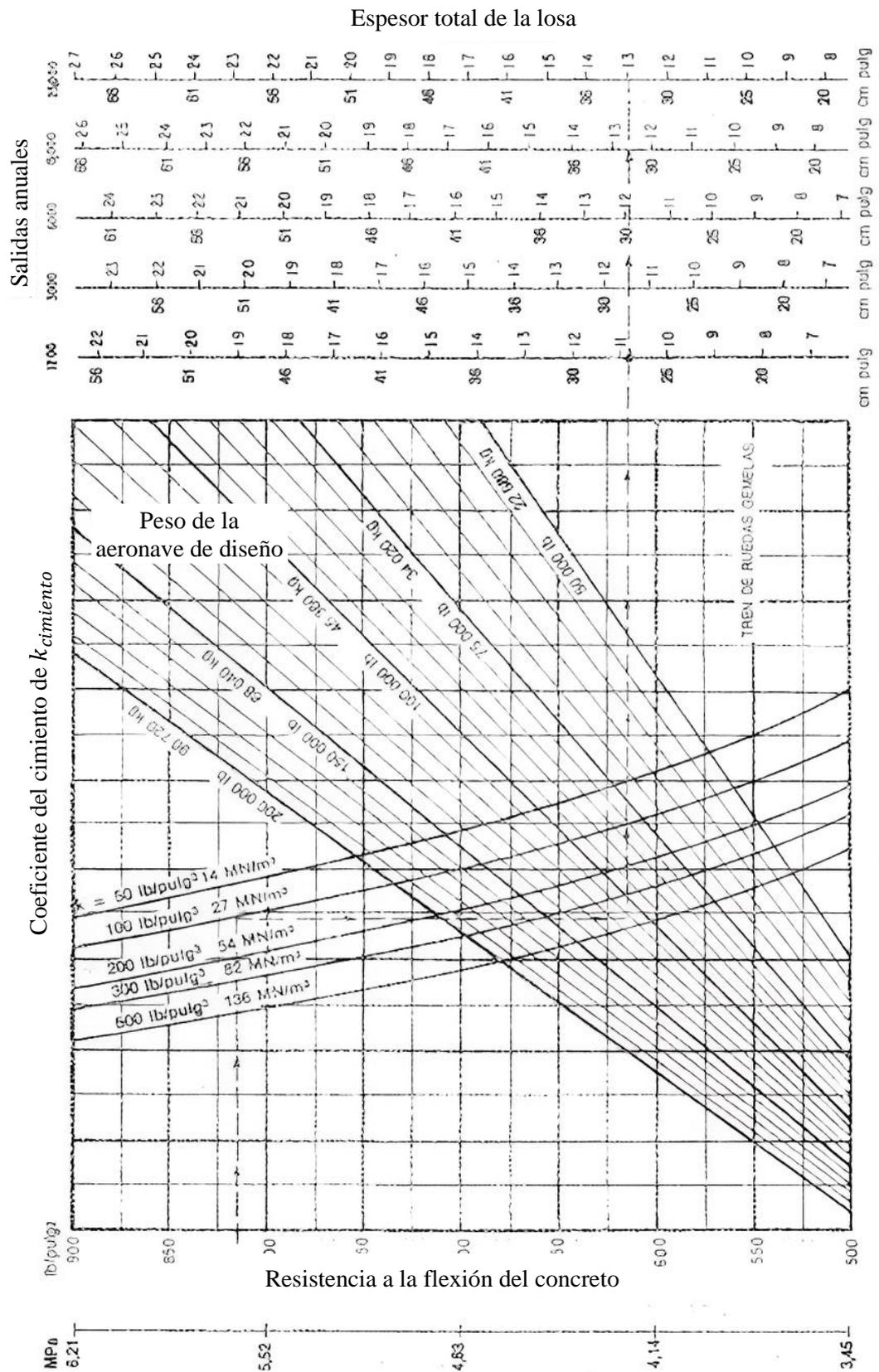
El peso del avión de diseño, las salidas equivalentes por año de la aeronave de diseño, la resistencia a la flexión del concreto y el coeficiente de reacción de la subbase.

f) Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño se basa en determinar las salidas anuales equivalentes del avión de diseño, estimar una resistencia a la flexión del concreto y luego calcular espesores del pavimento a partir de los nomogramas de diseño. El nomograma de cálculo para un tren de aterrizaje de ruedas gemelas se muestra:

Figura 21

Ejemplo de nomograma para el cálculo de pavimentos rígidos



Adaptada de Manual de diseño de aeródromos - Parte 3, OACI.

Las curvas de cálculo proporcionan los espesores requeridos de los pavimentos rígidos necesarios para soportar el peso de una aeronave sobre un terreno caracterizado por su coeficiente de balasto. Estas curvas están disponibles para configuraciones del tren de aterrizaje principal simple, doble y doble tándem.

2.9.2. Método de la FAA (teoría de elementos finitos)

El método de elementos finitos es sin duda uno de los métodos principales debido a su flexibilidad y adaptabilidad (Guerra, 2020).

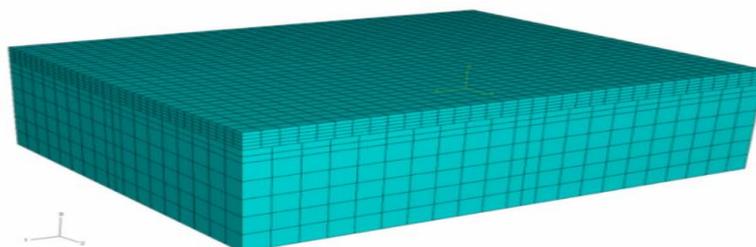
La FAA adoptó el método empírico - mecánico de diseño aplicando la teoría de elementos finitos (MEF) en pavimentos rígidos para estimar el espesor de la superficie de concreto y las capas de subbase necesarias, para ello emplea el software computacional FAARFIELD desarrollado por la FAA en 2008.

a) Modelo matemático

La estructura del pavimento se divide en una serie de elementos conectados en puntos nodales. Las cargas se aplican como fuerzas concentradas en los puntos nodales (Scarpas, 2017). Las juntas actúan como resortes elásticos lineales, transmitiendo cargas verticales entre losas adyacentes en corte a través de la junta. Supone una profundidad infinita de la subrasante.

Figura 22

Modelo básico de elementos finitos para pavimentos de hormigón



Tomada de Capacidad de aportación de carreteras y aeropuertos (p. 1655), por Scarpas, 2017.



- Las fuerzas cortantes se suponen linealmente proporcionales a los desplazamientos verticales relativos entre losas (ley de Hooke).
- Las capas base y subbase para pavimentos rígidos pueden ser de varias rigideces, ya sean estabilizadas o no estabilizadas. Las interfaces en el modelo cumplen con los requisitos de una interfaz no adherida completamente entre la losa y la capa base y una unión completa en todas las demás interfaces horizontales.

b) Respuesta estructural

El modelo 3D-FE considera el pavimento dividido en secciones discretas, en lugar de un material continuo, esto permite una estimación más precisa de las tensiones y deformaciones en los bordes de las losas que, en comparación con la tensión transversal cerca del centro de la losa, suele ser mayor en los pavimentos rígidos. Una vez conocidos dichos desplazamientos, podemos determinar, de una forma muy aproximada los esfuerzos y deformaciones en el interior de cada elemento (Scarpas, 2017).

c) Modo de falla

La falla del pavimento se muestra a través del agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa. Además, se usa el criterio de falla por daño acumulativo con cargas cíclicas y la falla por fatiga. Rollings (1998) introdujo el concepto de Índice de Condición Estructural (SCI) como una medida del desempeño de un pavimento rígido de aeropuerto, en el que solo los problemas relacionados con la carga contribuyen a los valores de su deducción.

El SCI utiliza 6 modos de deterioro: Rotura de esquina; agrietamiento longitudinal, transversal y diagonal; losa destrozada; grietas por contracción;

desconchado de juntas; y desprendimiento de esquinas (IJISME, 2013). Un SCI de 80 es la definición de la FAA de falla estructural y es consistente con el 50% de las losas en el área de tránsito que exhiben grietas estructurales (IJISME, 2013).

Se encontró que el SCI se deteriora como una función aproximadamente lineal del logaritmo de las coberturas. El modelo de falla de pavimento rígido trata a SCI como una función paramétrica de coberturas C , resistencia del hormigón R y esfuerzos σ .

$$DF = \frac{R}{0.75 * \sigma_e} = \left[\frac{F'_s b d}{(1 - \alpha)(b - d) + F'_s b} \right] * \text{Log}_{10} C + \left[\frac{(1 - \alpha)(ad - bc) + F'_s b c}{(1 - \alpha)(b - d) + F'_s b} \right] \quad (44)$$

Donde: El valor de F'_s cuando se tiene base granular (P-209) es 1 y cuando se tiene base estabilizada es igual a 1.6.

El conjunto de datos para el análisis de regresión en el desarrollo del modelo de fatiga consistió en 30 puntos de datos de la prueba histórica a gran escala y 7 puntos de datos de NAPTF. Los detalles de las fuentes de datos se muestran a continuación:

Tabla 9

Los datos de prueba a gran escala utilizados para el modelo de fatiga

Sitios de prueba	Nº. de puntos
Lockbourne N° 1	15
Lockbourne N° 2	3
Pruebas de carga pesada de Sharonville	1
Pruebas de carga de engranajes de ruedas múltiples (MWHGL)	4
Estudio de juntas longitudinales con llave (KLJS)	4
Estudio de Estabilización de Suelos y Pavimentos (SSPS)	3
Instalación de prueba de pavimento del aeropuerto nacional (NAPTF)	7

Nota: en la presente tabla se muestran los datos utilizados para las pruebas a gran escala.

2.10. DISEÑO DEL MARGEN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS

Como lo afirma la circular AC 150/5320-6G (2021) los márgenes serán diseñados para soportar un total de 15 pasadas de la aeronave más exigente.

Tabla 10

Espesor mínimo de la capa del pavimento de márgenes

Tipo de capa	Especificación de la FAA	Espesor mín. in (mm) aeronaves < 27 215 kg	Espesor mín. in (cm) aeronaves > 27 215 kg
Superficie HMA	P-401, P-403	3.0 (7.5)	4.0 (10.0)
Superficie PCC	P-501	5.0 (12.5)	6.0 (15.0)
Base	P-209, P-208	6.0 (15.0)	6.0 (15.0)
Subbase (si es necesario)	P-154	4.0 (10.0)	4.0 (10.0)

Adaptada de la AC N° 150/5320-6G (p. 6-4), por la FAA, 2021.

2.11. FAARFIELD EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

FAARFIELD es un código de software de diseño y análisis estructural que utiliza el enfoque de diseño elástico en capas (LED) para pavimento flexible y método de elementos finitos (FEM) para pavimento rígido.

Este código estructural de pavimentos incorpora funciones de transferencia para convertir los valores mecánicos de tensión/deformación calculados en daño o deterioro del pavimento.

Las funciones de transferencia incluyen el efecto de múltiples cargas de rueda, carga dinámica y comportamiento de fatiga. Este código se configura como una herramienta de diseño para determinar iterativamente el espesor del pavimento necesario para limitar el deterioro del pavimento durante la vida de diseño del pavimento.



2.11.1. Proceso de diseño en FAARFIELD

El proceso de diseño en FAARFIELD esta formulado por códigos de computadora específicamente para el diseño estructural de pavimentos aeroportuarios. Estos códigos se usan para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos; y cumplen con las especificaciones de la circular de asesoramiento (AC) 150/5320-6G. FAARFIELD utiliza un enfoque de diseño empírico-mecanicista para determinar el espesor del pavimento requerido para una vida útil de diseño.

Los pasos realizados por FAARFIELD son:

1. Configuración del pavimento
2. Caracterización de materiales para las capas del pavimento y la subrasante
3. Condiciones de tránsito
4. Modelos estructurales y respuesta del pavimento
5. Modelos de deterioro
6. Diseño final

FAARFIELD se ejecuta en el entorno de Microsoft Windows. El código de computadora está organizado en dos subprogramas principales, LEAF y NIKE3D.

- LEAF es una biblioteca de enlaces dinámicos codificada en Visual Basic 2013 y NIKE3D es un subprograma de análisis de elementos finitos en 3D codificado en Intel Visual Fortran.
- NIKE3D es un código computacional de elementos finitos en 3D desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (US DOE) y modificado por la FAA. La entrada para NIKE3D se desarrolla a través de la biblioteca de enlaces dinámicos de Windows, FAAMesh. El subprograma LEAF fue



originalmente un subprograma dentro del anterior código de diseño de pavimentos de la FAA, LEDFAA, que se formuló utilizando el enfoque de diseño elástico de capas. Los dos enfoques difieren en la precisión de los valores mecánicos calculados y su velocidad computacional.

Los resultados de las pruebas a gran escala se utilizaron para desarrollar funciones de transferencia para convertir los valores de respuesta mecánica calculados por LEAF y NIKE3D en deterioro del pavimento.

El resultado final de un diseño de pavimentos utilizando FAARFIELD es el espesor del mismo. La metodología utilizada para determinar el espesor del pavimento es un proceso iterativo utilizando el CDF y una vida de diseño. El CDF considera la contribución de cada aeronave a la que se somete el pavimento de diseño.

Por lo tanto, este enfoque calcula la respuesta debida a la mezcla de tráfico de aeronaves prevista real. Las configuraciones de las ruedas de las aeronaves junto con su desviación lateral se consideran al determinar la relación de paso/cobertura, el número de repeticiones que un punto del pavimento está sujeto a la carga de las ruedas de las aeronaves. La interfaz de entrada de FAARFIELD incluye tres componentes:

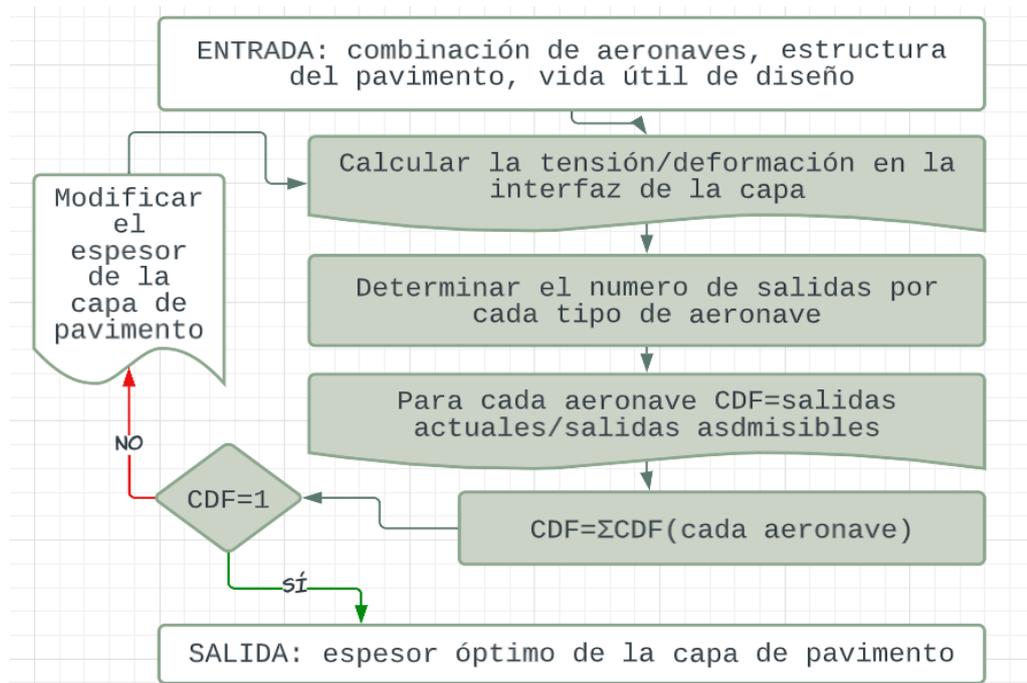
- Arranque: Controla las operaciones de código para la entrada de datos.
- Estructura: Controla la entrada de datos para la estructura del pavimento.
- Avión: Controla el ingreso de las aeronaves usadas para el diseño estructural.

FAARFIELD asume que el 95% del peso bruto de la aeronave se aplica a través del tren de aterrizaje principal. Ambos tipos de pavimento utilizan una superficie de contacto circular entre rueda y pavimento.

Los pavimentos se diseñan en función de lograr un CDF igual a 1 al final de su vida útil de diseño. Cada cobertura de rueda de aeronave contribuye a la CDF según la regla de Miner.

Figura 23

Proceso de diseño de FAARFIELD



Nota: Se muestra los pasos que sigue FAARFIELD para realizar los diseños estructurales de pavimentos.

2.11.2. Propiedades del material en FAARFIELD

El uso de métodos de diseño semi-empíricos exige que la calidad del material en un pavimento sea al menos tan buena como la de los pavimentos en los que se basan los métodos de diseño.

Esto se aplica a la especificación del material en el diseño y al nivel de control de calidad en obra.

Tabla 11

Valores de coeficientes de poisson usados en FAARFIELD

Tipo de capa	Capa especificada por la FAA	Pav. Rígido, psi (MPa)	Pav. Flexible, psi (MPa)	Coef. de Poisson
Superficie	P-501 Hormigón de concreto	4,000,000 (30,000)	N.A.	0.15
	P-401/P-403/ P-404 Mezcla de asfalto	N.A.	200,000 (1,380)	0.35
Base y subbase estabilizada	P-401/P-403 Mezcla de asfalto	400,000 (3,000)		0.35
	P-306 Concreto pobre	700,000 (5,000)		0.20
	P-304 base tratada con cemento	500,000 (3,500)		0.20
	P-220 base tratada con cemento	250,000 (1,700)		0.20
	Rígido estabilizado, variable	250,000 - 700,000 (1,700 - 5,000)	N.A.	0.20
	Flexible estabilizado variable	N.A.	150,000 - 400,000 (1,000 - 3,000)	0.35
	P-209 Agregado triturado	Cálculo interno por FAARFIELD		0.35
Base y subbase granular	P-208 Agregado	Cálculo interno por FAARFIELD		0.35
	P-219 Agregado de concreto reciclado	Cálculo interno por FAARFIELD		0.35
	P-211 Roca caliza	Cálculo interno por FAARFIELD		0.35
	P-207 Agregado de asfalto reciclado	25,000-500,000		0.35
	P-154 Agregado sin triturar	Cálculo interno por FAARFIELD		0.35
Subrasante	Subrasante	1,000 a 50,000 (7 a 30,000)		0.35

Tomada de la circular AC N° 150/5320-6G (p. 3-19), por la FAA, 2021.

2.12. FACTORES A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO

En el diseño de pavimentos aeroportuarios es necesario conocer las cargas que actuarán en la superficie de rodadura, establecer los requisitos mínimos que deberán cumplir los materiales de las capas del pavimento y determinar la resistencia del suelo de subrasante. Para ello, es necesario realizar el estudio de tráfico y de suelos:



2.12.1. Estudio de tráfico

Uno de los factores indispensables para el dimensionamiento es conocer la combinación del tráfico aéreo que va a operar sobre el pavimento. Según Horonjeff (2010) la consideración del tráfico debe incluir la magnitud, configuración y el número de repeticiones de la carga; así como una proyección futura probable del tráfico aéreo (p. 29).

El procedimiento de este estudio para pavimentos de aeropuertos difiere ligeramente del de pavimentos de carreteras debido a las diferencias en las operaciones de tráfico. Los pasos son: estimación del volumen de tráfico esperado para el primer año, estimación de la tasa de crecimiento de tráfico y estimación de la composición del flujo de tráfico

a) Carga

FAARFIELD brinda los pesos de máxima operación bruta recomendados por los fabricantes de muchas aeronaves.

b) Tráfico de salida y total de salidas durante la vida de diseño

La circular AC 150/5320-6G (2021) señala que los pavimentos se diseñan teniendo en cuenta solo las salidas de los aviones y para uso constante, es decir, 500 operaciones.

c) Mezcla de tráfico de aeronaves

Según la circular AC 150/5320-6G (2021) cualquier mix de aeronaves puede formarse con los aviones que se encuentran en la biblioteca del software FAARFIELD. Si un avión en particular no existe en dicha biblioteca, el usuario



lo puede sustituir por un avión cercano de su grupo genérico o crear uno basado en sus características propias (p. 3-14).

d) Aeronaves de diseño

García (2014) plantea que la medición del peso de una aeronave es necesario realizar diversas mediciones en función del combustible del avión, la carga útil, la carga máxima permitida, los valores de carga al despegar, al aterrizar, durante el reposo, etc. (p. 29).

1. Peso de las aeronaves

Según Horonjeff, McKelvey y Young (2010) tenemos los siguientes pesos:

- Peso operacional vacío (OEW): Es el peso, pero sin incluir la carga útil y el combustible. Se puede utilizar para el diseño de hangares.
- Peso de cero combustible: Este peso esto incluye el peso de los pasajeros y su equipaje, correo, expreso y carga. Teóricamente, la carga útil estructural máxima es una diferencia entre el peso de combustible cero y el peso operacional vacío.
- Peso en rampa: Es el peso para movimiento en tierra incluyendo rodaje y carga de combustible. A medida que el avión rueda entre la plataforma quema combustible y por ello se reduce el peso.
- Peso de despegue (MTOW): Corresponde al peso de despegue para operar. Excluye el combustible de rodaje y de preparación e incluye el peso en vacío operativo, el combustible de viaje y de reserva, y la carga útil. Este peso se usa para el diseño de pavimentos.
- Peso de aterrizaje (MLW): Corresponde al peso para el aterrizaje, suele ser bastante menor que el MTOW. El tren principal está estructuralmente

diseñado para absorber las fuerzas encontradas durante el aterrizaje; cuanto mayor sea la fuerza, más pesado debe ser el engranaje.

2. Tipo y geometría del tren de aterrizaje

Se tienen cuatro grupos:

- Aeronave de tren simple (Single wheel)
- Aeronaves de ruedas gemelas (Dual wheel)
- Aeronave con bogie de 4 ruedas (Dual tándem)
- Aeronaves con fuselaje ancho (Wide body): Corresponde a aquellos arreglos que no se encuentran dentro de las categorías anteriores.

Figura 24

Tipos de configuración del tren de aterrizaje principal

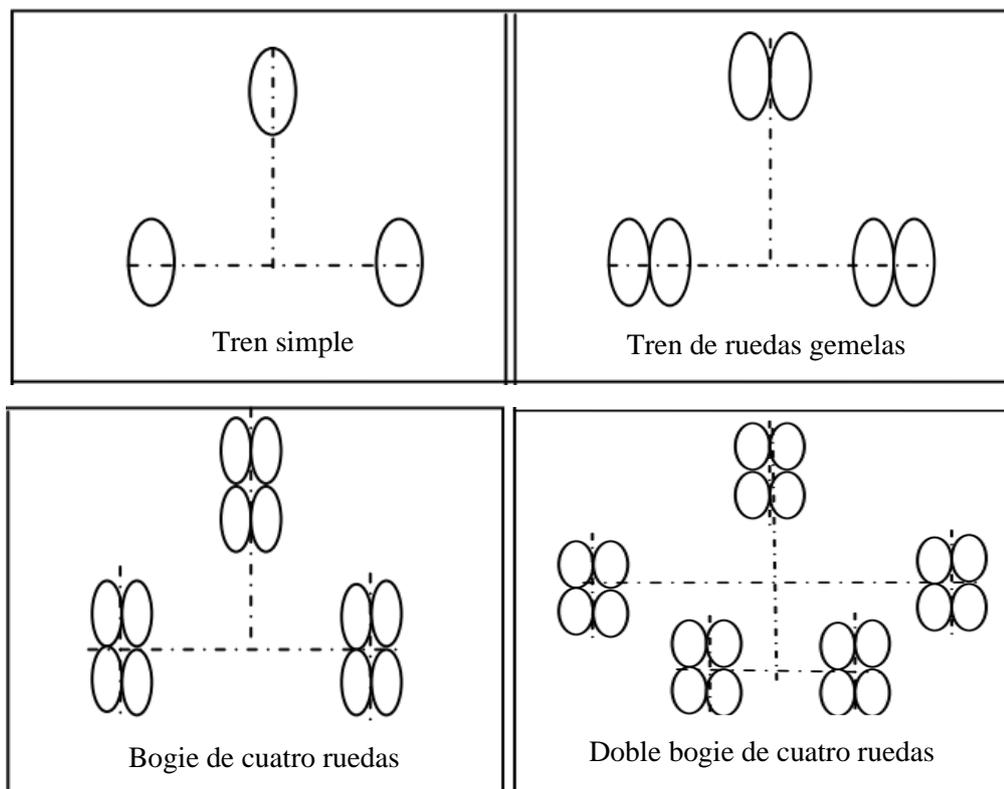
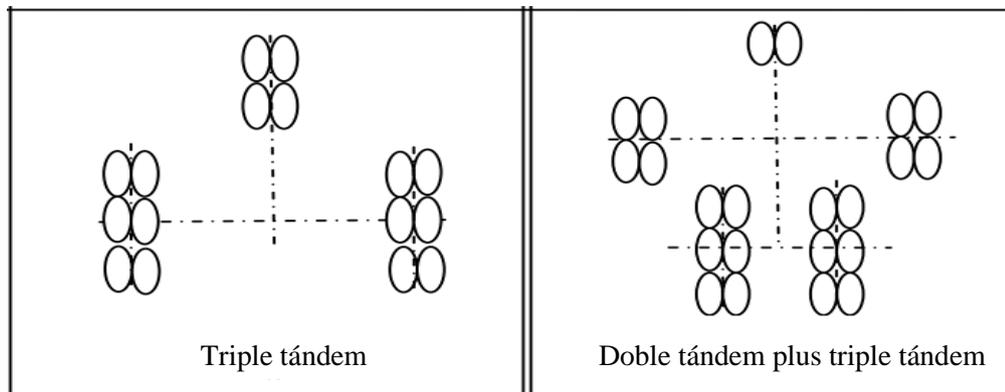


Figura 25

Tipos de configuración del tren de aterrizaje principal (continuación)



Tomada de Diseño del pavimento de un aeropuerto (p. 31), por F. Delgado, 2012, PUCP.

2.12.2. Estudio de suelos

El objetivo es conocer las características físico - mecánicas de los materiales de subrasante con el fin de efectuar un diseño eficiente para los requerimientos de tráfico aéreo (Roel, 2018). Según la AC 150/5320-6G (2021) se tienen las siguientes consideraciones:

a) Inspección y muestreo

La FAA recomienda valores de espaciamiento de perforaciones, indicando que estos varían dependiendo de las condiciones del terreno. Se pueden esperar amplias variaciones debido a las condiciones locales (FAA, 2021).

b) Ensayos de resistencia de suelos

CBR en laboratorio: Este ensayo debe realizarse según la ASTM D-1883. Debe hacerse con un contenido de humedad que simule la condición de un pavimento que ha estado en servicio por tiempo conocido como CBR saturado (FAA, 2021). El investigador cree conveniente utilizar para este ensayo el reglamento local: CBR de suelos MTC E 132:

CAPÍTULO III

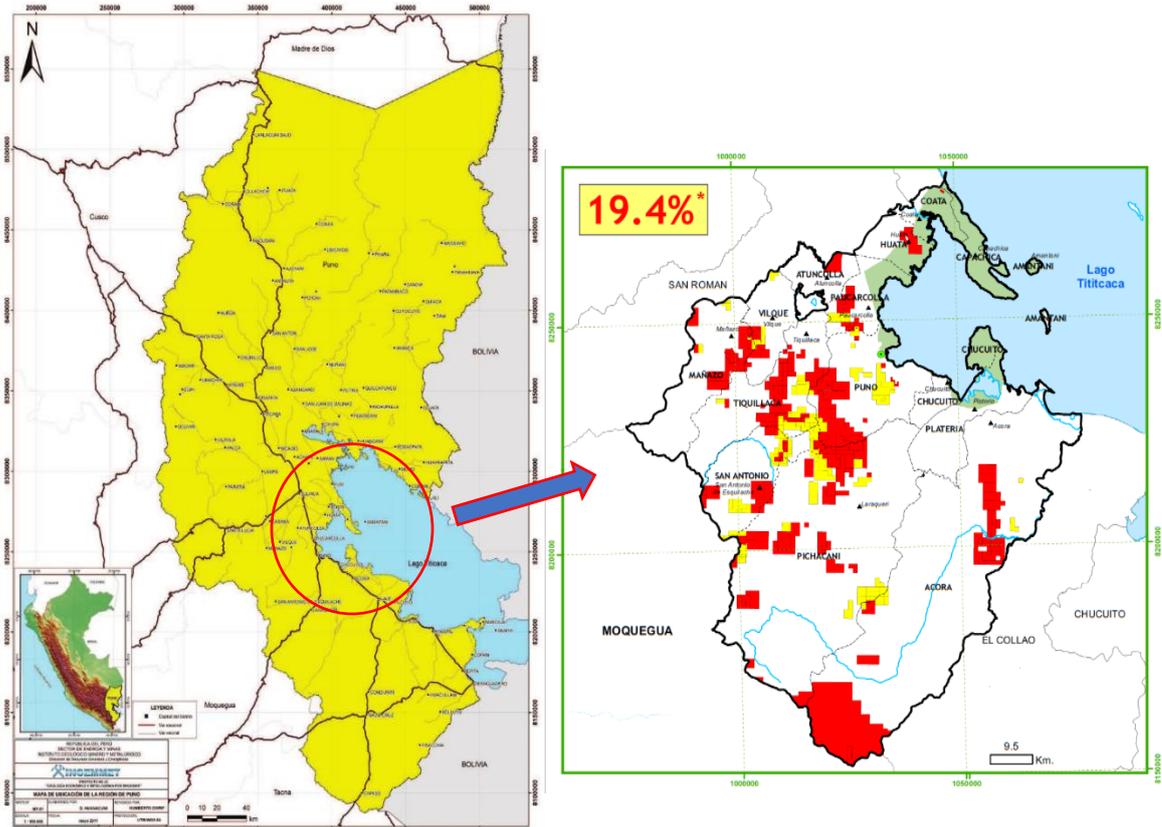
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE ESTUDIO

El Aeropuerto Internacional de Ventilla se localiza al oeste de la ciudad de Puno, a continuación, se presentan los mapas de macro y micro localización de la zona de emplazamiento del aeropuerto.

Figura 26

Mapa de localización del aeropuerto de Ventilla



Adaptada de Google, 2023.

Figura 27

Emplazamiento del aeropuerto de Ventilla



Coordenadas:
Latitud : 15° 50' 56" S
Longitud: 70° 03' 58" W

Nota: El aeropuerto está emplazado en las afueras de la ciudad de Puno. Adaptada de Google, 2023.

Tabla 12

Localización y ubicación del aeropuerto

Localización		Ubicación	
Departamento	: Puno	Altitud	: 4050 m.s.n.m.
Distrito	: Puno	Latitud	: 15° 50' 56" S
Provincia	: Puno	Longitud	: 70° 03' 58" W

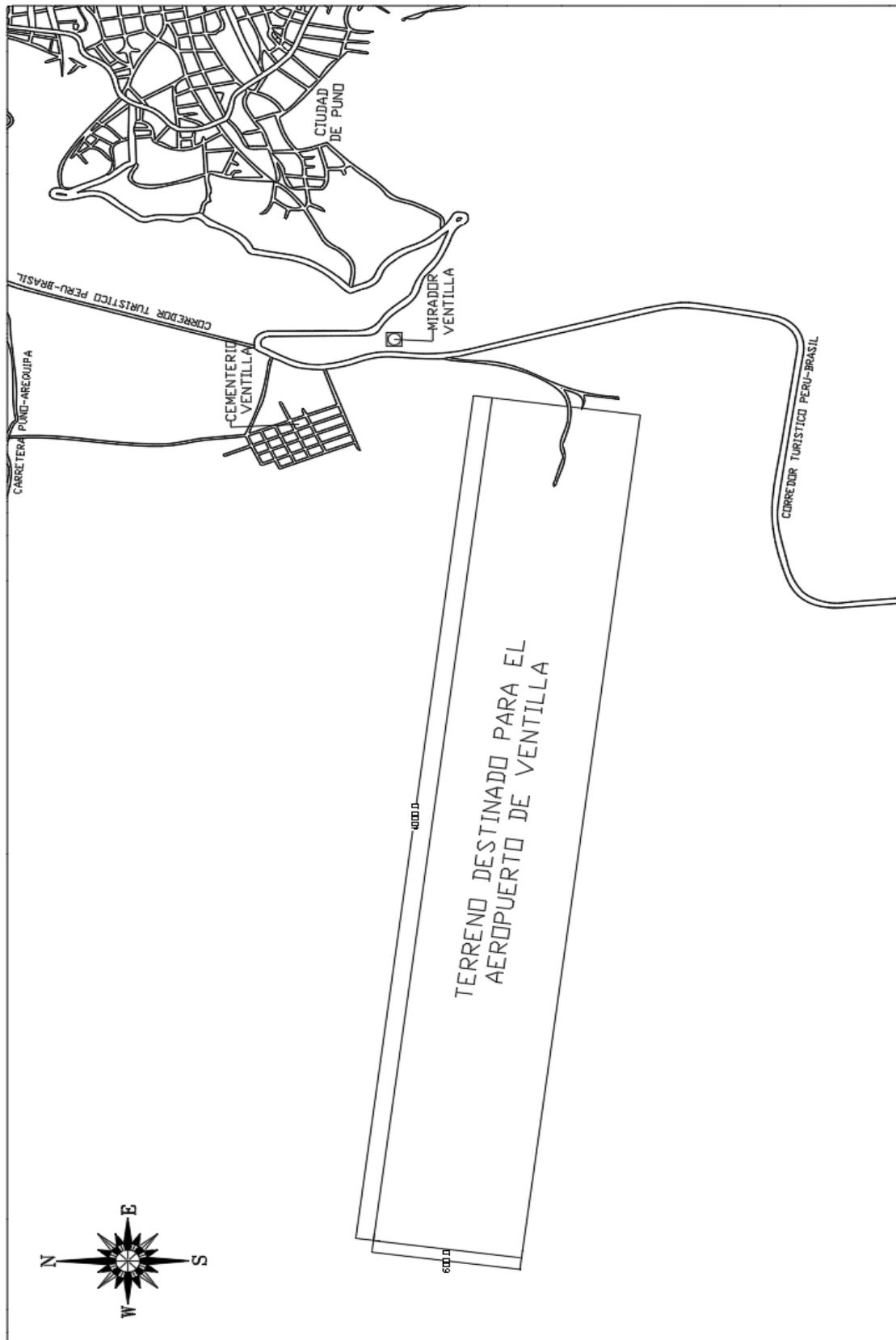
Nota: S y W indican las direcciones Sur y Norte respectivamente.

Se corroboró, según el acta N°07-2018 y la ordenanza municipal N°27-2018-MPP, que el área de terreno mostrada en la Figura 28 está destinado para el aeropuerto.

El terreno consiste en 4000 m de largo y 600 m de ancho, siendo un total de 240 hectáreas para la construcción de dicha infraestructura aeroportuaria. La zona de estudio es muy importante debido a que se posiciona como una alternativa muy interesante para la proyección y posterior ejecución del aeropuerto en Puno, con la realización de este megaproyecto, se podría generar una expansión de la ciudad, impulsar la economía basada en el turismo con el que contamos. Los principales actores para la concreción de este proyecto serían el gobierno central a través de PROINVERSION y el Gobierno Regional de Puno.

Figura 28

Localización del terreno destinado para el aeropuerto de Ventilla



Nota: El aeropuerto está emplazado en las afueras de la ciudad de Puno.



El nuevo aeropuerto contará con 2 accesos principales: A través del Corredor Turístico Interoceánico y por la carretera asfaltada Puno-Arequipa. La zona en donde se ha planteado construir un nuevo aeropuerto es una inmensa área libre en donde existe muy poca población cercana, lo que representa una gran ventaja para una óptima planificación del aeropuerto.

3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Investigación aplicada: Para Borja (2016), este método se centra en la aplicación de un conocimiento de valor sobre una problemática, se busca conocer, actuar, construir y modificar una realidad. En este caso se busca solucionar la problemática del capítulo I, mediante el análisis comparativo de los métodos de diseño de pavimentos aeroportuarios.

Investigación tecnológica: Según Borja (2016), este método tiene como fin la solución de problemas prácticos mediante el diseño de nuevos procedimientos o métodos los cuales tendrán un efecto multiplicador adaptándose a la realidad particular de cada proyecto. En nuestro caso se propone para mejorar la eficiencia, la implementación de los softwares para el dimensionamiento de pavimentos aeroportuarios.

3.2.1. Enfoque de la investigación

El enfoque del presente estudio, como lo sostiene Borja (2016), es cuantitativo, puesto que la recolección de datos es netamente numérica, además las conclusiones también son de carácter numérico.

3.2.2. Alcance de la investigación

El nivel de investigación es exploratorio y descriptivo, puesto que Hernández et al. (2018), en su obra “Metodología de la Investigación”, menciona que, el estudio exploratorio tiene como objetivo examinar un problema o tema de



investigación poco estudiado, del cual se tienen cuantiosas dudas o no fueron abordadas.

3.2.3. Diseño de la investigación

Para Borja (2016), el presente estudio tiene un diseño no experimental porque no se está realizando manipulación como tal de la variable independiente para obtener conclusiones concretas.

Según Hernández et al. (2018), en un diseño no experimental implica que el investigador no hace variar deliberadamente las variables independientes para analizar su efecto sobre otras variables dependientes.

3.2.4. Población y muestra

La población para este estudio básicamente consiste del lugar de estudio destinado a la pista del aeropuerto en Ventilla, el cual corresponde a 4000 metros de largo por 45 m de ancho.

La muestra según Hernández (2018), es del tipo no probabilístico porque se selecciona las unidades muestrales para alcanzar el propósito de la investigación. Sostiene que la elección de las unidades no depende de la probabilidad, sino de razones relacionadas con las características y contexto de la investigación, en este caso, se realizó el método de muestreo por conveniencia.

Según Borja (2016), en muestreos no probabilístico, no es posible calcular el error estándar, así como el nivel de confianza con el que hacemos la estimación. De lo anterior decimos que estamos enmarcados en un caso en donde la población y muestra convergen, es decir que tanto la población como la muestra es el área destinada a la pista de aterrizaje (4000 m x 45 m).



3.2.5. Instrumentos de recolección de datos

- Para el estudio de vientos y pluviométrico se utilizaron datos de la página oficial del SENAMHI y el software WRPLOT View - Versión 8.0.2., el cual es un programa especializado en la creación de rosas de vientos a partir de datos meteorológicos.
- Para el estudio de suelos se utilizaron las instalaciones del laboratorio de suelos y pavimentos de la Municipalidad Provincial de Puno, y dentro de ello los equipos necesarios para la realización de los siguientes 5 ensayos en cada muestra de suelo: Análisis Granulométrico por Tamizado, Contenido de Humedad, Limite Líquido, Limite Plástico e índice de plasticidad, Proctor Modificado, Relación de soporte de California (CBR). Cabe mencionar que para el muestreo de calicatas a cielo abierto se hizo uso de una retroexcavadora.
- Para la recolección de los datos del levantamiento topográfico de la zona de estudio se hizo estudio de la herramienta computacional ArcGIS 10.8.2.

3.2.6. Softwares utilizados

FAARFIELD: es un código de software de diseño y análisis estructural que utiliza el enfoque de diseño elástico en capas (LED) para pavimento flexible y método de elementos finitos (FEM) para pavimento rígido. Este código estructural de pavimentos incorpora funciones de transferencia para convertir los valores mecánicos de tensión/deformación calculados en daño o deterioro del pavimento. Las funciones de transferencia incluyen el efecto de múltiples cargas de rueda, carga dinámica y comportamiento de fatiga. Este código se configura



como una herramienta de diseño para determinar iterativamente el espesor del pavimento necesario para limitar el deterioro del pavimento durante su vida útil.

BISAR 3.0: desarrollado por la compañía Shell, está diseñado para el análisis estructural de estructuras de pavimento flexible, es decir se utiliza para el cálculo de tensiones, deformaciones, deflexiones en un pavimento flexible.

WRPLOT View 2.08: es un programa muy completo para la elaboración de rosas de viento con datos meteorológicos, permite obtener gráficos de frecuencias de vientos de diferentes direcciones y velocidades para una ubicación y período de tiempo. Proporciona gráficos de rosas de los vientos, análisis de frecuencia y representaciones para varios formatos de datos meteorológicos.

Everfe 2.26: herramienta específica para el análisis y cálculo de esfuerzos en pavimentos de concreto. Su objetivo principal es evaluar las cargas y esfuerzos que actúan sobre el pavimento, considerando factores como la resistencia del concreto, la distribución de cargas y las condiciones de servicio.

3.3. ESTUDIO DE VIENTOS

Se trabajó con datos recopilados del SENAMHI (Anexo 1), y para decidir la orientación óptima de la pista, se hizo uso de la técnica de la rosa de vientos, recomendada por OACI (2018). Los datos obtenidos por la Estación - Puno sobre direcciones y velocidades de vientos comprenden el periodo: agosto de 1994 - julio de 2023 (30 años).

Para la elaboración de la rosa de vientos tal como lo sugiere Geo GPS Perú (2017), se usó el software WRPLOT View - Versión 8.0.2., el cual es un programa especializado en crear rosas de vientos a partir de datos meteorológicos.

Con la información obtenida se procedió a preparar los datos meteorológicos obtenidos en un documento de Excel como se muestra en la Figura 29. Luego se importó el archivo directamente desde WRPLOT.

Figura 29

Preparación de datos para la rosa de vientos

#	Data Field Name	Excel Column Name	Missing Indicator in Excel File	Unit in Excel File	Number Type
5	Wind Direction	F		degrees	Integer
6	Wind Speed	G		m/s	Decimal
7	Hourly Precipitation	H		hundredths of inch	Integer

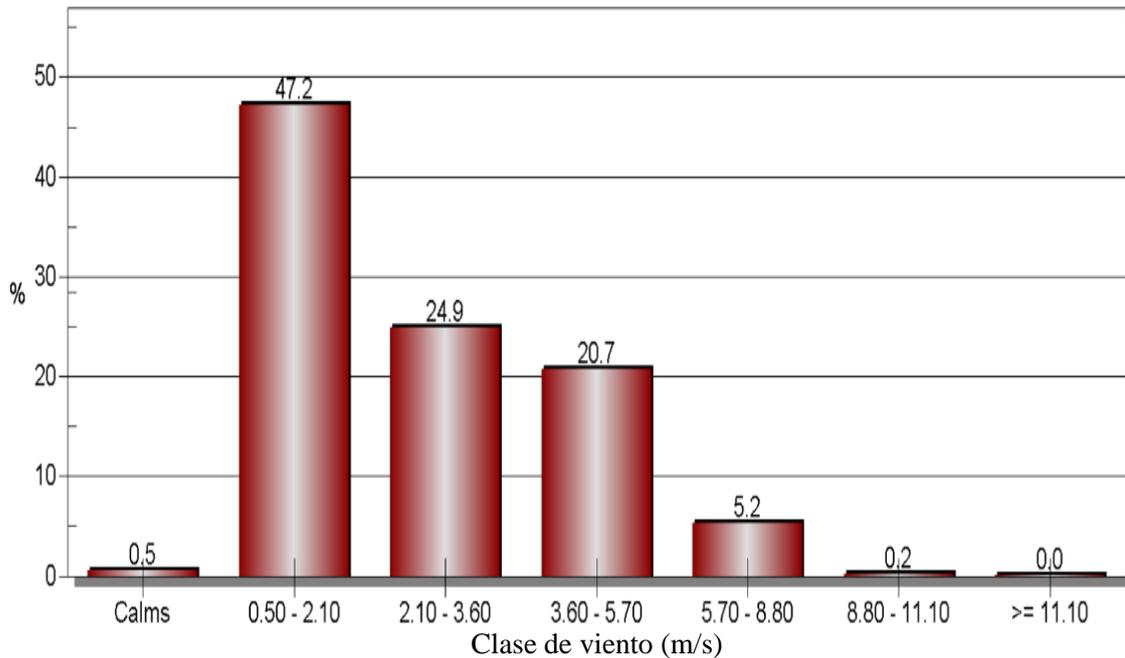
	B	C	D	E	F	G	H
3							
4	AÑO	MES	DIA	HORA	DIRECCION DEL VIENTO (°)	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	PRECIPITACION (mm/hora)
5	1994	8	1	0	272	0.9	0
6	1994	8	1	1	339	1.2	0
7	1994	8	1	2	293	1	0
8	1994	8	1	3	325	0.9	0
9	1994	8	1	4	305	1.3	0
10	1994	8	1	5	23	2.1	0
11	1994	8	1	6	298	1.2	0
12	1994	8	1	7	51	0.8	0

Nota: El programa WRPLOT View está en el idioma inglés. Tomada de WRPLOT View, 2023.

Del proceso anterior, se obtuvo la distribución de frecuencias de viento por tipo, así como la rosa de vientos para el lugar del proyecto, estos resultados se usaron para analizar la dirección óptima del viento.

Figura 30

Distribución de frecuencias por clase de viento



Nota: Se observa que en su mayoría de vientos más frecuentes son de menor intensidad y cercanos a la calma, eso representa una gran ventaja para nuestro aeropuerto. Tomada de WRPLOT View, 2023.

De la gráfica anterior podemos observar que la velocidad del viento en todas direcciones entre 0.50 y 2.10 m/s es el 47.2 % del total de vientos; entre 2.10 y 3.60 m/s es el 24.90 %; entre 3.60 y 5.70 m/s es el 20.7 %; entre 5.70 y 8.80 m/s es el 5.2 %; entre 8.80 y 11.10 m/s es el 0.2 % y mayores de 11.10 m/s es 0%.

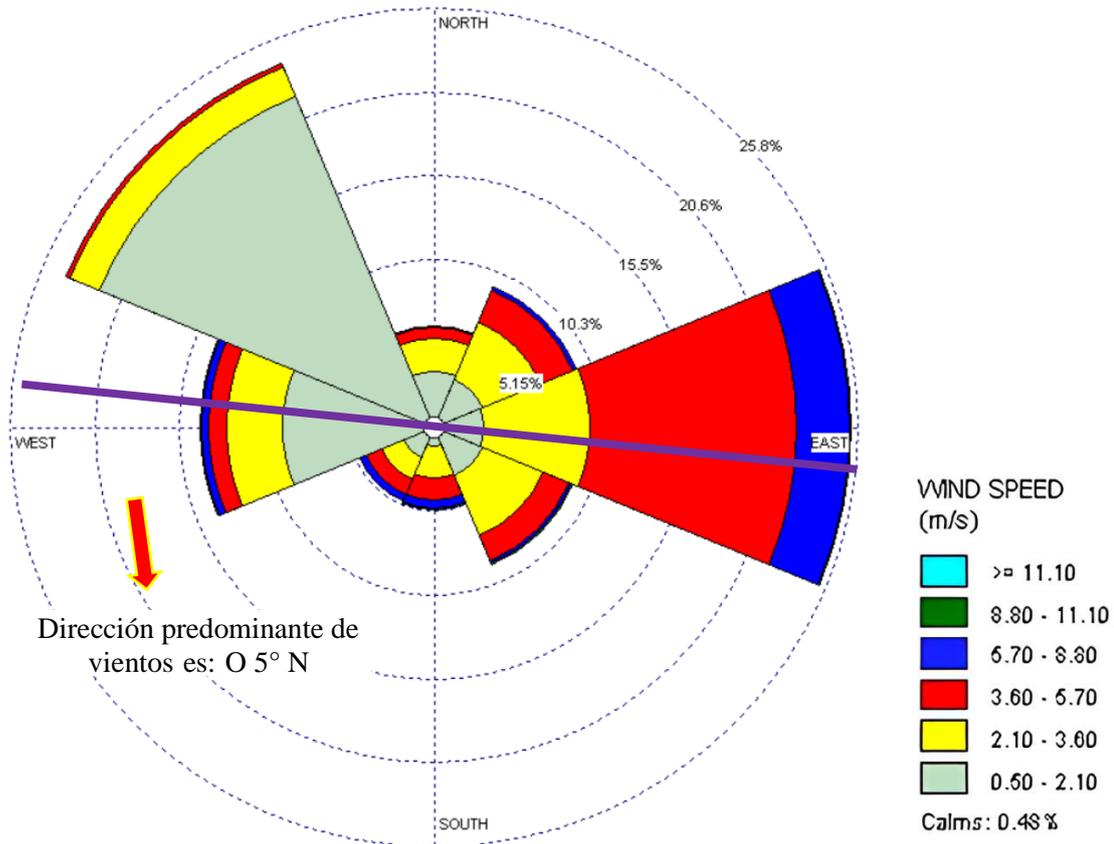
Se corroboró lo que indica la DGAC, ésta sostiene que como máximo la velocidad de viento en dirección transversal a la pista (37 km/h o 10.3 m/s para aviones con LCR \geq 1 500 m) debe ser del 5%.

En nuestro caso se corroboró que los vientos superiores a 10.3 m/s representan solo el 0.2% por lo que podemos asegurar que el 99.8 % del tiempo de uso del aeropuerto el viento no causara inconvenientes en los despegues y aterrizajes las aeronaves. Como lo sugiere la OACI para homogenizar y uniformizar estas direcciones y encontrar los

vientos predominantes utilizaremos la vista de 8 direcciones mostrada en la siguiente figura:

Figura 31

Rosa de vientos para el aeropuerto de Ventilla



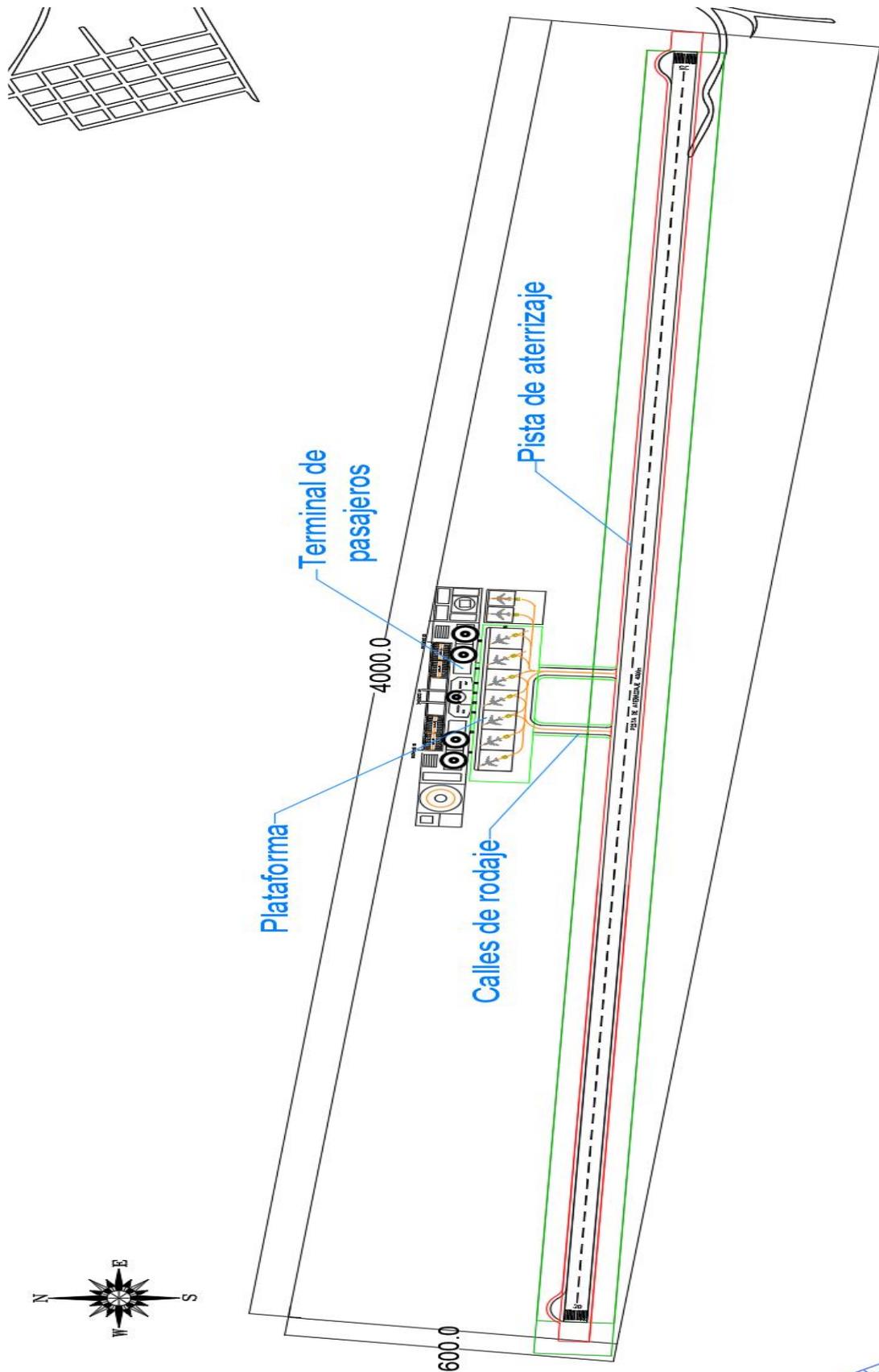
Tomada de WRPLOT View, 2023.

En la rosa de vientos, el color gris corresponde a una velocidad de viento de 0.50 a 2.10 m/s, el amarillo, a una velocidad de 2.10 a 3.60 m/s, el rojo, a una velocidad de 3.60 a 5.70 m/s, el azul, a una velocidad de 5.70 a 8.80 m/s, el verde a una velocidad de 8.80 y 11.10 m/s y el turquesa a una velocidad mayor a 11.10 m/s. Así mismo, el tamaño del sector circular indica la frecuencia de vientos.

La dirección predominante de vientos es Este - Oeste, por lo que la mejor orientación para la pista de aterrizaje será O 5° N.

Figura 32

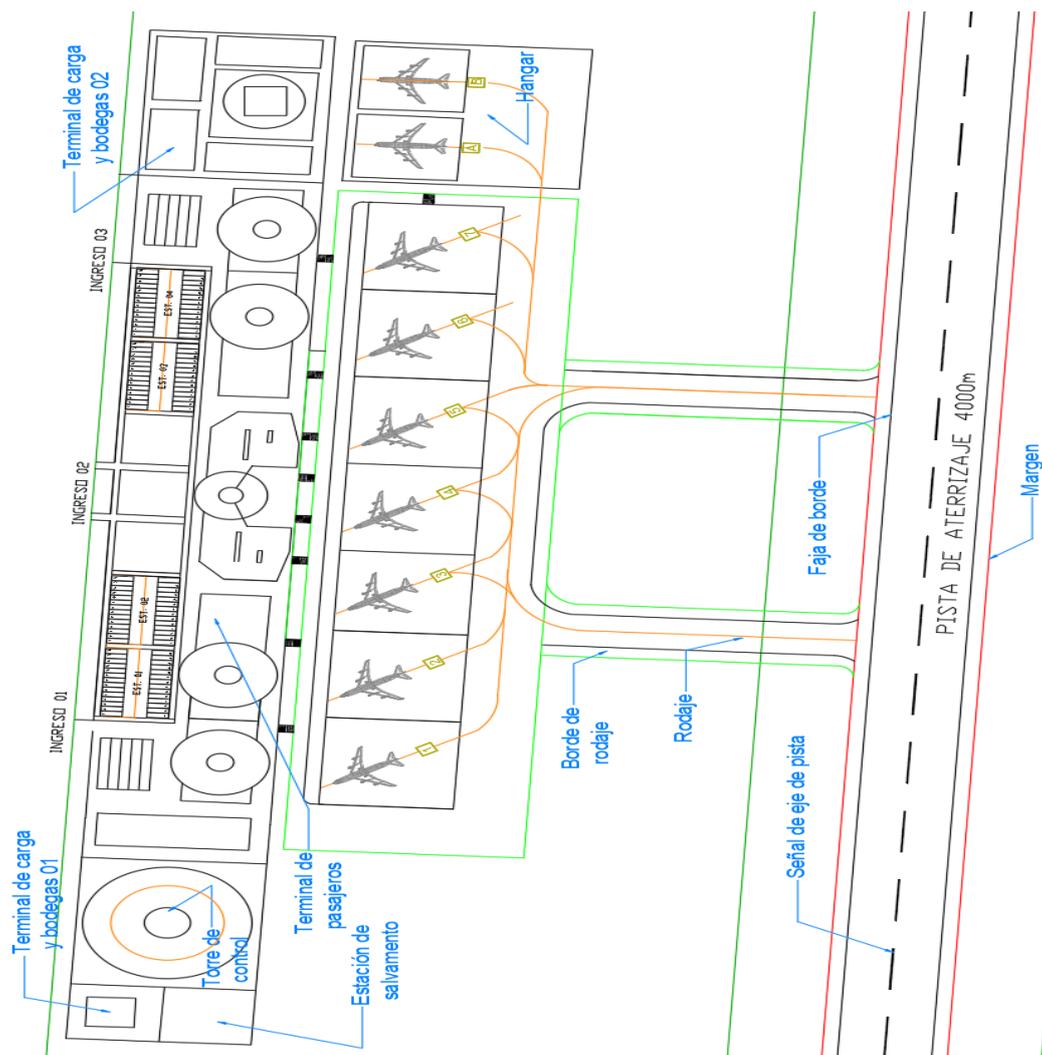
Orientación de la pista de aterrizaje en el aeropuerto de Ventilla



En dicha área se realizó una propuesta de distribución arquitectónica del nuevo aeropuerto tal como se muestra en la Figura 33. Para esa investigación se ha visto conveniente tomar como referencia la estructura geométrica del aeropuerto Manco Cápac en la ciudad de Juliaca, la principal razón es porque en un futuro se prevé que este aeropuerto pueda dejar de funcionar por los problemas que atraviesa, por lo que seguramente será necesario la construcción de un nuevo aeropuerto en la región. Por otro lado, la ordenanza municipal N° 27-2018-MPP establece que el aeropuerto de Ventilla comprenderá un área total de 240 hectáreas.

Figura 33

Distribución arquitectónica del Aeropuerto de Ventilla



Nota: Propuesta de distribución arquitectónica del nuevo aeropuerto de Ventilla.



La figura precedente muestra una propuesta de distribución arquitectónica de los elementos que conformarán el aeropuerto, de los cuales, la presente investigación se enfoca en el estudio solamente de la pista de aterrizaje principal, esto debido a que generalmente se considera a este elemento como uno de los más importantes y es usualmente materia de investigación, además en esta estructura es en donde principalmente se produce la interacción de aeronave - pavimento, por lo que en lo posterior se hará referencia solo a dicho elemento.

3.4. ESTUDIO DE SUELOS

El estudio de suelos es imprescindible para el desarrollo del diseño de pavimentos aeroportuarios. La metodología de trabajo para este estudio consistió en lo siguiente:

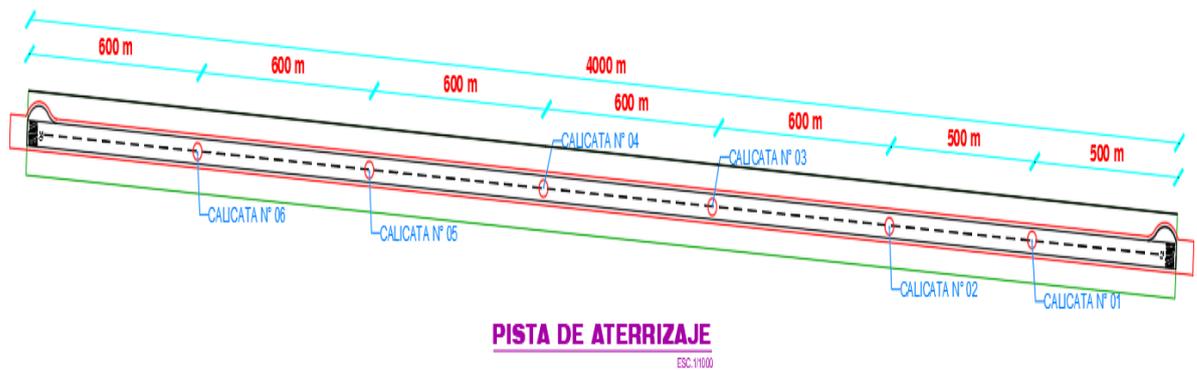
- Exploración de campo: Excavación de calicatas con una profundidad mínima de 1.50 m o hasta encontrar imposibilidad de un mayor avance debido a la presencia de agua, o la existencia de mantos rocosos.
- Registro de perfil estratigráfico de cada calicata y muestreo representativo de la subrasante existente, para ensayos de clasificación correspondientes.
- Ensayos de laboratorio y trabajos de gabinete para determinar las características físico - mecánicas de los suelos de estudio.

Se realizaron visitas técnicas de reconocimiento y exploración en campo, así mismo se realizó el estacado de los puntos de exploración.

La FAA establece que, para condiciones de suelo uniformes, el número de perforaciones dependerá del criterio del proyectista, por lo tanto, para la presente investigación se determinó conveniente la ejecución de 6 calicatas en total para la pista de aterrizaje.

Figura 34

Croquis de ubicación de calicatas en pista de aterrizaje



Nota: Las excavaciones en los puntos indicados se realizaron de manera aleatoria en el ancho de la pista, es decir, el primero al lado izquierdo, el segundo al centro y así sucesivamente.

Tabla 13

Localización de calicatas

	Número	Progresiva	Lado	Dist. al eje (m)
	01	Km 0+500	Izquierdo	22.5
	02	Km 1+000	Eje	0
Pista de aterrizaje	03	Km 1+600	Derecho	22.5
	04	Km 2+200	Eje	0
	05	Km 2+800	Izquierdo	22.5
	06	Km 3+400	Eje	0

Nota: En total se extrajeron 6 muestras alteradas de suelo, las mismas que fueron trasladadas a laboratorio.

Figura 35

Excavación de calicatas a cielo abierto



Nota: Se observa a la retroexcavadora realizando la excavación de calicatas en los puntos correspondientes.

En cada calicata se efectuó el registro de exploración, los cuales se muestran en el Anexo 2. Para reducir las muestras obtenidas en campo a las porciones requeridas se utilizó el método del cuarteo establecido en la norma MTC E103. Con las muestras de suelo obtenidas, para clasificar el suelo según los sistemas SUCS y AASHTO, y para conocer sus propiedades físico - mecánicas, se realizaron los ensayos mostrados en la Tabla 14, dichos ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Municipalidad Provincial de Puno, ubicado en la Av. Costanera de la ciudad de Puno.

Figura 36

Ensayos de laboratorio



Nota: Se muestran fotografías de la realización de los ensayos de laboratorio.

El desarrollo completo de cada uno de los ensayos realizados para las 6 calicatas se muestra en el Anexo 2.

Tabla 14

Ensayos de laboratorio realizados

Ensayo	Norma aplicada
Análisis Granulométrico por Tamizado	MTC E 107
Contenido de Humedad	MTC E 108
Limite Liquido	MTC E 110
Limite Plástico e índice de plasticidad	MTC E 111
Proctor Modificado	MTC E 115
Relación de soporte de California (CBR)	MTC E 132

Nota: En el uso de estas normas se complementó con las normas ASTM respectivas.

Tabla 15

Características físico-mecánicas del suelo de subrasante

Zona	N	Progr.	Prof. (m)	Muestra	W (%)	Límites		Clasificación		Proctor Modificado	
						LL	IP	AASHTO	SUCS	M.D.S. (gr/cm ³)	O.C.H. (%)
Pista de aterrizaje	1	0+500	3.20	C - 1	12.57	15.38	2.89	A-4	SM	2.134	8.6
	2	1+000	3.15	C - 2	14.28	13.86	3.81	A-4	SM	2.024	10.5
	3	1+600	1.20	C - 3	10.16	11.50	2.33	A-4	SM	2.176	8.7
	4	2+200	1.50	C - 4	9.72	10.85	3.04	A-4	SM	2.270	9.2
	5	2+800	1.85	C - 5	16.18	14.32	NP	A-4	SM	1.941	8.2
	6	3+400	1.25	C - 6	14.96	11.02	NP	A-4	SM	2.005	8.4

Nota: En la presente tabla se muestran las características físico mecánicas del suelo de subrasante.

Como lo establece la DGAC (2021), para el diseño se deben tomar valores porcentuales de CBR para 100% y 95% de la máxima densidad seca para cada material.

De los resultados de la tabla precedente obtenemos el valor de CBR de la subrasante que será utilizado para el diseño de los pavimentos. Así tenemos para la pista de aterrizaje un CBR mínimo de 11.4 %.

Tabla 16*Cuadro de valores de CBR obtenidos*

Calicata	Profundidad (m)	CBR (%)	
		100% MDS	95% MDS
C - 01	3.50	14.1	13.5
C - 02	3.35	13.3	11.4
C - 03	1.20	13.9	13.2
C - 04	0.50	18.1	16.7
C - 05	1.85	16.5	15.6
C - 06	1.35	15.2	14.3

Nota: En la presente tabla se muestran los valores de CBR obtenidos para cada calicata estudiada.

Según la FAA (2021) las cuatro (4) categorías de subrasante para un pavimento flexible son:

- Resistencia ultra baja, $CBR < 6$
- Baja resistencia, $6 < CBR < 10$
- Resistencia media $CBR 10 < CBR < 15$
- Alta resistencia $CBR > 15$

Al ser el suelo de fundación (SM: Arena limosa o arena con grava limosa), con valores de CBR en promedio de 14 %, corresponde a la categoría de subrasante de resistencia media.

Así mismo para el caso de pavimento rígido, las 4 categorías de subrasante son:

- Resistencia ultra baja, $k < 75$ pci
- Baja resistencia, $75 \text{ pci} < k < 150$ pci
- Resistencia media $150 \text{ pci} < k < 300$ pci
- Alta resistencia $k > 300$ pci

Al tener el suelo de fundación un k promedio de 250, corresponde a un suelo de fundación con la categoría de resistencia media.

3.5. ESTUDIO DE TRÁFICO

3.5.1. Análisis de la demanda de pasajeros

La propuesta del aeropuerto de ventilla se sustenta en base a la gran demanda de personas que arriban a la ciudad de puno.

Tabla 17

Arribo de turistas nacionales y extranjeros, según provincias 2017 - 2021

Provincia	Arribo - 2017	Arribo - 2018	Arribo - 2019	Arribo - 2021
Puno Región	1 136 852	1 196 089	1 261 345	772 259
Nacional	816 624	863 822	925 530	711 959
Extranjero	320 228	332 267	335 815	60 300
Puno	509 486	554 241	574 049	256 496
Nacional	220 481	262 725	280 317	223 441
Extranjero	289 005	291 516	293 732	33 055
San Román	401 146	390 648	403 110	293 727
Nacional	395 974	381 837	390 614	291 318
Extranjero	5 172	8 811	12 496	2 409
Chucuito	49 717	59 366	67 816	64 118
Nacional	44 287	51 741	57 493	46 479
Extranjero	5 430	7 625	10 323	17 639
Carabaya	34 960	42 743	47 517	25 602
Nacional	29 485	37 063	42 615	23 889
Extranjero	5 475	5 680	4 902	1 713
Melgar	29 699	28 108	28 997	29 375
Nacional	29 000	27 516	27 736	27 324
Extranjero	699	592	1 261	2 051

Nota: Adaptada de INEI, 2022.

De la data anterior, se desprende que la ciudad de puno es la que tiene mayor demanda de turistas internacionales, teniendo una media de 293732



pasajeros por año en promedio, esto significa que al día 1075 turistas internacionales llegan a la ciudad de Puno. Si consideramos que un vuelo de una aeronave Airbus tiene una capacidad de 180 pasajeros se necesitarían 6 vuelos diarios para cubrir la demanda de visitantes a la ciudad de Puno, estas cifras están en crecimiento por lo que el aeropuerto es muy necesario para el futuro.

3.5.2. Volumen de operaciones

Para los pronósticos del tráfico aéreo la OACI recomienda utilizar los registros históricos de movimiento de aeronaves y para el caso de aeropuertos nuevos se debe utilizar la data histórica de aeropuertos con similares condiciones. Se prevé que el aeropuerto de Ventilla pueda reemplazar al Aeropuerto Manco Cápac, por lo que se tomará como base la información histórica de dicho aeropuerto.

Además, se proyectarán las aeronaves que podrán operar en el nuevo aeropuerto de Ventilla considerando que este al ser de categoría internacional se podrá posicionar como un importante destino a nivel nacional e internacional.

a) Recopilación de información histórica del aeropuerto Manco Cápac

El aeropuerto Inca Manco Cápac es administrado por el consorcio peruano-argentino Aeropuertos Andinos del Perú (AAP). En dicho aeropuerto actualmente operan 3 aerolíneas las cuales se muestran en la tabla 18.

Para el cálculo del crecimiento anual utilizaremos la información histórica de tráfico de aeronaves de los últimos 15 años puesto que recién a partir ese año este aeropuerto ha adquirido oficialmente la categoría de Aeropuerto Internacional.

Tabla 18

Aeronaves y aerolíneas que operan en el aeropuerto Manco Cápac

Aerolíneas	Aeronaves	Inicio de operaciones	Peso De Despegue (Kg)	Salidas en 2019
Latam Perú	A319	02/06/1999	75 500	1898
	A320-100/200		78 000	
Viva Air Perú	A320-100/200	11/06/2019	78 000	121
Sky Airline Perú	A320N	17/02/2020	79 000	0
JetSmart	A320N	19/08/2022	79 000	0

Adaptada de CORPAC, 2021, <https://www.corpac.gob.pe/Main.asp?T=4901>

Tabla 19

Movimiento aeroportuario del aeropuerto Manco Cápac (2005 - 2019)

Año	Movimiento de aeronaves			Movimiento de pasajeros		
	Oper. Naci.	Oper. Intern.	Total	Pasajeros Naci.	Pasajeros Intern.	Total
2005	2315	42	2357	275178	121	275299
2006	2547	5	2552	284056	82	284138
2007	3460	17	3477	297405	0	297405
2008	3047	7	3054	305718	59	305777
2009	3101	2	3103	295748	0	295748
2010	3375	6	3381	325941	62	326003
2011	3917	0	3917	318294	75	318369
2012	4017	1	4018	330830	61	330891
2013	3849	6	3855	352982	63	353045
2014	4059	14	4073	369571	0	369571
2015	4317	11	4328	434760	0	434760
2016	4272	1	4273	462650	0	462650
2017	4014	3	4017	439156	0	439156
2018	4376	11	4387	476914	0	476914
2019	4018	20	4038	461177	0	461177

Adaptada de Información estadística (Informes anuales y gráficos mensuales), por CORPAC, 2020, <https://www.gob.pe/institucion/corpac/colecciones/5782-informacion-de-estadisticas>

De la tabla anterior podemos determinar la tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR), utilizando la ecuación establecida por Conza (2020) y mostrada a continuación:

$$CAGR = \left(\frac{Total\ 2019}{Total\ 2005} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (17)$$

Donde n: número de años transcurridos = 14 años

$$CAGR = 3.9 \%$$

Se utilizará este valor de crecimiento medio anual de tráfico para los diseños de pavimento flexible y rígido.

b) Aeronaves que podrían operar en el aeropuerto de Ventilla

Con una infraestructura bien planificada este aeropuerto se podría convertir en uno de los mejores en el país, por lo que muchas compañías aéreas podrán abrir rutas nacionales o internacionales directas y con alcances mayores propios de un aeropuerto que cuente con la categoría de internacional. Por ello es probable que empiecen a operar aeronaves de aeropuertos cercanos:

Tabla 20

Aeronaves que operan en aeropuertos de la zona sur del Perú

Aeropuerto	Aeronaves operativas
Aeropuerto Internacional Rodríguez Ballón-Arequipa	Airbus 319-132, Boeing 737-200, Airbus 320 Neo, Airbus 320-200
Aeropuerto Internacional Alejandro Velasco Astete-Cusco	Airbus A319-100, Airbus A320-200, Boeing 737-200, BAE 146-200, BAE 146-300, Embraer 190
Aeropuerto Internacional El Alto–Bolivia	Airbus A320-200, Embraer 190, Boeing 737-800, Fokker-50, BAE 146, Boeing 717-200, Boeing 727

Adaptada de Informe N° 5.A y Anexos (tomo I) Estudio de preinversión a nivel de perfil, por ProInversion - Perú, 2014 y de Diseño del pavimento del Aeropuerto de la Joya, por Conza, 2020.

3.5.3. Mix de aeronaves de diseño

Teniendo en cuenta que para fines de diseño un parámetro requerido es el tráfico de aeronaves, se adoptó la siguiente combinación de aeronaves:

Tabla 21

Conjunto o mix de aeronaves de diseño

Aeronave	Peso/despegue		Envergadura (m)	Tráfico inicial	Crecimiento anual (%)	Tráfico total
	Kg	Lb				
A320	78000	171961	34.1	2148	3.9	63304
A320N	79000	174165	35.8	500	3.9	14736
B 717	55580	122532	28.5	250	3.9	7368
B 727	95028	209500	32.9	250	3.9	7368
B737-200	52390	174165	34.8	250	3.9	7368
B737-800	79016	174200	35.8	250	3.9	7368
E 190	51800	114200	28.7	250	3.9	7368
BAE 146-200	42200	93035.1	26.3	250	3.9	7368
BAE 146-300	46040	101500	26.2	250	3.9	7368

Nota: Todas las aeronaves tienen un tren de aterrizaje de tipo dual.

Tabla 22

Diferentes pesos de las aeronaves de diseño

Aeronave	Peso operacional vacío (OEW)	Peso/cero combustible (ZFW)	Peso máximo de despegue (MTOW)	Peso máximo de aterrizaje (MLW)
A320	42600	62500	78000	66000
A320N	44405	64500	79000	67400
B717	29400	38405	55580	45620
B727	49680	49650	95028	79505
B737-200	28450	41530	52390	42915
B737-800	42100	65974	79016	66361
E 190	27753	40800	51800	43000
BAE 146-200	24800	35410	42200	37600
BAE 146-300	23500	36940	46040	39236

Adaptada de los manuales de diseño de cada aeronave.

De los pesos anteriores el peso crítico para el diseño de pavimentos aeroportuario es el peso máximo estructural de despegue (MTOW), esto debido a que una aeronave al despegar está cargada con pasajeros y con combustible lleno para todo el viaje.

3.5.4. Características de las aeronaves de diseño

Aeronave Airbus a320

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 78000 kg = 171961 lb
- Presión de neumático (p): 209 psi
- Área de contacto:

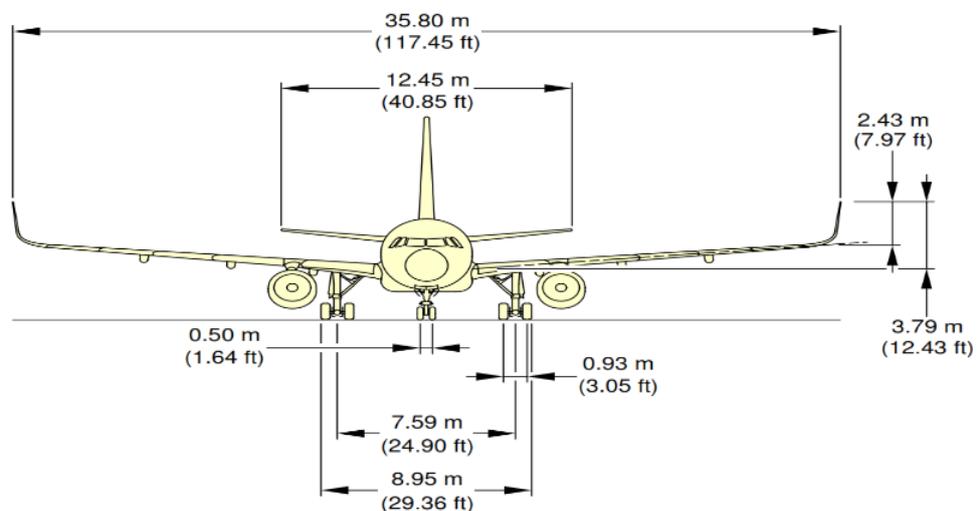
$$\frac{MRW}{p} = \frac{171961 \text{ lb}}{209 \text{ lg/pulg}^2} = 823 \text{ pulg}^2 = 5309.7 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{78000 \text{ kg} * 9.81}{0.531 \text{ m}^2} = 1441.02 \text{ kPa}$$

Figura 37

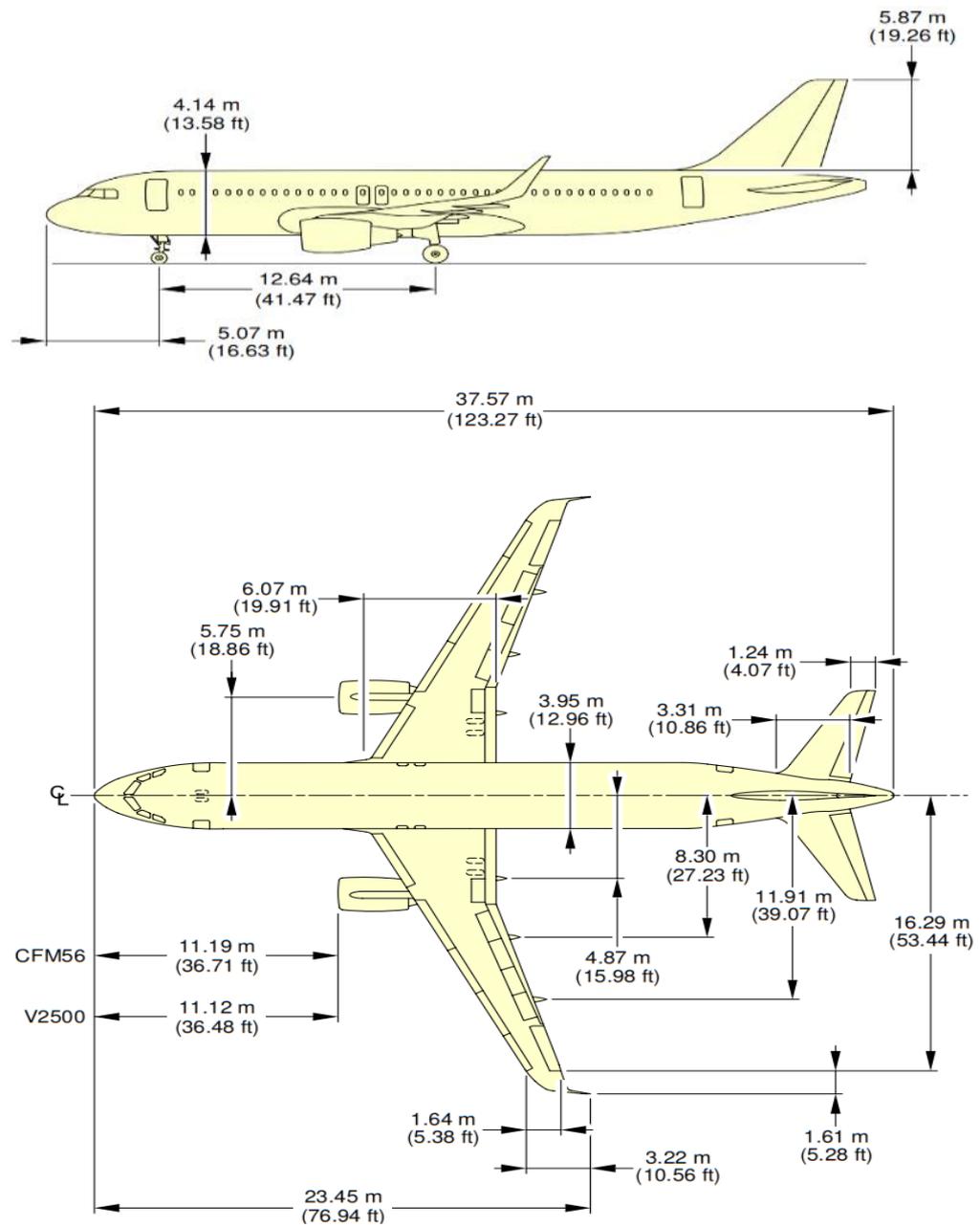
Vista frontal de la aeronave Airbus a320



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave Airbus a320.

Figura 38

Vista de elevación y en planta de la aeronave Airbus a320



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave Airbus A320 que tiene una capacidad para 180 pasajeros como máximo.

Aeronave Airbus a320 Neo

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 79000 kg = 174165 lb
- Presión de neumático (p): 209 psi
- Área de contacto:

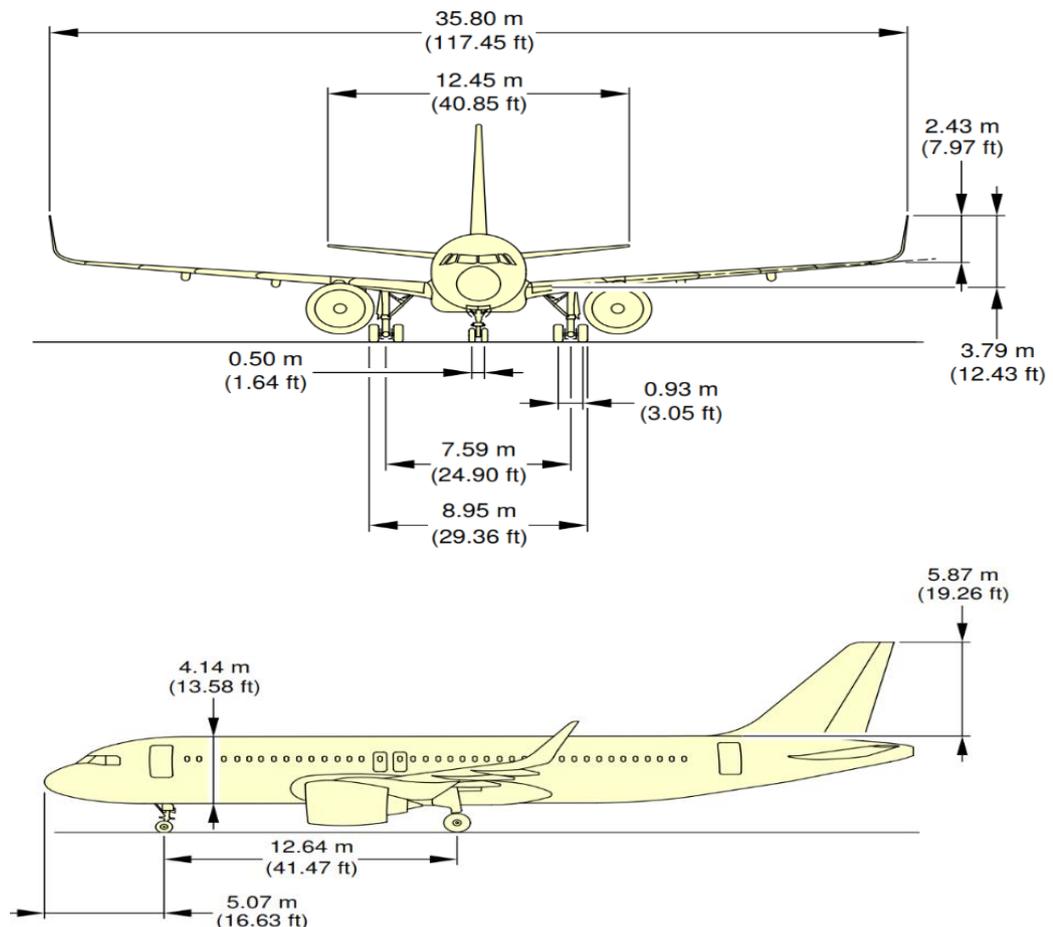
$$\frac{MRW}{p} = \frac{174165 \text{ lb}}{209 \text{ lb/pulg}^2} = 833 \text{ pulg}^2 = 5374.2 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{79000 \text{ kg} * 9.81}{0.537 \text{ m}^2} = 1443.18 \text{ kPa}$$

Figura 39

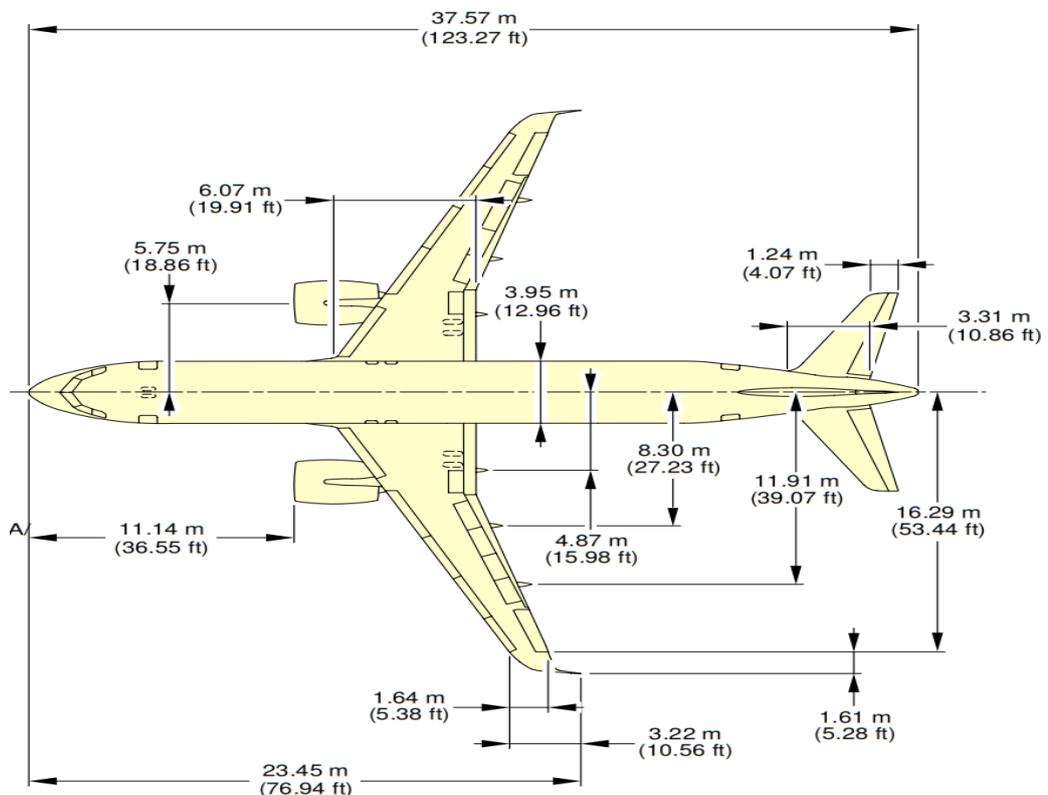
Vista frontal y de elevación de la aeronave Airbus a320 Neo



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave Airbus a320 Neo.

Figura 40

Vista en planta de la aeronave Airbus a320 Neo



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave Airbus A320 Neo que tiene una capacidad para 194 pasajeros como máximo.

Boeing 717

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 55580 kg = 122533 lb
- Presión de neumático (p): 164 psi
- Área de contacto:

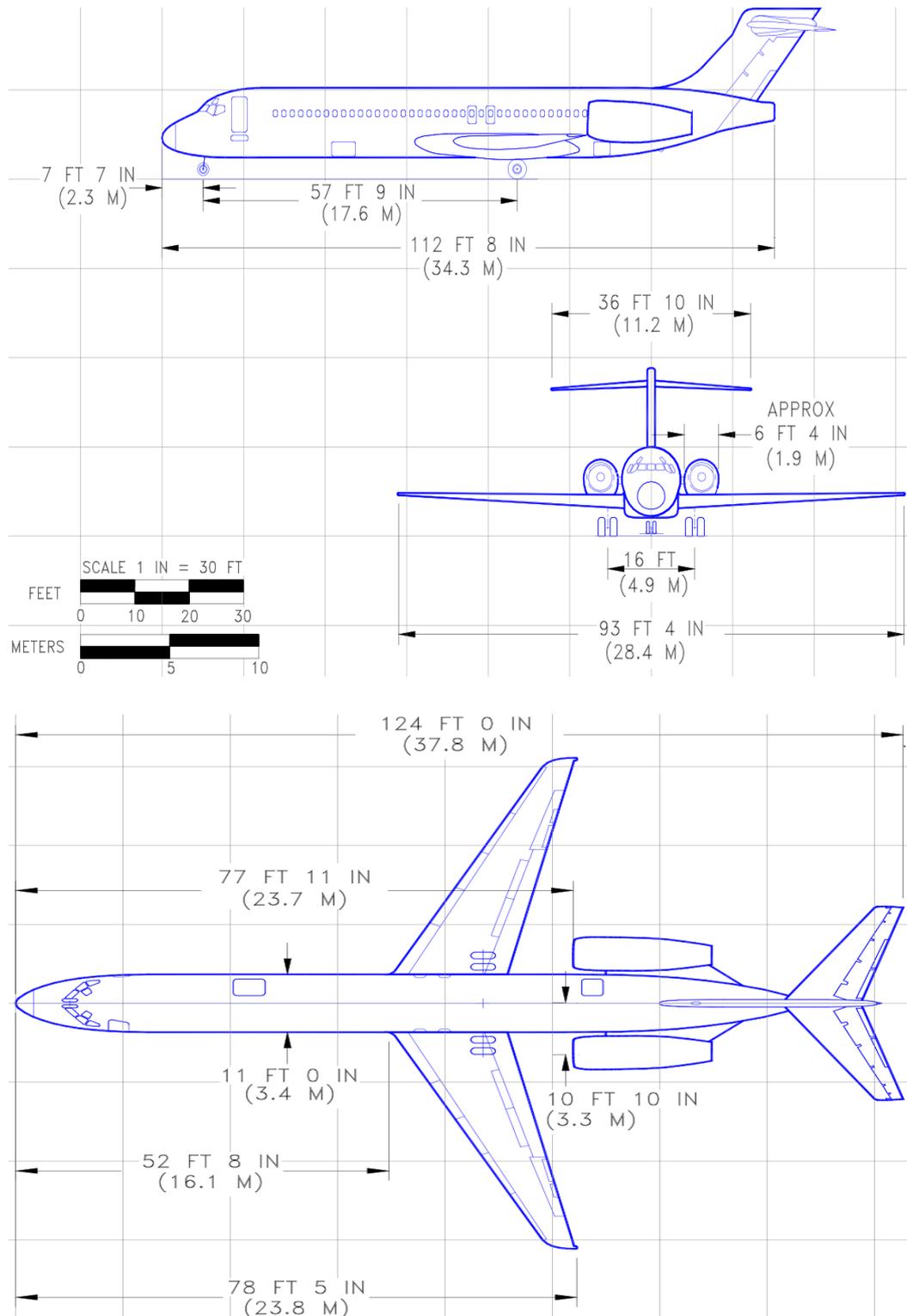
$$\frac{MRW}{p} = \frac{122533 \text{ lb}}{164 \text{ lg/pulg}^2} = 747 \text{ pulg}^2 = 4819.4 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{55580 \text{ kg} * 9.81}{0.482 \text{ m}^2} = 1131.20 \text{ kPa}$$

Figura 41

Vista en elevación y en planta de la aeronave Boeing 717



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave Boeing 717

Figura 42

Aeronave Boeing 717



Nota: Esta aeronave tiene una capacidad para 134 pasajeros como máximo.

Boeing 727

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 95028 kg = 209501 lb
- Presión de neumático (p): 167 psi
- Área de contacto:

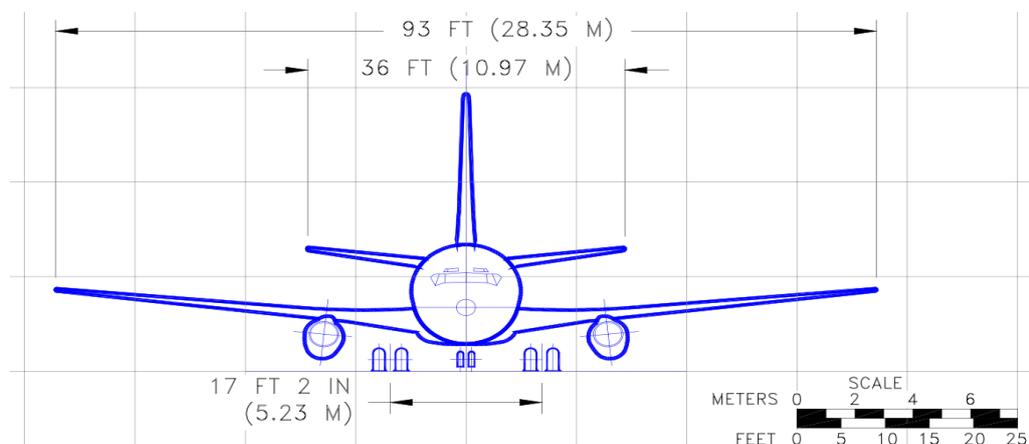
$$\frac{MRW}{p} = \frac{209501 \text{ lb}}{167 \text{ lb/pulg}^2} = 1254 \text{ pulg}^2 = 8090.3 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{95028 \text{ kg} * 9.81}{0.809 \text{ m}^2} = 11443.18 \text{ kPa}$$

Figura 43

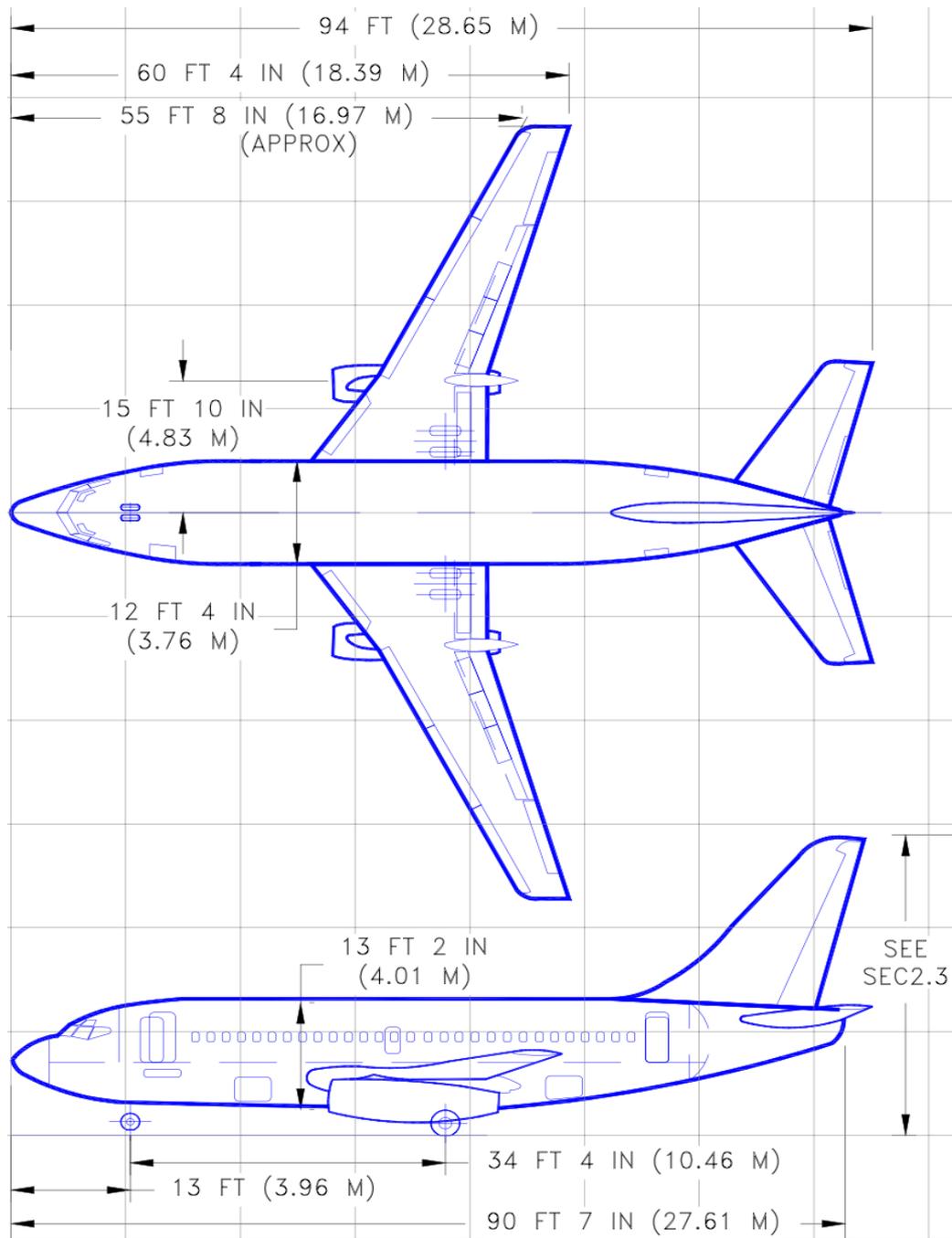
Vista frontal de la aeronave Boeing 727



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave Boeing 727.

Figura 44

Vista en planta y en elevación de la aeronave Boeing 727



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave Boeing 727 que tiene una capacidad para 189 pasajeros como máximo.

Boeing 737-200

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 52390 kg = 115500 lb
- Presión de neumático (p): 182 psi
- Área de contacto:

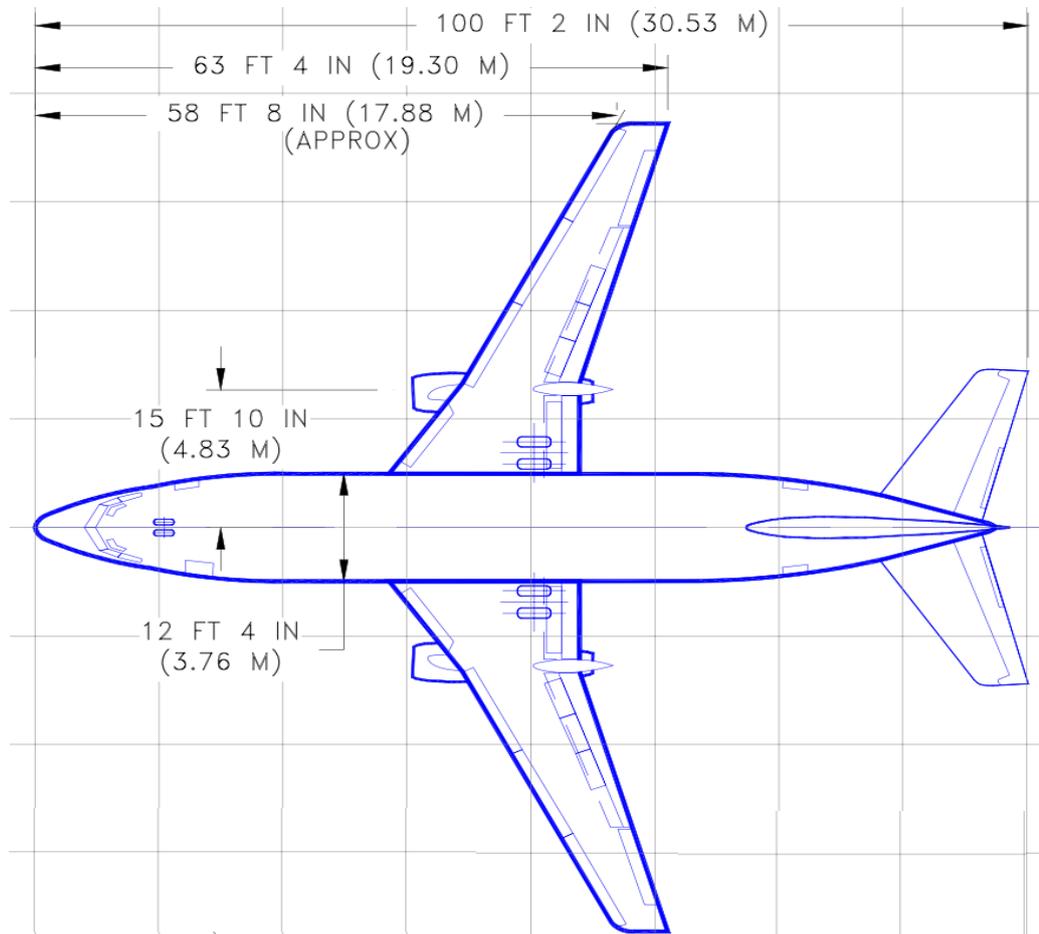
$$\frac{MRW}{p} = \frac{115500 \text{ lb}}{182 \text{ lb/pulg}^2} = 635 \text{ pulg}^2 = 4096.8 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{52390 \text{ kg} * 9.81}{0.410 \text{ m}^2} = 1253.53 \text{ kPa}$$

Figura 45

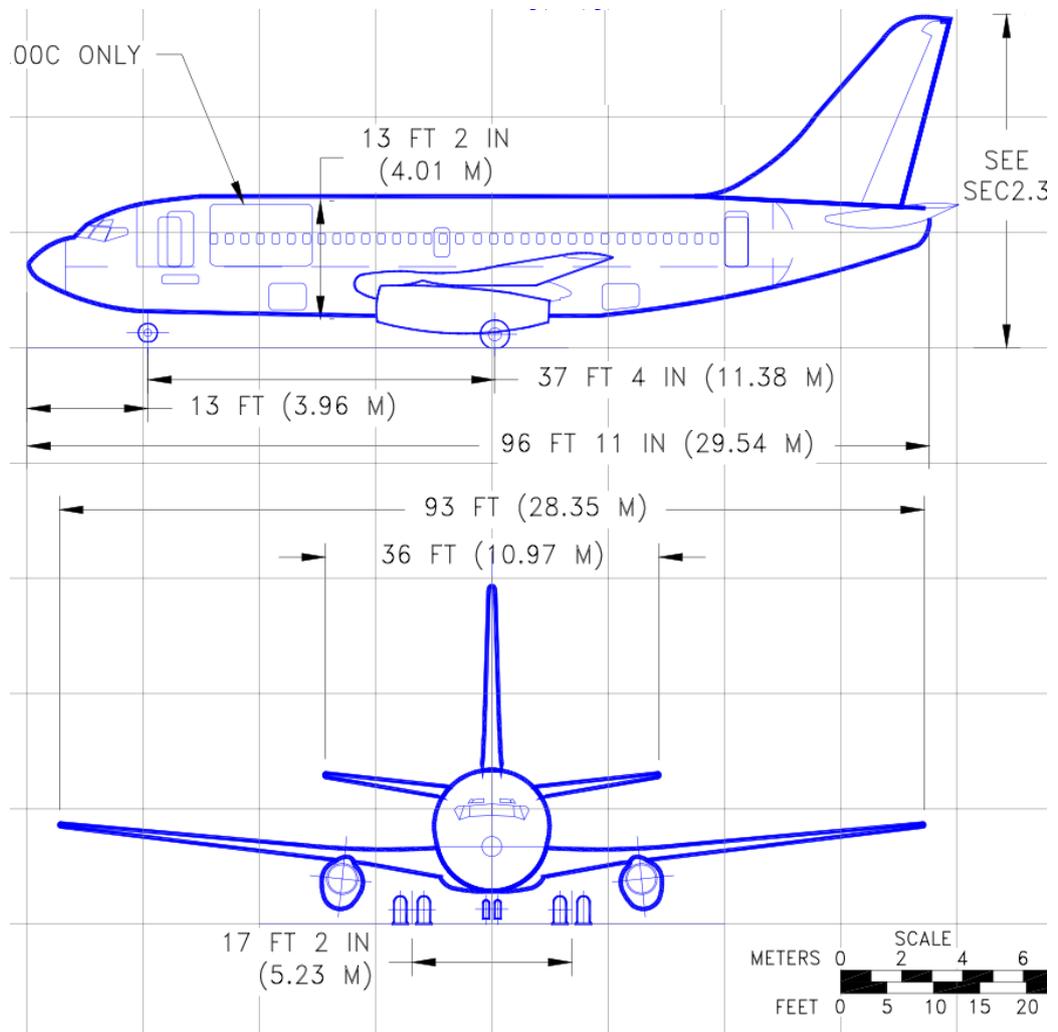
Vista en planta de la aeronave Boeing 737-200



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave Boeing 737-200.

Figura 46

Vista en elevación y frontal de la aeronave Boeing 737-200



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave Boeing 737-200 que tiene una capacidad para 136 pasajeros como máximo.

Boeing 737-800

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 79016 kg = 174200 lb
- Presión de neumático (p): 204 psi
- Área de contacto:

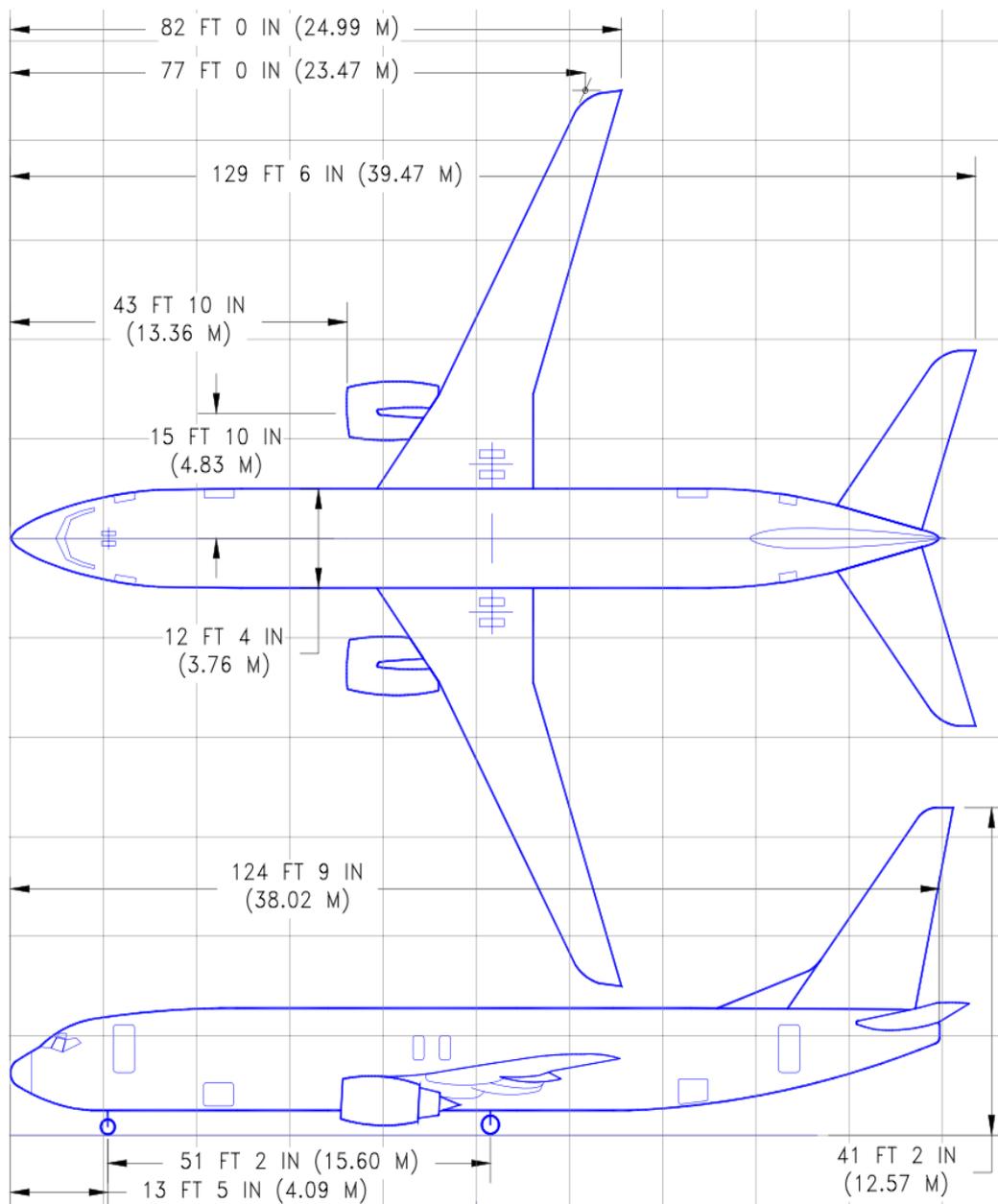
$$\frac{MRW}{p} = \frac{174200 \text{ lb}}{204 \text{ lg/pulg}^2} = 854 \text{ pulg}^2 = 5509.7 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{79016 \text{ kg} * 9.81}{0.551 \text{ m}^2} = 1406.80 \text{ kPa}$$

Figura 47

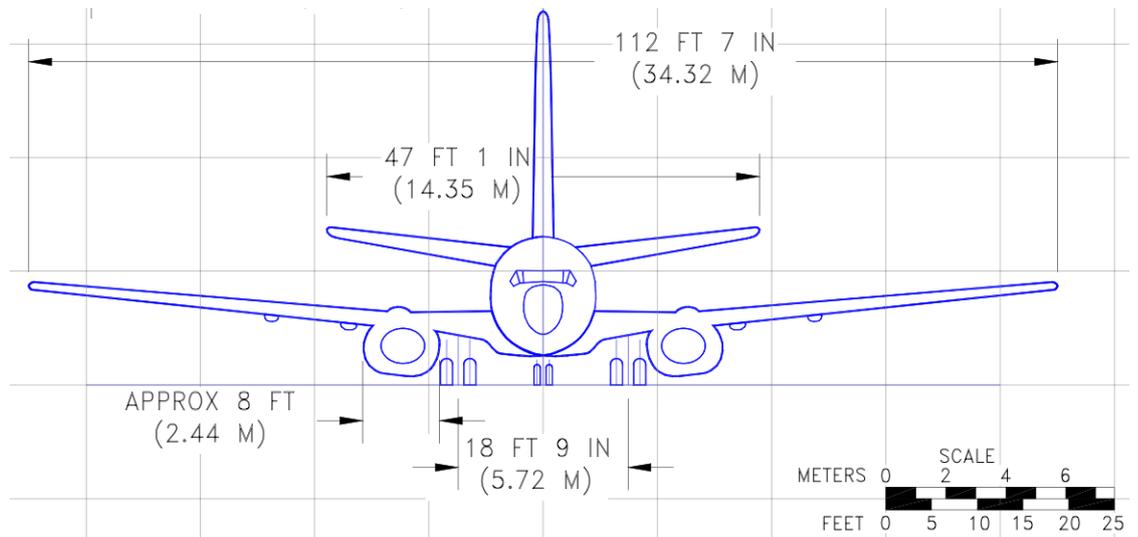
Vista en planta y en elevación de la aeronave Boeing 737-800



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave Boeing 737-800.

Figura 48

Vista frontal de la aeronave Boeing 737-800



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave Boeing 737-800 que tiene una capacidad para 189 pasajeros como máximo.

Embraer 190

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 51800 kg = 114199 lb
- Presión de neumático (p): 157 psi
- Área de contacto:

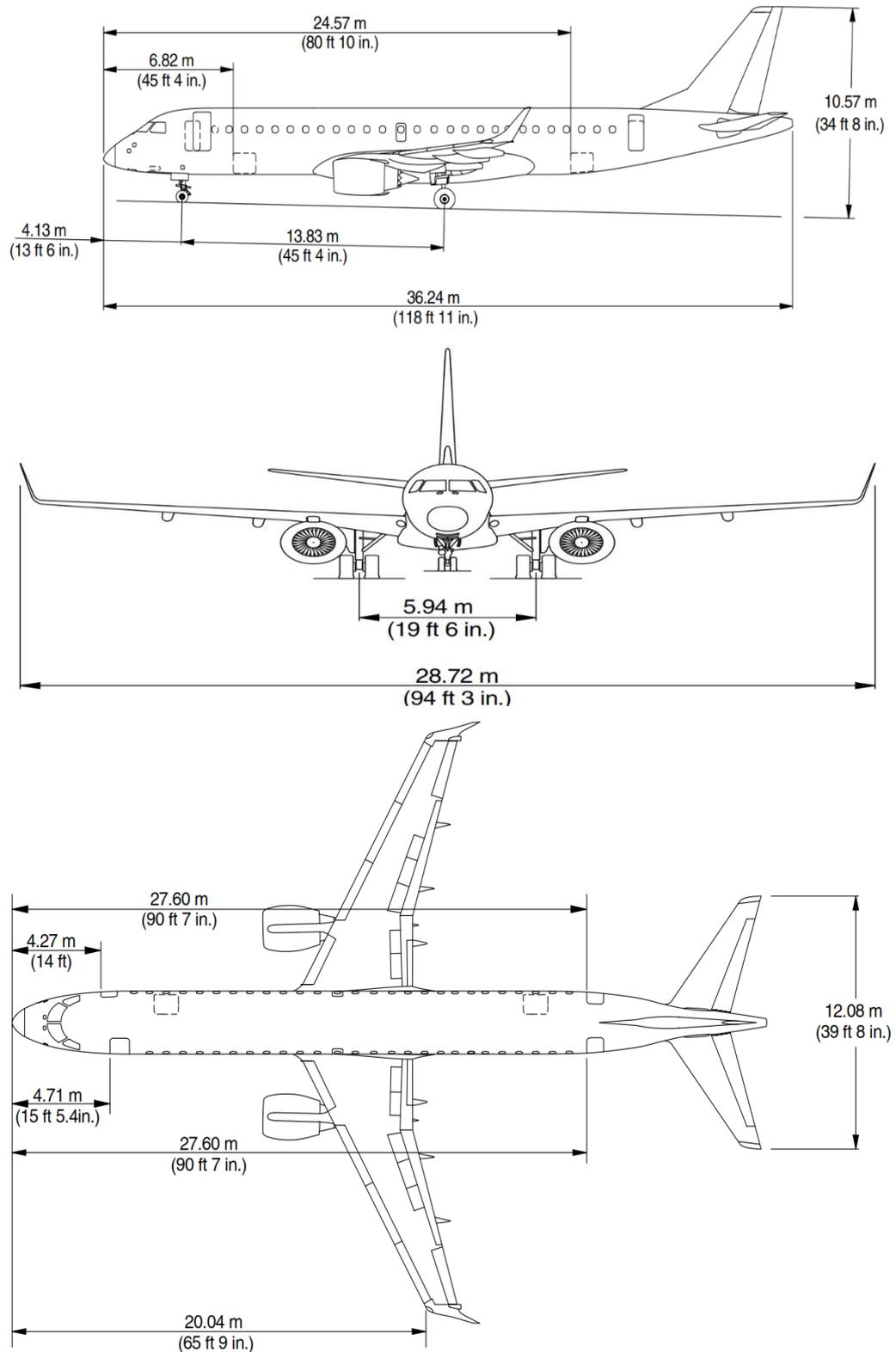
$$\frac{MRW}{p} = \frac{114199 \text{ lb}}{157 \text{ lg/pulg}^2} = 727 \text{ pulg}^2 = 4690.3 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{51800 \text{ kg} * 9.81}{0.469 \text{ m}^2} = 1083.49 \text{ kPa}$$

Figura 49

Vista en elevación y en planta de la aeronave Embraer 190



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave Boeing 737-800.

Figura 50

Aeronave Embraer E-190



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave Embraer E-190 que tiene una capacidad para 114 pasajeros como máximo.

BAE 146-200

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 42200 kg = 93035 lb
- Presión de neumático (p): 148 psi
- Área de contacto:

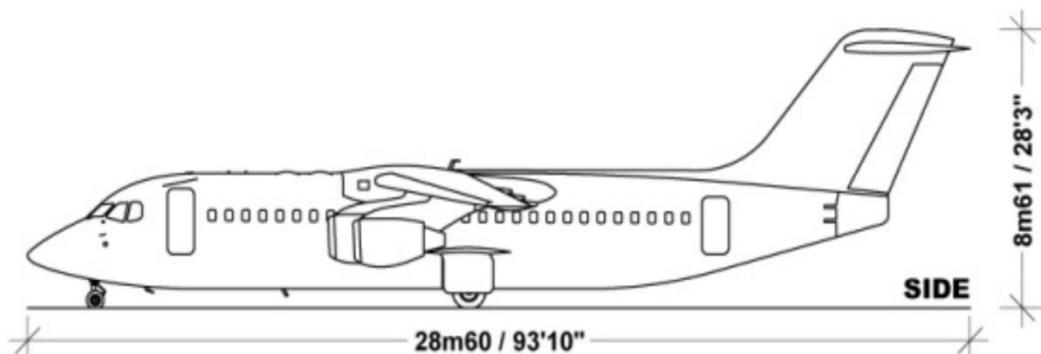
$$\frac{MRW}{p} = \frac{93035 \text{ lb}}{148 \text{ lg/pulg}^2} = 629 \text{ pulg}^2 = 4058.1 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{42200 \text{ kg} * 9.81}{0.406 \text{ m}^2} = 1019.66 \text{ kPa}$$

Figura 51

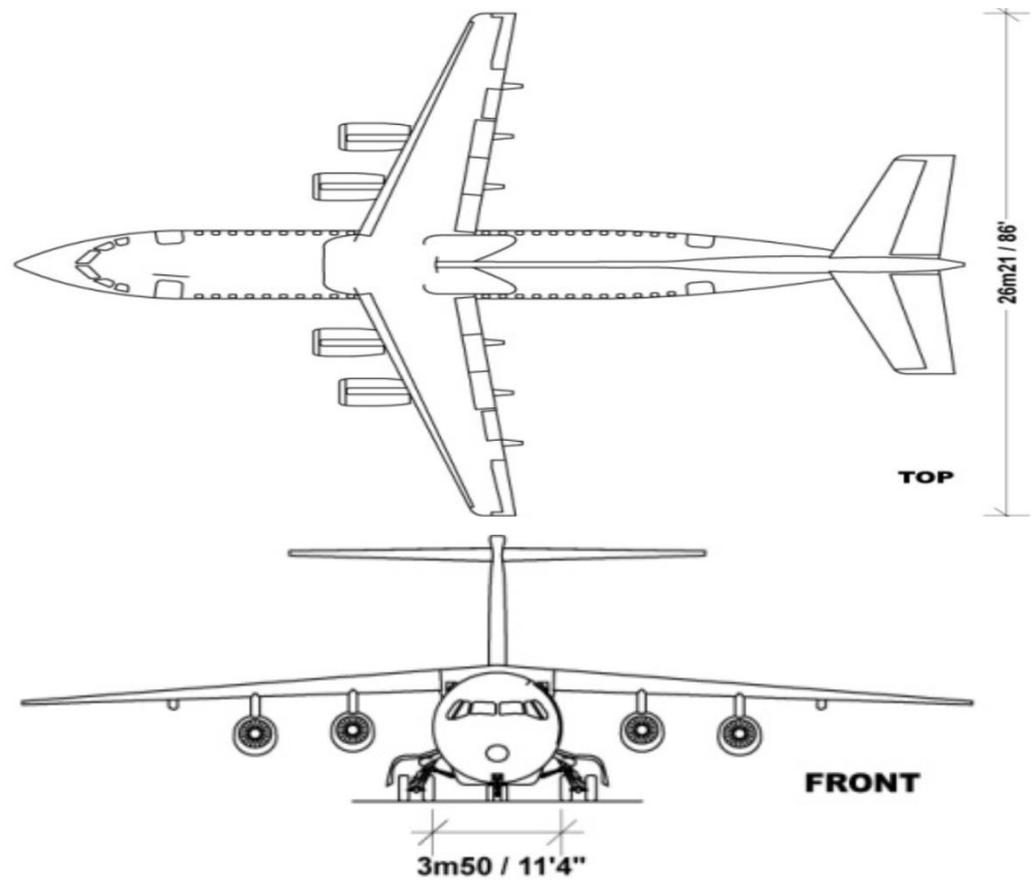
Vista en elevación de la aeronave BAE 146-200



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave Boeing 737-800.

Figura 52

Vista en planta y elevación de la aeronave BAE 146-200



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave BAE 146-200 que tiene una capacidad para 112 pasajeros como máximo.

BAE 146-300

- Peso bruto máximo de la aeronave (MTOW): 46040 kg = 101501 lb
- Presión de neumático (p): 155 psi
- Área de contacto:

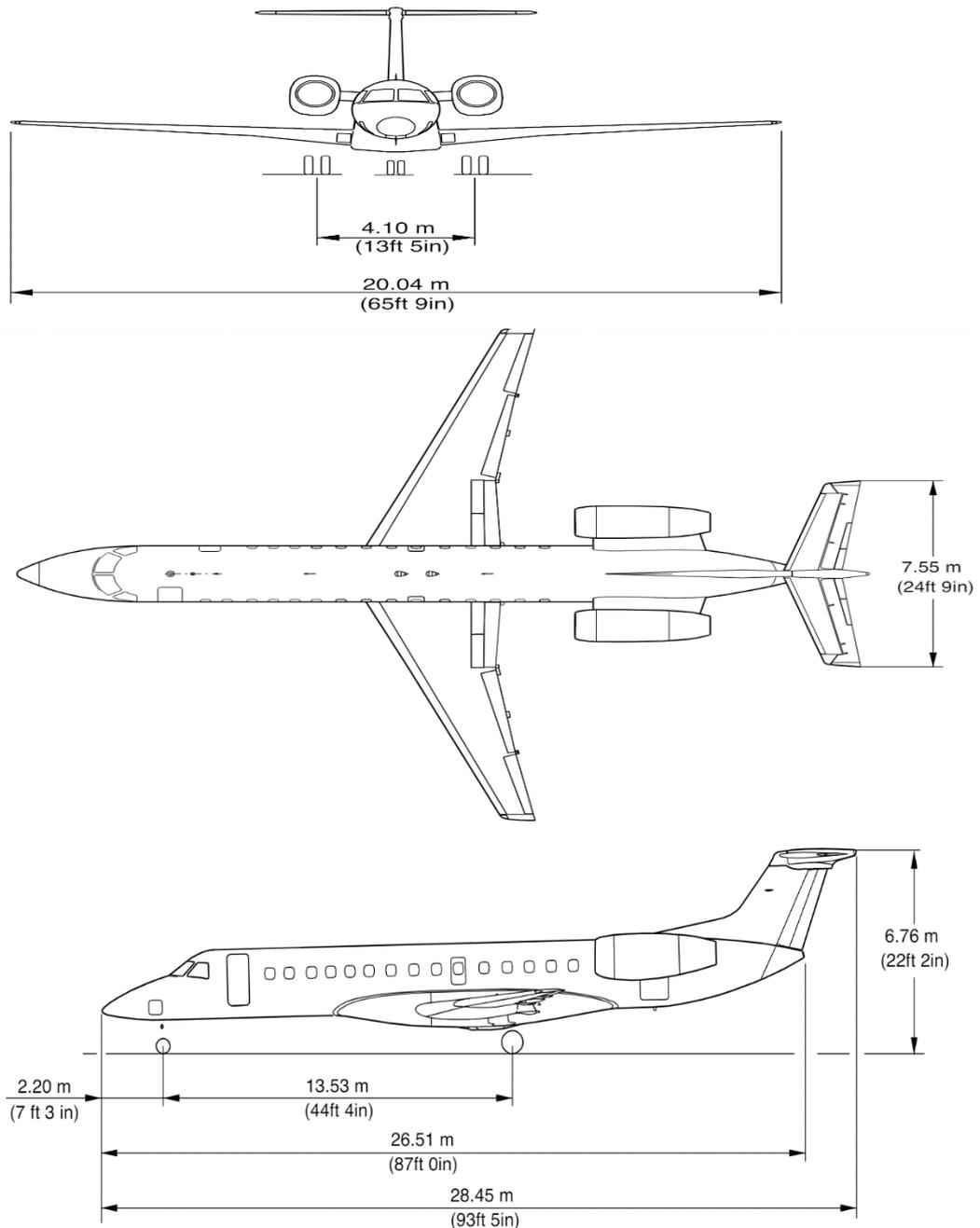
$$\frac{MRW}{p} = \frac{101501 \text{ lb}}{155 \text{ lg/pulg}^2} = 655 \text{ pulg}^2 = 4225.8 \text{ cm}^2$$

- Presión de contacto:

$$\frac{46040 \text{ kg} * 9.81}{0.423 \text{ m}^2} = 1067.74 \text{ kPa}$$

Figura 53

Vista frontal y en planta de la aeronave BAE 146-300



Nota: Se muestran las dimensiones de la aeronave BAE 146-300.

Figura 54

Aeronave BAE 146-300



Nota: Se muestran las características y medidas principales de la aeronave BAE 146-300 que tiene una capacidad para 128 pasajeros como máximo.

3.6. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA PISTA

a) Aeronave de diseño geométrico

Para realizar el dimensionamiento geométrico de la pista de aterrizaje, como lo establece la OACI, se tomó como aeronaves de diseño, aquellas con dimensiones mayores las cuales se prevé que puedan arribar al aeropuerto en estudio, tales como el Boeing B737-200, Boeing B737-800 y la Airbus 320N por ser las aeronaves comerciales más grandes en el mercado aeroportuario.

Tabla 23

Datos técnicos de la aeronave de diseño

Aeronave	Long. (m)	Envergadura (m)	Anchura exterior entre ruedas (m)
Boeing 737-200	33.40	34.8	9.00
Boeing 737-800	39.47	38.8	9.10
Airbus 320N	37.57	35.8	8.95

Tomada de Airplane Characteristics for Airport Planning, por Boeing, 2023; y de Aircraft Characteristics Airport And Maintenance Planning, por Airbus, 2021.

De las aeronaves anteriores seleccionamos como avión de diseño geométrico al Boeing 737-800. Con los datos técnicos del avión de diseño y con la Tabla 2 podemos establecer que el aeropuerto de Ventilla tendrá una clave de referencia 4D.

b) Ancho de la pista de aterrizaje

Según la DGAC (2021) el ancho de la pista no debe ser inferior a la dimensión apropiada que se especifica en la Tabla 24. Para una anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje máxima de 9.10 m de la aeronave Boeing 737-800, obtenemos un ancho mínimo de pista de 45 m.

Tabla 24

Ancho mínimo de pista de aterrizaje

Número de Clave	≤ 4.5 m	> 4.5 m y ≤ 6 m	> 6 m y ≤ 9 m	> 9 m y ≤ 15 m
1	18	18	23	-
2	23	23	30	-
3	30	30	30	45
4	-	-	45	45

Tomada de Aeródromos: Diseño y operaciones de aeródromos, (p. 1-13), por la DGAC, 2021.

c) Longitud mínima de la pista de aterrizaje

La determinación de la longitud mínima para la pista de aterrizaje implica determinar por separado tanto la longitud mínima de aterrizaje como la longitud mínima de despegue, para ello se requieren algunos datos, los cuales se encuentran en los manuales de la aeronave y se presenta en la Tabla 25. Para el cálculo de longitud de aterrizaje se utilizó las gráficas mostradas en las Figuras 45 y 46.

Tabla 25

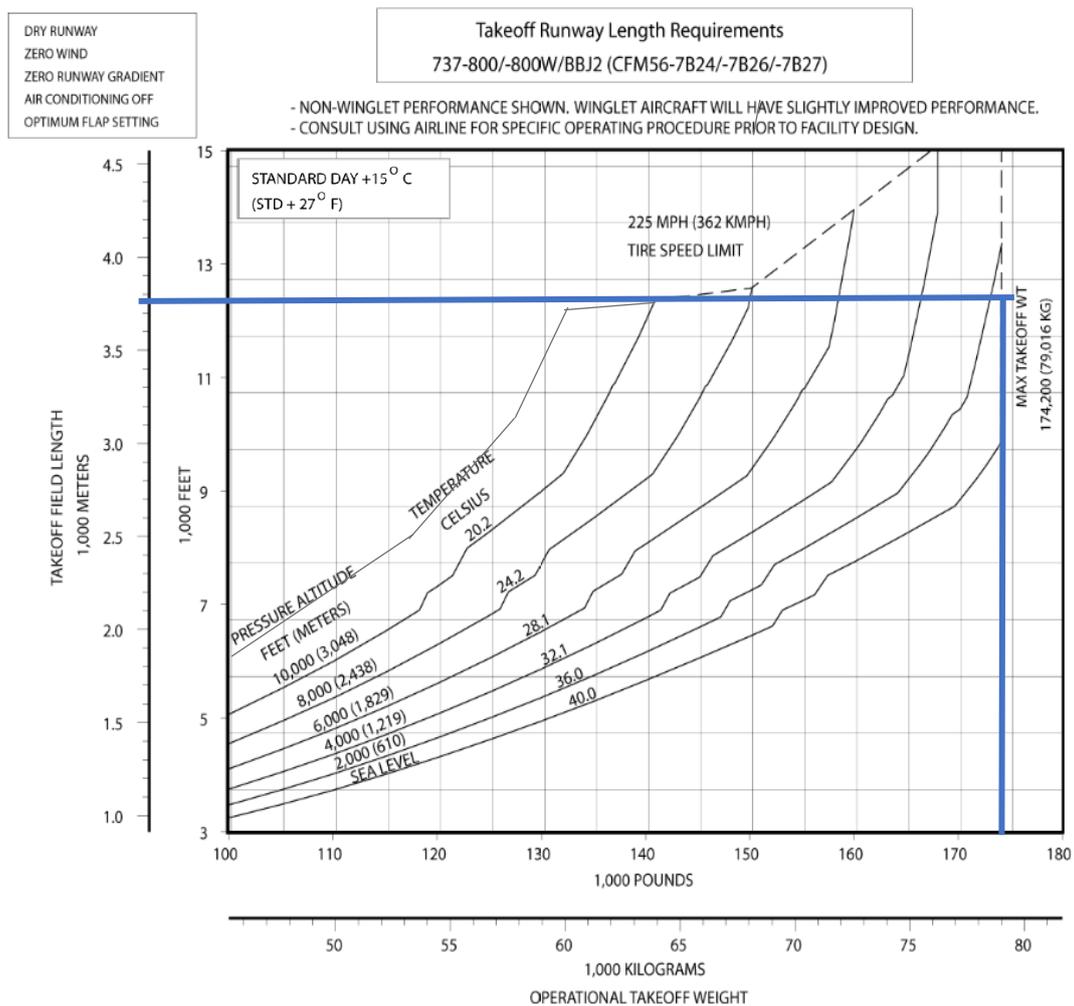
Datos para el cálculo de la longitud de la pista de aterrizaje

Avión de diseño	B737-800
Temperatura máxima media diaria del mes más caluroso en el aeropuerto	15.1 °C
Elevación del aeropuerto	4070 m.s.n.m.
Peso máximo de despegue de diseño	79016 kg
Peso máximo de aterrizaje de diseño	66361 kg
Diferencia máxima en las elevaciones de la línea central de la pista	30 m

Nota: en la presente tabla se muestran los datos necesarios para el cálculo de la longitud de pista.

Figura 55

Cálculo de la longitud mínima de despegue



Adaptada de 737 Airplane Characteristics for Airport Planning, D6-58325-6, 2016.

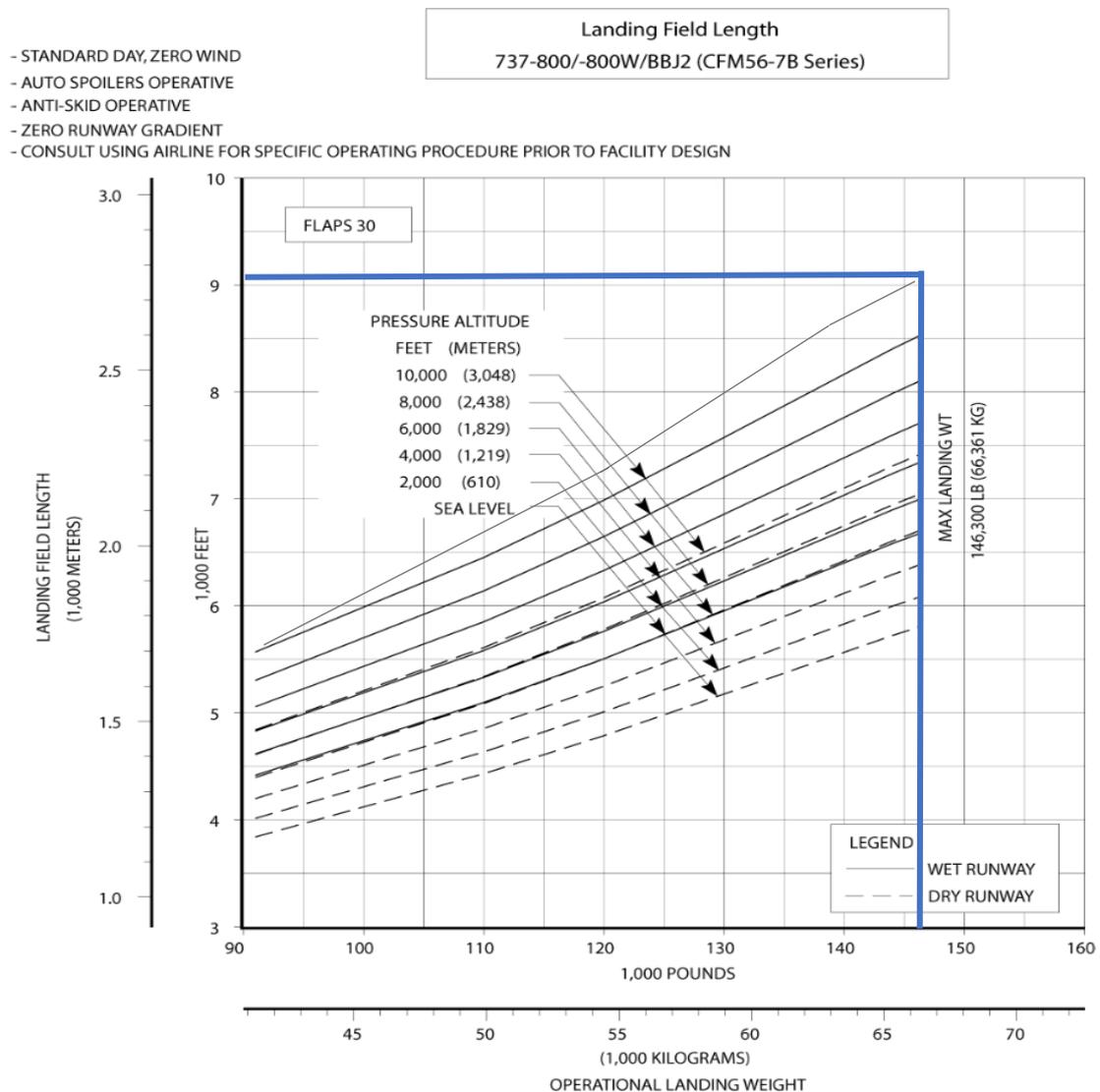
Obtenemos una longitud mínima de la pista para los aterrizajes de 2850 m y para los despegues de 3700 m. De los anteriores escogemos la longitud mayor. Además, se debe realizar un ajuste para una pendiente efectiva distinta de cero (0), tal como lo indica la FAA:

$$3700 + (3 * 30) = 3790 \text{ m}$$

El requisito de longitud mínima para la pista de aterrizaje es de 3790 m. por lo tanto con una pista de 4000 m se garantizará un adecuado tránsito de aeronaves para el aeropuerto de ventilla.

Figura 56

Cálculo de la longitud mínima de aterrizaje



Adaptada de 737 Airplane Characteristics for Airport Planning, D6-58325-6, 2016.

d) Pendiente longitudinal de la pista de aterrizaje

Para el presente caso consideramos una pendiente longitudinal máxima del 1%.

e) Pendiente transversal de la pista de aterrizaje

Para el caso en estudio adoptamos una pendiente transversal máxima de 1.5%.



3.6.1. Márgenes de las pistas de aterrizaje

Como lo indica la DGAC (2021), deben proveerse márgenes en toda pista principal cuya letra de clave de referencia sea D, E o F.

a) Ancho de los márgenes de pista

Para aviones con ancho exterior entre ruedas del tren de aterrizaje (OMGWS) desde 9 m hasta 15 m (exclusive) los márgenes deben extenderse simétricamente a ambos lados de la pista de forma que la anchura total de ésta y sus márgenes no sea inferior a 60 m cuando la letra de clave sea C, D o E; y 60 m cuando la letra de clave sea F con aviones bimotores y trimotores; y 75 m cuando la letra de clave sea F con aviones cuatrimotores (o más). Por lo tanto, para una clave de referencia de 4C, adoptamos una anchura total mínima de pista + márgenes igual a 60 m.

3.6.2. Franja de pista y zonas de seguridad

- Franjas de pista: Superficie nivelada de terreno libre y preparada para recibir aviones en casos esporádicos, contará con 100 m de ancho en cada lado de la pista.
- Zona de parada (SWY): Superficie de asfalto o concreto hidráulico ubicada a continuación de la pista con dimensiones de 60 m x 60 m.

3.7. ESTUDIO PLUVIOMÉTRICO

El SENAMHI presenta una data histórica de datos hidrometeorológicos como la precipitación, temperatura, humedad, viento.

Se consideró como fuente de información de la estación convencional con recepción de datos en tiempo real, “Estación de Puno”.

Tabla 26

Datos generales de la Estación - Puno

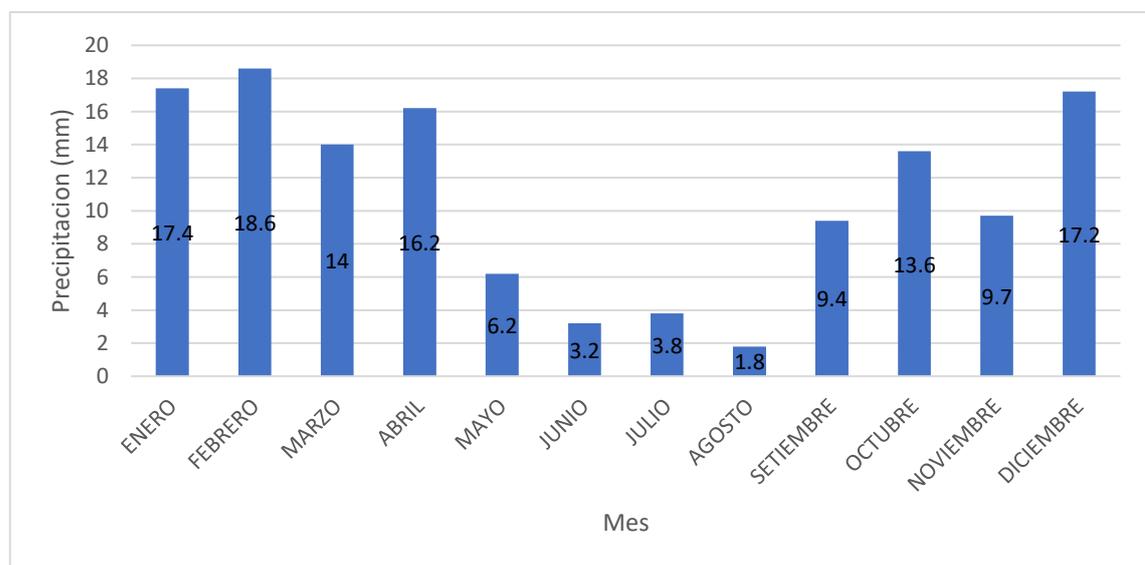
Latitud	:15°49'34.5" S	Altitud	:3812 m.s.n.m.
Longitud	:70°0'43.5" W		

Nota: En la presente tabla se muestra las coordenadas UTM de la Estación meteorológica de Puno.

Se recopiló la información del SENAMHI Puno, se utilizaron los datos obtenidos de los últimos 30 años (agosto de 1994 - julio de 2023). El registro completo de precipitaciones se encuentra en los anexos, de esta información se logró obtener la precipitación máxima (en mm) en 24 horas de cada mes, tal como se en la Tabla 29.

Figura 57

Histograma de precipitaciones máximas en 24 h



Nota: En la presente figura se muestran los valores máximos de precipitaciones máximas en 24 horas durante el periodo de 1994 al año 2023.

Se observa una precipitación máxima en los últimos 30 años de 18.6 mm. Es importante conocer los valores máximos de precipitaciones para futuros estudios o toma de decisiones sobre el proyecto.

Tabla 27

Precipitación máxima en 24 horas

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1994	-	-	-	-	-	-	-	1.4	3.6	2.8	3.7	6.6
1995	10.4	8.6	13.2	6.2	3.2	1.6	2.4	0	9.4	13.4	5.0	5.4
1996	14.4	6.8	7.2	5.6	3.8	2.2	3.8	0	2.8	6.2	0.8	0
1997	0.2	5.2	5.6	6.2	1.2	0.4	1.6	0	0.4	1.2	0.2	0
1998	0	0.2	0	5.8	0.2	0	0	0	3.4	5.4	6.2	7.2
1999	11.2	6.8	14.0	5.2	4.8	0.2	0.2	0.6	8.2	4.2	2.4	-
2000	6.0	4.0	3.0	1.0	2.8	0	1.0	0.8	1.0	10.0	6.0	12.4
2001	10.0	10.0	3.0	2.0	1.8	0	0.8	1.0	6.6	6.0	5.2	6.0
2002	3.2	3.1	7.0	10.0	1.4	0.2	0	0	4.0	4.0	7.0	1.3
2003	8.0	9.0	1.0	2.0	3.0	1.7	0	1.2	1.5	6.0	5.2	16.0
2004	4.5	9.0	7.0	4.0	4.3	2.9	0.4	0	9.0	10.2	5.7	11.2
2005	7.0	2.0	6.0	7.0	5.0	3.2	1.0	0	5.7	8.0	6.0	1.0
2006	3.5	18.6	8.0	8.0	2.2	2.9	0	0	7.1	13.6	2.5	10.4
2007	9.0	4.0	1.0	3.0	3.0	0	0.9	1.1	7.2	1.0	2.8	17.2
2008	3.0	3.2	3.0	4.0	4.0	1.2	0.8	1.0	1.0	8.3	1.5	8.0
2009	6.3	3.0	7.0	5.0	3.0	1.5	1.0	0.6	0	3.5	5.6	5.3
2010	17.4	5.4	1.7	2.0	1.0	1.9	2.3	0	5.0	12.0	3.7	1.0
2011	8.8	1.4	1.1	10.0	3.5	2.0	2.0	1.7	7.5	8.2	5.2	16.2
2012	1.9	1.0	1.2	1.0	1.7	1.8	1.0	1.8	8.0	3.0	6.9	8.8
2013	7.0	5.0	8.9	3.0	2.1	0	2.5	0.1	0.7	0	3.1	14.9
2014	4.6	0	3.3	9.0	6.2	0	1.9	0.2	4.4	8.4	8.9	9.5
2015	2.0	1.0	3.5	16.2	1.0	2.0	1.0	0.5	8.6	1.4	9.7	10.4
2016	4.0	3.0	7.6	13.0	2.0	2.1	1.5	0.8	5.2	8.9	1.0	9.0
2017	6.0	2.0	3.3	12.7	0.8	0	0.7	0	0	8.0	7.1	8.1
2018	8.1	13.0	9.0	4.0	0.4	0.3	0.2	0	4.2	11.5	6.0	15.0
2019	3.0	5.0	2.9	0	2.0	1.0	0	0	1.7	0	5.0	6.0
2020	3.5	8.0	0	5.0	1.0	0	0	0.2	6.2	11.7	7.4	7.1
2021	10.0	8.0	7.3	14.9	2.0	0	0.9	0.1	2.7	5.1	5.3	4.0
2022	9.5	8.0	2.0	11.2	0.1	0.9	1.2	0.2	0.9	8.0	1.9	5.9
2023	5.6	1.0	3.8	10.0	5.0	0.8	1.3	-	-	-	-	-

Nota: En la presente tabla se muestran las precipitaciones máximas en (mm) en 24 horas de cada mes durante el periodo de 1994 al año 2023.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS

En el presente capítulo se efectúa el diseño estructural de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Ventilla utilizando 2 metodologías para cada tipo de pavimento, las cuales se indican a continuación:

Tabla 28

Metodologías de diseño de pavimentos aeroportuarios

Estructura	Métodos tradicionales	Métodos modernos
Pavimento flexible	Método de la OACI	Método de la FAA
Pavimento rígido	Método de la OACI	Método de la FAA

Nota: Elaboración propia.

a) CBR de subrasante

Para la selección del valor CBR de diseño, se adoptó el criterio de la OACI, escogiendo conservadoramente el menor valor de los obtenidos en el estudio de suelos. Por lo tanto, el valor del CBR de diseño seleccionado para la pista de aterrizaje al 95% de la MDS es de 11.4 %.

4.2. DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR EL MÉTODO OACI

4.2.1. Determinación de la aeronave equivalente

El cálculo de la aeronave equivalente de diseño implica determinar el número de salidas anuales de cada tipo de aeronave y agruparlas en “salidas anuales equivalentes” en términos de la configuración de una sola aeronave de diseño establecida. Este agrupamiento se basa en la conversión de las salidas

anuales de las aeronaves distintas a la aeronave de diseño a un equivalente de salidas anuales mediante el uso de los multiplicadores mostrados a continuación:

Tabla 29

Factores para convertir salidas anuales por aeronave a equivalentes

Para convertir de	a	Multiplicar salidas por
Rueda única	Doble rueda	0.8
Rueda única	Doble tándem	0.5
Doble rueda	Doble tándem	0.6
Doble dual tándem	Doble tándem	1.0

Nota: Se muestran factores para convertir las salidas anuales por aeronave en salidas anuales equivalentes de la aeronave equivalen de diseño. Tomada de Planificación y diseño de aeropuertos (p. 269), por Horonjeff, 2010.

Del estudio de tráfico realizado, la aeronave Airbus 320 realizará la mayor cantidad de operaciones, por lo tanto, esta será la aeronave de diseño.

Para la conversión a salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño se utilizó la ecuación de Horonjeff (2010) mostrada a continuación:

$$\text{Log}(R_1) = \text{Log}(R_2) * \sqrt{\frac{W_2}{W_1}} \quad (38)$$

Donde: R_1 son las salidas anuales equivalentes de la aeronave de cálculo, R_2 son las salidas anuales expresadas en el tren de aterrizaje de la aeronave que se está convirtiendo, W_1 es la carga sobre la rueda de la aeronave de cálculo y W_2 es la carga sobre la rueda de la aeronave que se está convirtiendo.

Las salidas equivalentes de la aeronave de diseño se determinaron sumando las salidas equivalentes de cada aeronave del grupo tal como se muestra continuación:



Tabla 30

Determinación de las salidas anuales equivalentes

Aeronave	Tipo de tren	Sal. inic. (año)	MTOW (Kg)	95% MTOW (Kg)
A320	Rueda doble	2148	78000	74100
A320N	Rueda doble	500	79000	75050
B 717	Rueda doble	250	55580	52801
B 727	Rueda doble	250	95028	90277
B737-200	Rueda doble	250	52390	49771
B737-800	Rueda doble	250	79016	75065
E 190	Rueda doble	250	51800	49210
BAE 146-200	Rueda doble	250	42200	40090
BAE 146-300	Rueda doble	250	46040	43738

Nota: Se muestran la determinación de las salidas equivalentes de la aeronave equivalente.

Tabla 31

Determinación de las salidas anuales equivalentes (continuación)

Aeronave	Carga/rueda a W_2 (Kg)	Fac.	Sal. anuales corregidas R_2	Carga/avión de cálculo W_1 (Kg)	Salidas anuales equivalentes R_1
A320	18525	1	3165	18525	3165
A320N	18763	1	737	18525	769
B 717	13200	1	368	18525	147
B 727	22569	1	368	18525	679
B737-200	12443	1	368	18525	127
B737-800	18766	1	368	18525	382
E 190	12303	1	368	18525	123
BAE 146-200	10023	1	368	18525	77
BAE 146-300	10935	1	368	18525	97
				Total =	5566

Nota: Se muestran la determinación de las salidas equivalentes de la aeronave equivalente.

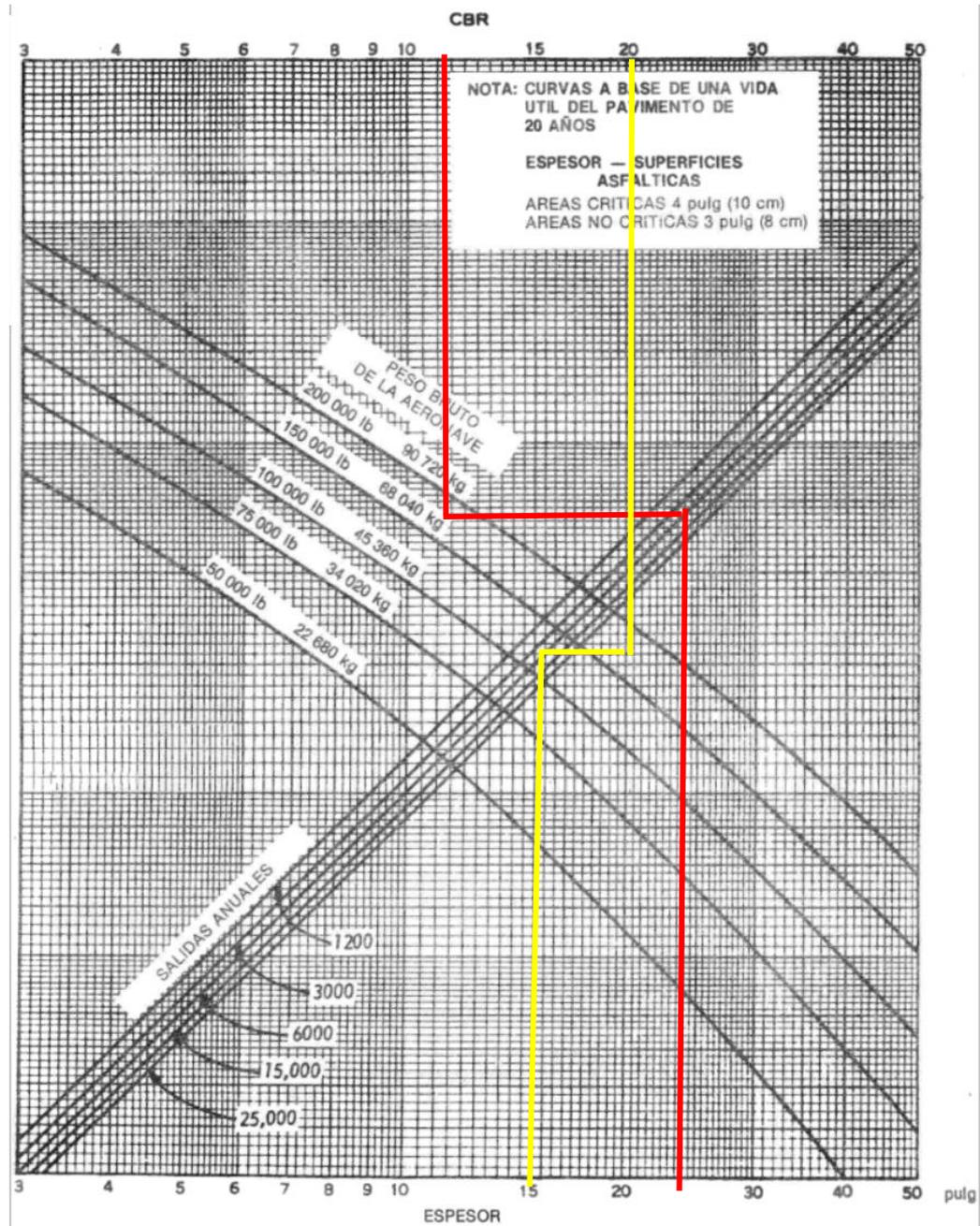
4.2.2. Cálculo de espesores de la pista de aterrizaje

De las Tablas 30 y 31, obtenemos para la aeronave equivalente de diseño A320 (con un peso bruto máximo de 78000 kg) un total 5566 salidas anuales

equivalentes, con estos datos se calcularon los espesores del pavimento, para ello se usaron los gráficos de aproximación.

Figura 58

Cálculo de espesores de la pista de aterrizaje con el método OACI



Adaptada de Manual de diseño de aeródromos - Parte 3, OACI.

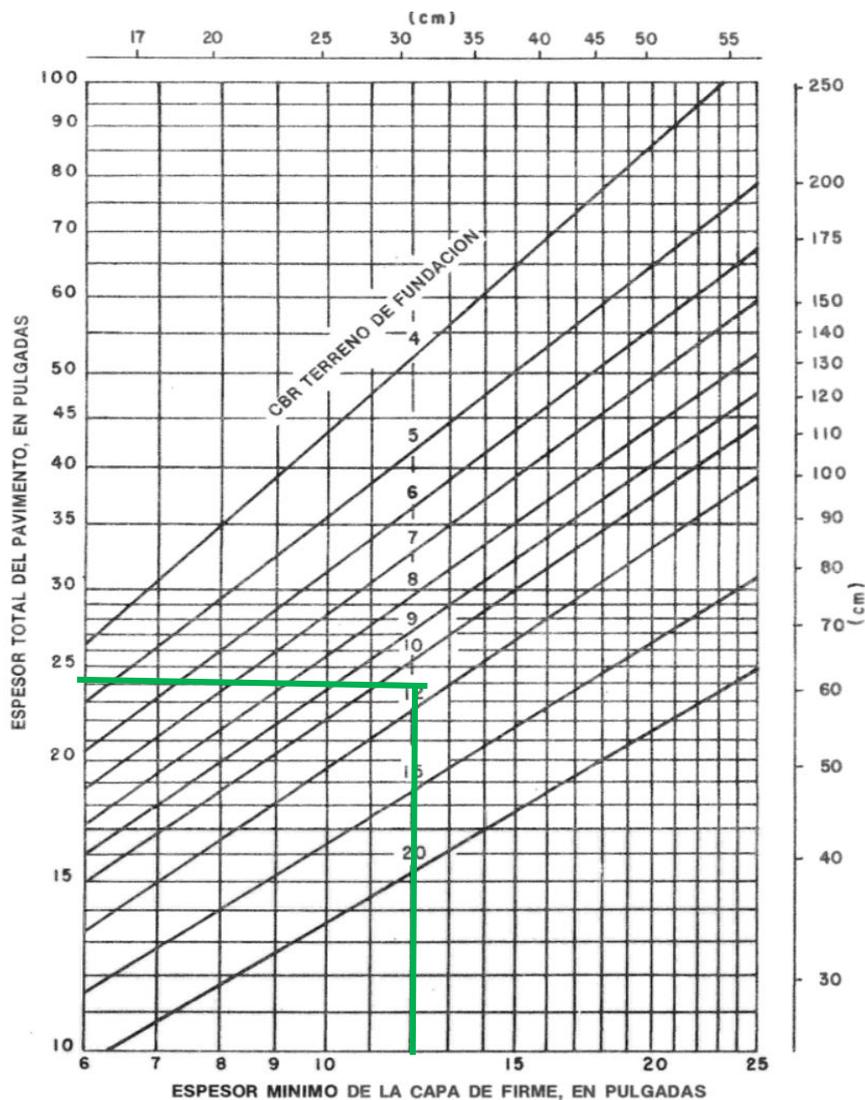
Cálculo del espesor total del pavimento: De la Figura 49 se obtiene un espesor total de 24 pulg (60,96 cm).

Espesor total de la subbase: De la Figura 49 y considerando un valor mínimo de CBR de 20 para la subbase, se obtiene un espesor combinado de mezcla asfáltica y base de 15.0 pulg (38.10 cm). Por lo tanto, el espesor de la subbase será $24 - 15 = 9$ pulg (22.86 cm).

Espesor de la mezcla asfáltica: En el nomograma de la Figura 49 se describen superficies de rodadura de 3 y 4 pulg, de los cuales se utilizó 4 pulg (10 cm) para áreas críticas y 3 pulg (8 cm) para áreas no críticas.

Figura 59

Cálculo de espesor mínimo de base para la pista de aterrizaje



Adaptada de Manual de diseño de aeródromos - Parte 3, OACI.

Espesor de la base: El espesor de la base se calculó de la sustracción del espesor combinado de mezcla asfáltica y base obtenido $15 - 4 = 11$ pulg, este espesor calculado se compara con el mínimo determinado en la Figura 59, se puede observar que se exige un espesor de base mínimo de 12.0 pulg, por lo que el espesor de base será de 12.0 pulg (30.48 cm), con una subbase de 8.0 pulg (20.32 cm).

Base estabilizada: El espesor obtenido de 12.0 pulg se dividió entre 1.4, promedio del rango para convertir de P-209 (agregado triturado) a P-403 (base estabilizada con asfalto) como se muestra en la Tabla 32, obteniendo un espesor de 8.6 pulg (21.77 cm).

Tabla 32

Factores equivalentes para bases de mayor calidad que una base P-209

Base en Material granular	Factor de Equivalencia
P-208 Base Granular	1.0
P-211 Base en roca	1.0
Base en Material estabilizado	Factor de Equivalencia
P-304 Base granular con cemento	1.2 – 1.6
P-306 En concreto Pobre	1.2 – 1.6
P-403 Mezcla asfáltica en caliente	1.2 – 1.6

Tomada de Diseño estructural de pavimentos para aeropuertos, Universidad del Cauca, Col., 2012.

Obtenemos para la pista de aterrizaje un pavimento conformado por una carpeta asfáltica (P-401) de 10 cm, una base estabilizada (P-403) de 21.77 cm y una subbase (P-154) de 20.32 cm.

4.2.3. Cálculo de esfuerzos en la estructura de pavimento

Para comprender mejor como analiza un pavimento aeroportuario este método, se calcularán los esfuerzos para las estructuras de pavimento diseñadas,

para ello se utilizará su propio modelo matemático el mismo que fue utilizado para la implantación de su metodología y que se basa en la teoría de Boussinesq, dicho modelo se fundamenta en la solución teórica matemática de la elasticidad de un sólido semi-infinito homogéneo, isótropo y elástico para una carga distribuida circular uniforme. El esfuerzo vertical máximo (en el eje vertical), según la OACI se determina utilizando la siguiente ecuación matemática:

$$\sigma_z = p \left[1 - \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{1.5}} \right]$$

Dónde r es el radio del área circular cargada en cm, p es la presión uniforme de contacto en la superficie en kg/cm y z es el espesor total del pavimento en cm.

Datos para el cálculo de esfuerzos.

- Aeronave crítica de diseño: BOEING 727, con MTOW = 95028 kg.
- Cálculo de la carga por rueda: Se considera que las ruedas posteriores soportan el 95% del peso total de la aeronave, este valor se dividió entre 4 para obtener la carga para una sola rueda.

$$\frac{95\% * 95028}{4} = \frac{90516}{4} = 22629 \text{ kg}$$

- Presión de contacto: 1.4 MPa (manual de vuelo de la aeronave).
- Radio de carga: Se obtiene a través de la siguiente relación:

$$r = \sqrt{\frac{\text{Carga por rueda}}{\text{Presión de contacto} * \pi}} = \sqrt{\frac{18766.3 \text{ kg}}{14.276 \text{ kg/cm}^2 * \pi}}$$

$$r = 22.46 \text{ cm}$$

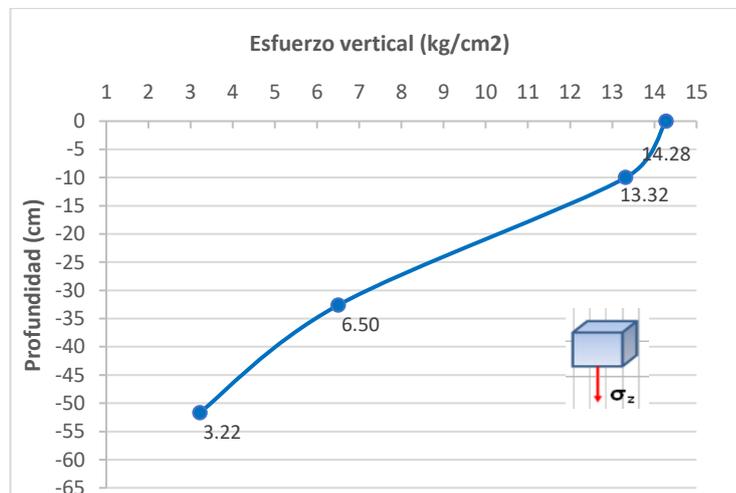
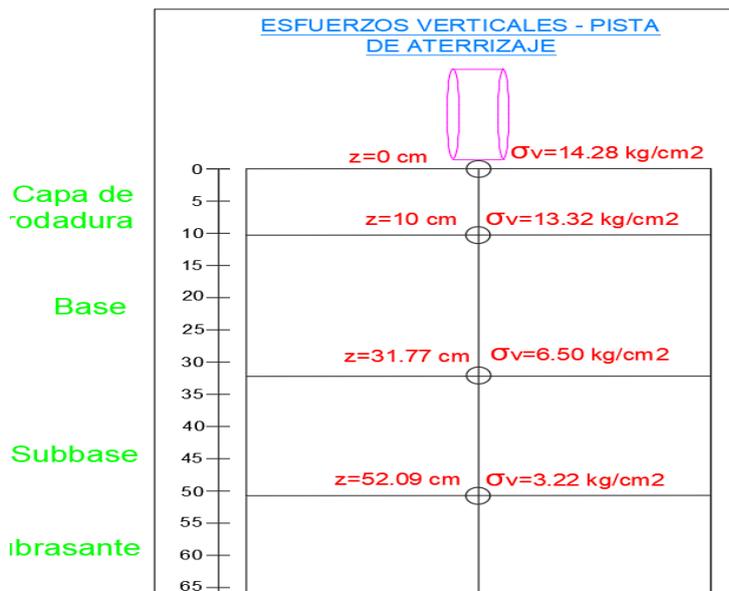
Tabla 33

Datos de entrada para el cálculo de esfuerzos verticales

Estructura	Pista de aterrizaje
Espesor de superficie de rodadura (cm)	10.00
Espesor de base (cm)	21.77
Espesor de subbase (cm)	20.32
Espesor total del pavimento, z (cm)	52.09
Presión de contacto en la superficie, p (kg/cm ²)	14.276
Radio del área cargada, r (cm)	22.46

Figura 60

Distribución de esfuerzos verticales vs profundidad - pista de aterrizaje





De la figura precedente se obtiene que en la base del pavimento flexible el esfuerzo vertical máximo será de 3.22 kg/cm².

El cálculo de esfuerzos utilizando el modelo matemático de Boussinesq nos permite obtener los esfuerzos verticales máximos situados en el centro del área circular cargada, por lo tanto, a mayor espesor total de pavimento, es decir mayor profundidad, se obtienen menores esfuerzos verticales en la parte superior de la subrasante. Esto también explica por qué para valores CBR más bajos, se necesita mayor espesor de pavimento de modo que los esfuerzos en la subrasante también disminuyan.

Por otro lado, para determinar las deflexiones y deformaciones en los pavimentos, este método utiliza técnicas netamente empíricas, es decir, mediciones in situ con equipos especializados.

4.3. DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE POR EL MÉTODO FAA

Para el diseño del pavimento flexible por el método de la FAA (diseño por capas elásticas) se han utilizado los criterios establecidos en la AC N° 150/5320-6G-Diseño y evaluación de pavimentos aeroportuarios.

a) Módulo de elasticidad (E)

Para pavimentos diseñados con este método, la calidad de la subrasante se caracteriza por el módulo elástico (E) determinado a partir de un valor CBR. El valor de E debe obtenerse de la siguiente forma descritas en la AC 150/5320-6G (2021):

- El módulo elástico E puede estimarse a partir del valor del módulo de reacción (k) utilizando la siguiente correlación:

$$E(\text{psi}) = 20.15 * k^{1.284} (k \text{ en } pci)$$

- El módulo de reacción puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

$$k = 28.6926 * CBR^{0.7788} (k \text{ en } pci)$$

Reemplazando datos tenemos:

$$k = 28.6926 * 11.4^{0.7788} (k \text{ en } pci)$$

$$k = 190.94 \text{ pci}$$

Cálculo del módulo de elasticidad:

$$E(\text{psi}) = 20.15 * 190.94^{1.284} (k \text{ en } pci)$$

$$E(\text{psi}) = 17098 \text{ pci}$$

$$E(\text{MPa}) = 117.87 \text{ MPa}$$

Según el estudio de tráfico varias aeronaves del mix superan los 45360 kg de peso bruto máximo de la aeronave de diseño (MTOW), por ende, es necesario utilizar una base estabilizada con asfalto o cemento, como lo exige la FAA.

Por lo tanto, el pavimento flexible estará conformado por una superficie de rodadura (P-401), una base estabilizada con asfalto (P-403) y una subbase granular (P-154); las especificaciones técnicas de los materiales de las capas del pavimento se muestran en el ítem 4.2 de este capítulo.

4.3.1. Procedimiento de diseño en FAARFIELD

a) Registro del tráfico aéreo

Se ingresó el mix de aeronaves de diseño, para ello se ubicó cada aeronave dentro de la biblioteca del programa y se añadió al área de trabajo; se repitió este proceso hasta ingresar todo el mix tal como se muestra en la Figura 61. Además, se ingresó las salidas anuales, su razón de crecimiento y el peso bruto máximo de despegue de cada aeronave.

b) Selección del material

- **Carpeta asfáltica:** Se diseñó con el material de tipo P-401, Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA), con módulo de elasticidad (E) de 1378.95 MPa y coeficiente de poisson de 0.35. El espesor mínimo es 10 cm.
- **Capa base:** Se utilizó una base estabilizada con asfalto P-403 con módulo de elasticidad (E) de 2757.90 MPa y coeficiente de poisson de 0.35. El espesor mínimo es 12.5 cm.
- **Capa subbase:** Se utilizó el material P-154, que son agregados sin triturar con módulo de elasticidad (E) de 171.51 MPa y coeficiente de poisson de

0.35. Este material deberá garantizar un CBR mínimo de 20%. El espesor mínimo es 15 cm.

Figura 61

Registro de tráfico aéreo en FAARFIELD

Biblioteca del programa

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	Dual Tire Spacing (mm)	Tandem Tire Spacing (mm)	Tire Contact Width (mm)
A320-200 std	78000	2148	3.9	59714	0.73	0.76	1.38	1455	0.475	927	0	315
A320neo	79000	250	3.9	6950	0.1	0.11	1.36	1369	0.475	927	0	327
B737-800	79000	250	3.9	6950	0.16	0.21	1.35	1402	0.475	864	0	323
A320-200 std	51800	250	3.9	6950	0	0	1.38	1095	0.475	864	0	296
BAe 146-300/300QC/300QT	42200	250	3.9	6950	0	0	1.5	945	0.475	660	0	288
B737-200	52300	250	3.9	6950	0	0	1.42	1085	0.475	775	0	280

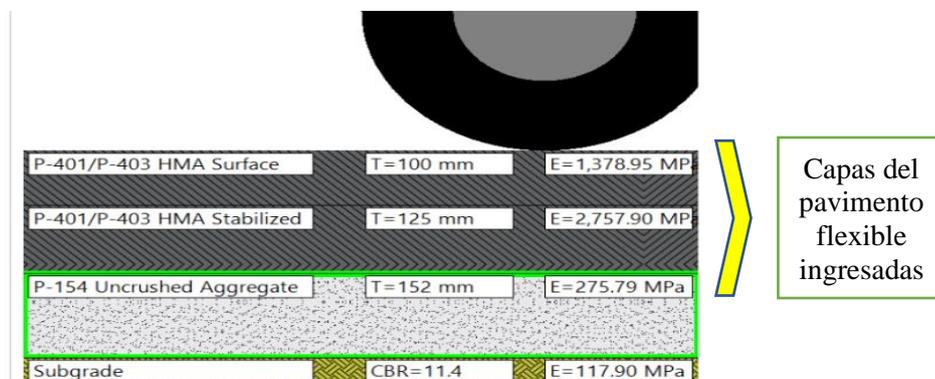
Mix de aeronaves ingresado

Airplane Name	Gross Taxi Weight (kg)	Annual Departures	Annual Growth (%)	Total Departures	CDF Contributions	CDF Max for Airplane	P/C Ratio	Tire Pressure (kPa)	Percent GW on Gear	Tire Contact Width (mm)	Tire Contact Length (mm)	Tire Contact Area (mm ²)
A320-200 std	78,000	2,148	3.9	59,714	0	0	0	1455.43	0.95	315	504	124,819
A320neo	79,000	500	3.9	13,900	0	0	0	1369.50	0.95	327	523	134,355
B717-200 HGW	55,580	250	3.9	6,950	0	0	0	1135.68	0.95	301	482	113,985
B727-200 Advanced Option	95,028	250	3.9	6,950	0	0	0	1189.96	0.95	385	616	185,996
B737-200	52,390	250	3.9	6,950	0	0	0	1084.68	0.95	299	479	112,495
B737-800	79,016	250	3.9	6,950	0	0	0	1402.51	0.95	323	517	131,218
EMB-190 STD	51,800	250	3.9	6,950	0	0	0	1094.91	0.95	296	474	110,189
BAe 146-300/300QC/300QT	42,200	250	3.9	6,950	0	0	0	945.30	0.95	288	460	103,974
BAe 146-300/300QC/300QT	46,040	250	3.9	6,950	0	0	0	1031.32	0.95	288	460	103,974

Tomada de FAARFIELD, 2023.

Figura 62

Sección previa del pavimento flexible



Nota: Se han colocado los espesores de cada capa cumpliendo los valores mínimos según la Tabla 11. Tomada de FAARFIELD, 2022.

4.3.2. Cálculo del espesor de pista de aterrizaje

Una vez colocados los datos de entrada se realizó el diseño ejecutando el programa de manera iterativa hasta lograr un diseño acorde a nuestras expectativas, se generaron diversas opciones las cuales se muestran en la Tabla 34. De las opciones de diseño se pudo observar que al incrementar el espesor de la capa de rodadura de se reducen los espesores de la base y subbase, sin embargo, con esto también se incrementan los costos (opciones antieconómicas).

Tabla 34

Opciones de diseño de pavimento flexible para la pista de aterrizaje

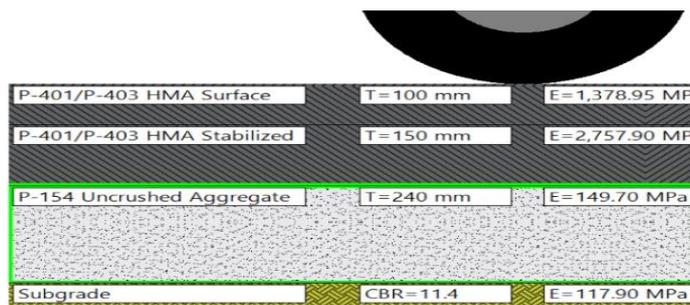
Opción	1	2	3	4
Capa de rodadura	10.0 cm	10.0 cm	10.0 cm	15.0 cm
Base	12.5 cm	15.0 cm	20.0 cm	15.0 cm
Subbase	30.8 cm	24.0 cm	15.2 cm	16.4 cm
Total	53.3 cm	49.0 cm	45.2 cm	46.4 cm

Nota: Se muestra las opciones de diseño de pavimento flexible de la pista de aterrizaje.

De lo anterior y adoptando el criterio de utilizar capas de pavimento con espesores múltiples de 5 cm para mayor compatibilidad con el proceso constructivo se consideró adecuado proponer una capa de rodadura de 10 cm, una base consistente de 15 cm, y una subbase de 24.0 cm (opción 2).

Figura 63

Espesores obtenidos de pavimento flexible para pista de aterrizaje



Nota: Se muestra los espesores del pavimento flexible obtenidos. Tomada de FAARFIELD.

Tabla 35

Espesores de pavimento flexible para la pista de aterrizaje

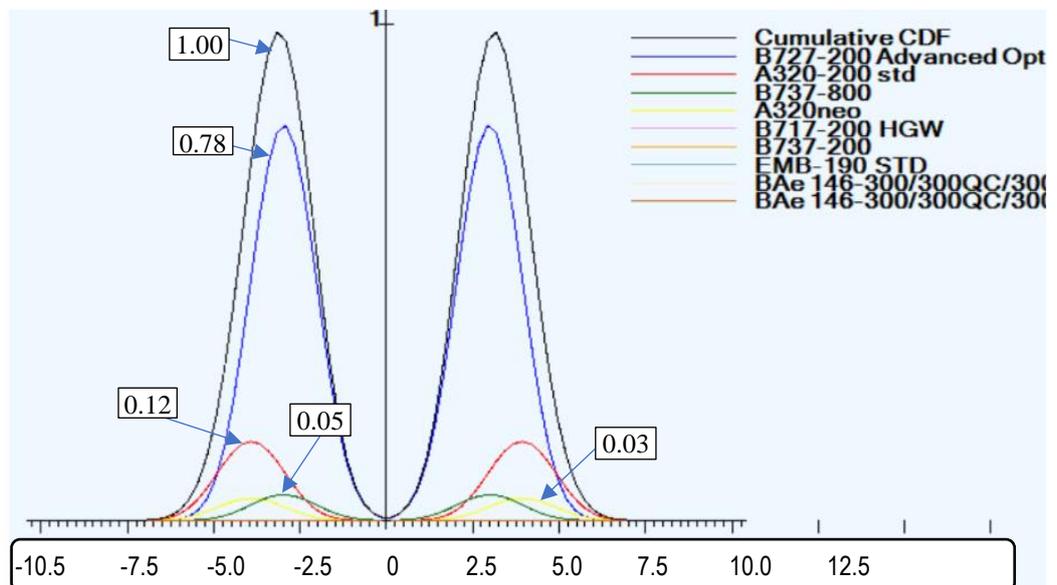
Capa	Espesor (cm)	Total (cm)
P-401: Mezcla asfáltica en caliente (HMA)	10.0	
P-403: Capa base estabilizada con asfalto	15.0	49.0
P-154: Capa subbase de agregado sin triturar	24.0	

Nota: Se muestran los espesores finales obtenidos con el método de la FAA.

El facto de daño acumulativo (CDF) entendiendo este como cantidad de vida estructural que el pavimento que ha agotado, correspondiente para el pavimento flexible de la pista de aterrizaje se muestra en la Figura 64, para la elaboración de dicha gráfica, FAARFIELD tiene en cuenta la distancia lateral de las ruedas al eje de la pista, el peso y el número de salidas anuales de cada aeronave.

Figura 64

Factor de daño acumulativo del mix de aeronaves en pavimento flexible



Nota: Se muestra el factor de daño acumulativo del mix de aeronaves. Donde cada color hace referencia al daño producido por cada aeronave distinta. Adaptada de FAARFIELD, 2023.



De lo anterior podemos observar que la contribución más alta de 0,78 la produce el B727-200 (con CDF máximo es 0.80), A320-200 contribuye con 0.12 (con CDF máximo es 0.16), B737-800 contribuye con 0.05 (con CDF máximo es 0.05), la aeronave A320Neo contribuye con 0.03 (con CDF máximo es 0.04) y las aeronaves B717-200, B737-200, EMB-190, BAE 146-200 y BAE 146-300 contribuyen con 0.004 cada una. Además, la sumatoria de todos los daños individuales de cada aeronave nos da como resultado un CDF de 1.

a) Cálculo del espesor del margen de la pista de aterrizaje

El margen de pista debe diseñarse considerando un total de 15 pasadas de la aeronave más exigente, por lo que se creó un nuevo archivo con los mismos materiales y luego se ingresó cada aeronave con 1 salida anual para un periodo de vida de 15 años, dando como resultado que el margen de pista presenta 31.2 cm de espesor total conformado por 10 cm de superficie de rodadura (P-401), 10 cm de base estabilizada (P-403) y 11.2 cm de capa subbase (P-154).

4.3.3. Chequeo del diseño por el método racional

Para optimizar y verificar que en el diseño realizado no se produzca ni falla por fatiga o falla en la subrasante, tal como lo propone Quintero (2011), debemos realizar los chequeos respectivos.

4.3.4. Cálculo de las deformaciones admisibles en pavimento flexible

A partir de la investigación de Quintero (2011), se determinarán los esfuerzos y deformaciones los cuales son afectados por parámetros como el tránsito en el período de diseño, riesgo de daño, características de resistencia a la fatiga de los materiales, etc.



a) Determinación del número de pasadas

$$\text{Numero de pasadas} = \frac{\text{Decolajes anuales} * \text{vida util}}{\text{Factor de conversion}}$$

$$\text{Numero de pasadas} = \frac{3165 * 20}{3.48}$$

$$\text{Numero de pasadas} = 18190 \text{ pasadas}$$

De forma análoga se determinará el número de pasadas totales para cada una de las aeronaves que interviene en el diseño. Los resultados de ello se muestran a continuación:

Tabla 36

Conversión de operaciones a pasadas en el mix de aeronaves

Aeronave	Decolajes anuales esper.	Tren	Factor de relación operaciones a pasadas	Numero de pasadas
A320	3165	Rueda doble	3.48	18190
A320N	737	Rueda doble	3.48	4236
B 717	368	Rueda doble	3.48	2115
B 727	368	Rueda doble	3.48	2115
B737-200	368	Rueda doble	3.48	2115
B737-800	368	Rueda doble	3.48	2115
E 190	368	Rueda doble	3.48	2115
BAE 146-	368	Rueda doble	3.48	2115
BAE 146-	368	Rueda doble	3.48	2115

Nota: Se obtiene un total de 37230 pasadas totales a la falla.

b) Deformación admisible por tracción en la capa de rodadura

$$C = \text{Numero de pasadas a la falla} = 37230$$

$$E_A = \text{Modulo de concreto asfaltico} = 200000 \text{ lb/pulg}^2$$

ϵ_{AA} = Deformación horizontal por tracción en la base de la capa asfáltica (admisibile).



$$\text{Log}_{10}(37230) = 2.68 - 5 * \text{Log}_{10}(\epsilon_{AA}) - 2.665 * \text{Log}_{10}(200000)$$

$$\epsilon_{AA} \text{ adm} = 6.257 * 10^{-4}$$

c) Deformación admisible por compresión en la subrasante

Teniendo en cuenta que el número de pasadas C es mayor a 12100, se emplea la Ecuación 11 para el cálculo de la deformación admisible:

$$37230 = \left(\frac{0.002428}{\epsilon_v} \right)^{14.21} \text{ Cuando } C \text{ es } > \text{ a } 12100$$

$$\epsilon_v \text{ adm} = 1.158 * 10^{-3}$$

4.3.5. Cálculo de esfuerzos y deformaciones de servicio

La magnitud de los esfuerzos y deformaciones de servicio se obtienen mediante la modelación de la estructura y análisis de mecánica de pavimentos. Como lo señala Vásquez (2021), existen múltiples programas para calcular esfuerzos y deformaciones en pavimentos tales como: Kenpave, Julea, Erapave, Bisar, Veroad, Multismart 3D, etc.; de los cuales el que se posiciona como uno de los más precisos, a las ves es muy confiable y muy utilizado actualmente para realizar chequeos en pavimentos es el Bisar 3.0, por ello es que se utilizar dicho software para la presente investigación.

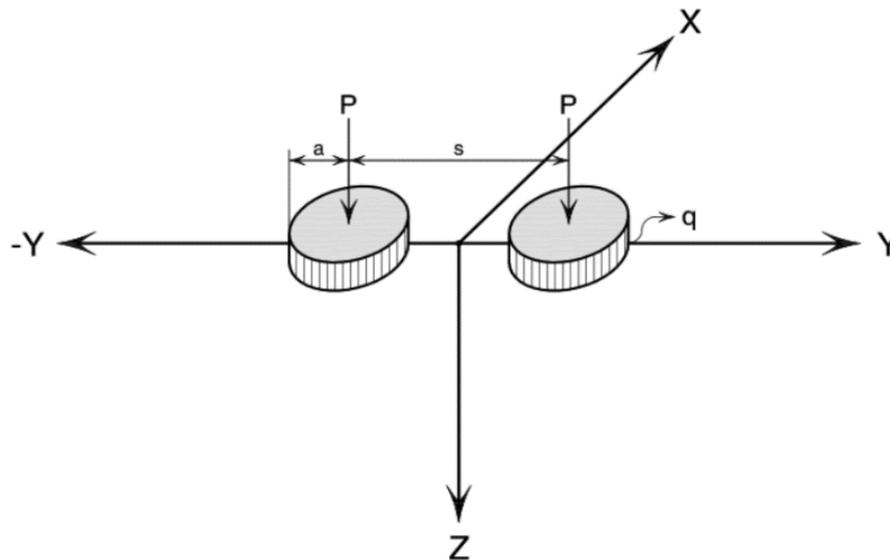
A partir de los espesores determinados en el diseño, y como lo recomienda Quintero (2011), se procedió a modelar la estructura multicapa en el programa BISAR 3.0., el cual utiliza un análisis elástico de capas (LED) definido por las siguientes consideraciones básicas:

- El sistema consiste de capas horizontales de espesor uniforme apoyadas sobre una base semi-infinita.
- Las capas son infinitas en dirección horizontal.

- El material de cada capa es homogéneo, isotrópico y elástico

Figura 65

Sistema de coordenadas de posición de las cargas en BISAR 3.0



Nota: Se muestra la posición de las cargas consideradas en el análisis elástico de capas. Tomada de Manual práctico BISAR 3.0, por E. Rincón, Universidad pedagógica y tecnología de Colombia, 2017.

El sistema es cargado en la parte superior de la estructura por carga con esfuerzo uniforme distribuido sobre el área circular como se muestra en la Figura 66.

Dichas condiciones se adaptan muy bien a los parámetros que estamos analizando el cual se puede entender como una carga uniformemente distribuida sobre un área circular, el cual trasfiere la energía y la disipa a través de un conjunto de capas elásticas que son precisamente la estructura del pavimento. Los datos para el modelado de la estructura de pavimento son:

- Aeronave de diseño: Boeing 727, con un peso máximo estructural de despegue (MTOW) de 95028 kg.
- Carga por rueda: 22629 kg.

- Capa de rodadura con $E=1378.95$ MPa y $\mu=0.35$.
- Capa base con $E=2757.90$ MPa y $\mu=0.35$.
- Capa subbase con $E=171.51$ MPa y $\mu=0.35$.
- Subrasante con $E=117.87$ Mpa y $\mu=0.35$.

Tabla 37

Datos de entrada para el cálculo de esfuerzos y deformaciones

Estructura	Pista de aterrizaje
Espesor de capa de rodadura (cm)	10.0
Espesor de base (cm)	15.0
Espesor de subbase (cm)	24.0
Presión de contacto en la superficie, p (kPa)	1402.4
Radio del área cargada, r (cm)	22.46
Separación entre ruedas (cm)	86.4

Nota: Se muestran los datos de entrada para la determinación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en el pavimento.

Figura 66

Ingreso de datos en BISAR 3.0

System Description:

Use Standard Dual Wheel?

Save Retrieve

Mode of Load: 3 - Stress and Radius

No of Circular Loads (1-10): 2

Load Number	Vertical Stress (kPa)	Radius (m)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Stress (kPa)	Shear Direction (degr.)
1	1402.400	0.2246	0.0000	0.4320	0.000	0.0
2	1402.400	0.2246	0.0000	-0.4320	0.000	0.0

Tomada de software BISAR 3.0.

Figura 67

Ingreso de datos en BISAR 3.0 (continuación)

The figure consists of two screenshots of the BISAR 3.0 software interface, showing the 'Layers' and 'Positions' tabs.

Top Screenshot (Layers Tab):

- System Description: [Empty text box]
- Full Friction Between Layers?
- Buttons: Save, Retrieve
- No of Layers (1-10): 4
- Table:

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0,100	1,38E+03	0,35
2	0,150	2,76E+03	0,35
3	0,240	1,72E+02	0,35
4		1,18E+02	0,35

Bottom Screenshot (Positions Tab):

- System Description: [Empty text box]
- Buttons: Save, Retrieve
- Select Positions for Standard Dual Wheel
- No of Position Entries (1-10): 6
- Table:

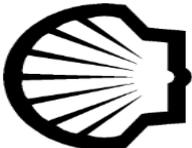
Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No	Action
1	0,0000	0,0000	0,1000	1	Select Layer
2	0,0000	0,4320	0,1000	1	Select Layer
3	0,0000	0,0000	0,2500	2	Select Layer
4	0,0000	0,4320	0,2500	2	Select Layer
5	0,0000	0,0000	0,4900	3	Select Layer
6	0,0000	0,4320	0,4900	3	Select Layer

Tomada de software BISAR 3.0.

Luego de haber modelado la estructura se obtiene el reporte de salida mostrado en la Figuras 68, en el cual se pueden observar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones de servicio del pavimento flexible.

Figura 68

Hoja de reporte BISAR 3.0

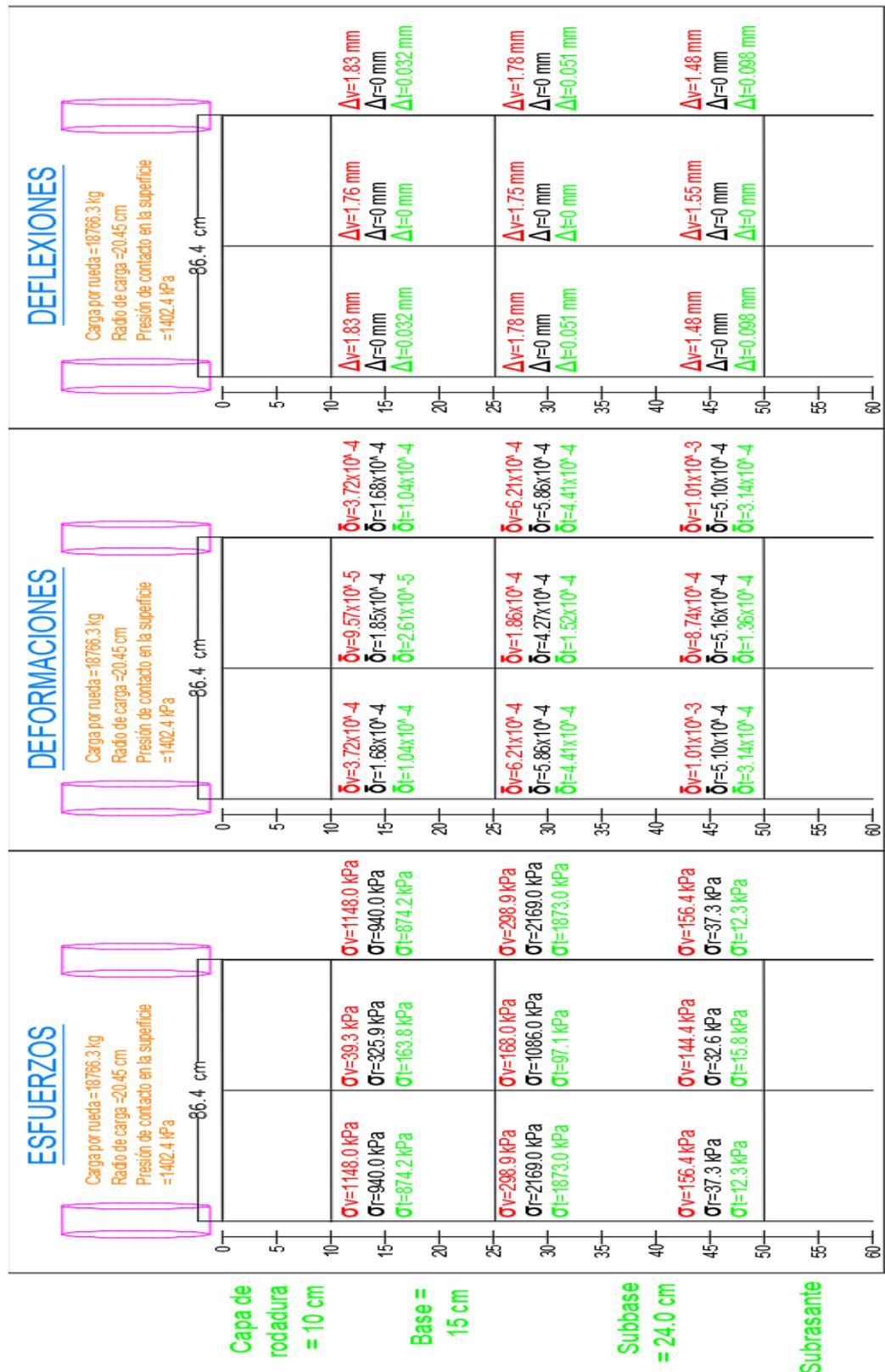
BISAR 3.0 - Block Report												
FLEXIBLE U CTE mod2												
System 1: (untitled)												
												
Loads												
Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,100	1,380E+03	0,35	1	2,222E+02	1,402E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,240E-01	0,000E+00	4,320E-01	0,000E+00
2	0,150	2,760E+03	0,35	2	2,222E+02	1,402E+00	0,000E+00	0,000E+00	2,240E-01	0,000E+00	-4,320E-01	0,000E+00
3	0,240	1,720E+02	0,35									
4		1,180E+02	0,35									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses (MPa)			Strains (µstrain)			Displacements (µm)		
					XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,500E-01	-3,914E-01	-1,638E-01	-3,932E-02	-1,846E+02	-2,609E+01	9,572E+01	0,000E+00	0,000E+00	1,760E+03
2	1	0,000E+00	4,320E-01	1,500E-01	-1,023E-00	-8,742E-01	-1,148E+00	-1,682E+02	-1,038E+02	-3,720E+02	0,000E+00	-3,178E+01	1,834E+03
3	2	0,000E+00	0,000E+00	3,000E-01	1,306E+00	-9,706E-02	-1,680E-01	4,269E+02	-1,515E+02	-1,862E+02	0,000E+00	0,000E+00	1,753E+03
4	2	0,000E+00	4,320E-01	3,000E-01	2,416E+00	1,873E+00	-2,989E-01	5,863E+02	4,414E+02	-6,208E+02	0,000E+00	5,109E+01	1,784E+03
5	3	0,000E+00	0,000E+00	4,900E-01	3,859E-02	-1,576E-02	-1,444E-01	5,156E+02	1,357E+02	-8,737E+02	0,000E+00	0,000E+00	1,552E+03
6	3	0,000E+00	4,320E-01	4,900E-01	4,316E-02	1,232E-02	-1,564E-01	5,097E+02	3,141E+02	-1,010E+03	0,000E+00	9,753E+01	1,484E+03

Tomada de Bisar 3.0, 2023.

Figura 69

Esfuerzos, deformaciones y deflexiones en el pavimento



Nota: Se muestran los valores de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en las capas del pavimento flexible

Tabla 38*Comparación de valores de deformación con parámetros admisibles*

Parámetro de revisión	Valor calc. (Vc)	Valor adm. (Va)	Relación % (Vc/Va) *100	Cumple Parám.
Deformación por tracción en la parte inferior de la capa de rodadura.	$1.846 * 10^{-4}$	$6.257 * 10^{-4}$	29.50 %	Si
Deformación por compresión en la parte superior de la subrasante.	$8.737 * 10^{-4}$	$1.158 * 10^{-3}$	75.19 %	Si

Nota: Se muestran el chequeo de deformaciones admisibles,

El consumo por efecto del daño de las aeronaves considerando los valores admisibles obtenidos alcanza un valor máximo del 75.19 % y podría alcanzar hasta el 78% u 80%, valores que son aceptables pues no se alcanza el valor limite y con ello afirmamos que el pavimento cumplirá su periodo de vida útil de 20 años.

4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS OACI Y FAA

Tabla 39

Comparación de los métodos de diseño de pavimento flexible

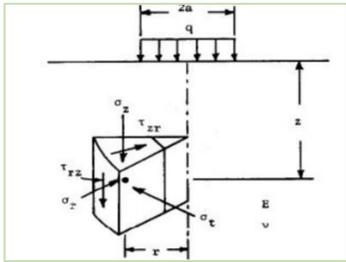
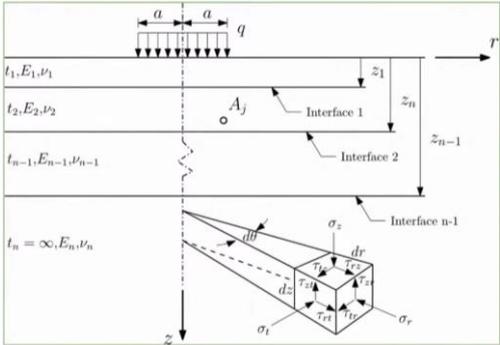
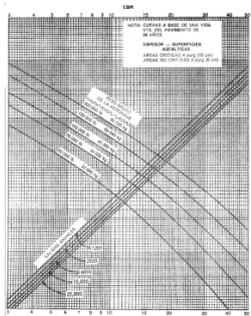
Característica	Método de la OACI	Método de capas elásticas de la FAA
Planteamiento	<p>Diseño netamente empírico</p> <p>Basado en resultados de pruebas a gran escala donde se estudió el comportamiento del pavimento ante las cargas producidas de las ruedas de las aeronaves.</p>	<p>Diseño mecánico – empírico</p> <p>Mecánico (método de capas elásticas) para determinar la respuesta estructural del pavimento y empírico para convertir dicha respuesta en daño o deterioro del pavimento.</p>
Modelo matemático	<p>Teoría de Boussinesq:</p> <p>Se extiende a una sola capa uniforme (homogénea e isotrópica). Emplea la teoría de distribución de tensiones de Boussinesq en un semiespacio homogéneo, complementadas con extensas pruebas de campo y la experiencia de pavimentos de aeropuertos en servicio.</p> 	<p>Sistema elástico multicapa:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sistema de capas homogéneas, isotrópicas y elásticas con propiedades definidas por E y ν. 2. Las capas se ven afectadas por esfuerzos, deformaciones y deflexiones tanto verticales como horizontales. 3. Todas las capas son de espesor uniforme e infinitas en dirección horizontal. 4. Existe continuidad de respuestas estructurales en las interfaces de las capas. 
Modelo de tráfico	<p>Todo el tráfico debe ser convertido a salidas anuales equivalentes de una sola aeronave de diseño.</p>	<p>Considera todas las aeronaves de diseño, cada una con su peso bruto máximo de despegue (MTOW), tráfico inicial y su tasa de crecimiento</p>
Carga de diseño	<p>Considera la carga equivalente de una sola rueda (ESWL) de la aeronave de diseño. Se asume que el 95% del peso bruto se aplica en el tren principal y el 5% en el tren de proa. Se considera una carga circular uniformemente distribuida.</p>	<p>Considera importante la configuración del tren de aterrizaje de las aeronaves, además se asume que el 95% del peso máximo bruto se aplica en el tren de aterrizaje principal y el 5% en el tren de proa. La carga es uniformemente distribuida sobre un área circular.</p>

Tabla 40

Comparación de los métodos de diseño de pavimento flexible (continuación)

Característica	Método de la OACI	Método de capas elásticas de la FAA
Respuesta estructural	Los esfuerzos, deflexiones y deformaciones son causadas por la carga equivalente de una sola rueda (ESWL). Está basado pruebas a gran escala y en observaciones de pavimentos en servicio.	Análisis elástico de capas (LED), se producen esfuerzos, deflexiones y deformaciones verticales y horizontales en todas las capas del pavimento, estos son calculados mecánicamente por LEAF.
Modo de falla	Se basa en 1 pulg de levantamiento (falla por corte en la subrasante) fuera de la ruta del tráfico o agrietamiento significativo (el agrietamiento en la capa HMA ha ocurrido hasta tal punto que el pavimento ya no es impermeable).	Falla por fatiga en términos de un factor de daño acumulativo (CDF), en donde cada aeronave ocasiona un daño al pavimento que se acumula con un modelo de daño lineal (regla de Miner). Existen 2 puntos críticos: deformación por tracción en la parte inferior de la capa de rodadura y la deformación por comprensión en la parte superior de la subrasante.
Diseño del espesor	Calcula el espesor requerido de las capas del pavimento para una vida útil de 20 años usando gráficos de aproximación con curvas de diseño.	Su utiliza el software informático FAARFIELD, en el cual se realiza un proceso iterativo, donde el espesor de las capas se define en función de la CDF y la vida útil del diseño.
Pasos básicos del diseño	<ol style="list-style-type: none"> Determinar la aeronave de diseño y sus salidas anuales equivalentes. Calcular el espesor total del pavimento (estructura estándar). y hacer el chequeo del espesor mínimo de la capa base. Realizar la conversión de espesores para capas de diferente calidad a P-209 de base y P-154 de subbase. 	<ol style="list-style-type: none"> Estimar el volumen de tráfico esperado inicial y la tasa de crecimiento. Realizar la selección de los materiales de todas las capas del pavimento. Calcular los espesores de las capas de mediante un proceso iterativo y haciendo uso del software FAARFIELD.
Resultados del cálculo de espesores del pavimento	Pista de aterrizaje: 10.00 cm de mezcla asfáltica en caliente (P-401), 21.77 cm de base estabilizada (P-403), y 20.32 cm de subbase granular (P-154).	Pista de aterrizaje: 10.00 cm de mezcla asfáltica en caliente (P-401), 15.00 cm de base estabilizada (P-403), y 24.0 cm de subbase granular (P-154).





4.4.1. Discusión de resultados

Luego de la aplicación de los 2 métodos de diseño estructural de pavimentos se observan algunas deficiencias en el método de la OACI tales como:

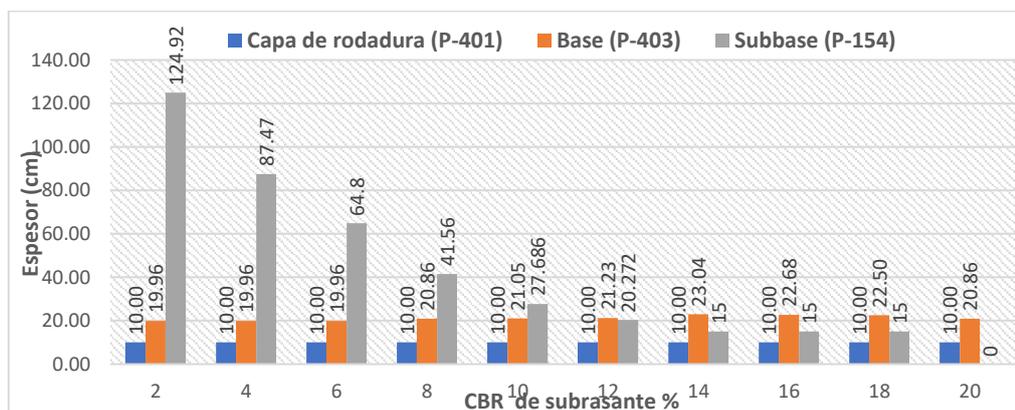
- Inicialmente emplea un modelo matemático basado en la teoría de Boussinesq, el cual simplifica bastante los análisis, a tal punto de asemejar el comportamiento del pavimento al de un suelo y aunque fue complementado con extensas pruebas a gran escala; ello no quita el hecho de que se partió de una suposición muy simplificada, lo cual hoy en día sabemos que no es lo más adecuado.
- La carga sobre la estructura no puede representarse adecuadamente mediante la carga equivalente de una sola rueda (ESWL), ya que no tiene en cuenta el efecto conjunto de 2 o más ruedas cercanas.
- Solo considera fallas superficiales como hundimientos o deformaciones en la superficie del pavimento no pudiéndose conocer lo que realmente ocurre en cada capa de pavimento.
- Se hace una suposición sobre el modo de falla del pavimento y no se evalúa el daño sufrido en cada una de las capas en la estructura del pavimento.
- No permite capas de rodadura de más de 4 pulg o 10 cm, limitándose es esta manera los diseños a mejoras en el futuro.
- Se basa en el uso de “coeficientes equivalentes” asignados a cada material para considerar su rigidez. Los nuevos materiales no están muy bien caracterizados, lo cual no permite la precisión necesaria para este tipo de obras.

Sin embargo, el método de la OACI sigue siendo muy utilizado en varios muchos del mundo, esto es debido a que es considerado un método muy confiable para el diseño de pavimentos flexibles de aeropuertos, ello sustentado por el amplio periodo de pruebas y ensayos en los cuales está basado; y además respaldado por todos los países miembros de la OACI.

Por otro lado, el método de capas elásticas (LED) de la FAA, surgido recientemente y utilizando el avance de la tecnología moderna se acerca más a la realidad pues combina un procedimiento mecánico con características medibles para determinar la respuesta estructural del pavimento y conservando el procedimiento empírico para convertir esta respuesta estructural en daño o deterioro en el pavimento flexible, además considera configuraciones de tren de aterrizaje más complejas y con mayor peso bruto, lo que la hace más susceptible a mejoras a futuro; utiliza 2 criterios críticos de falla, uno en la capa de rodadura y otros en la subrasante, haciendo del método mucho más completo y abierto a mejoras en el futuro para optimizar mejor los diseños. A continuación, se presentan los espesores obtenidos utilizando el método de la OACI y de la FAA variando el CBR de la subrasante.

Figura 70

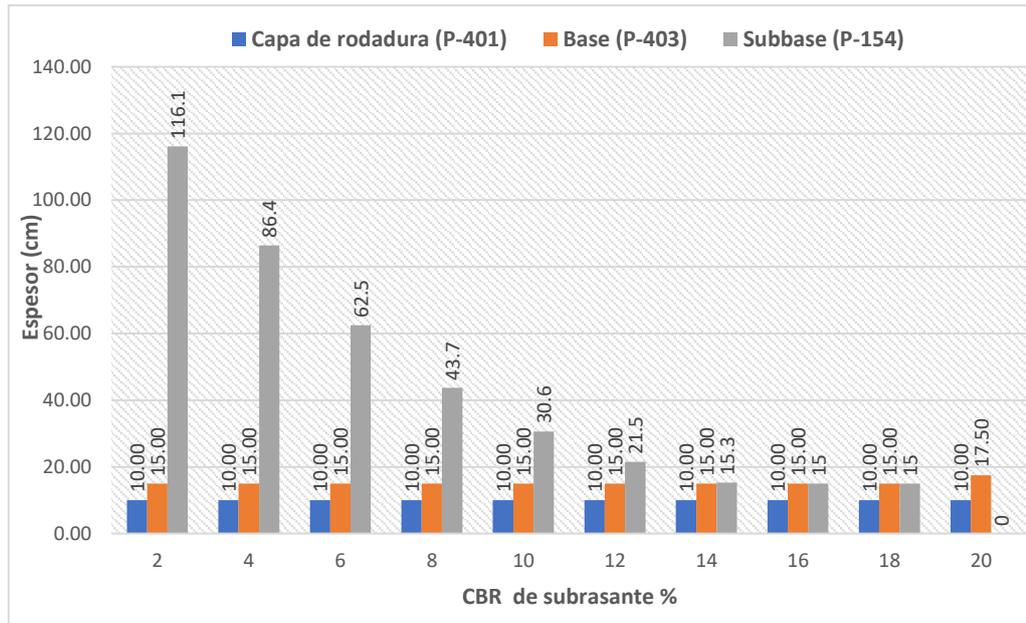
Espesores obtenidos por el método de la OACI



De los resultados del diseño con el método de la OACI y considerando una superficie de rodadura de 10 cm, se obtienen espesores promedio de base de 20 cm espesores variables de base.

Figura 71

Espesores obtenidos por el método de capas elásticas – FAARFIELD



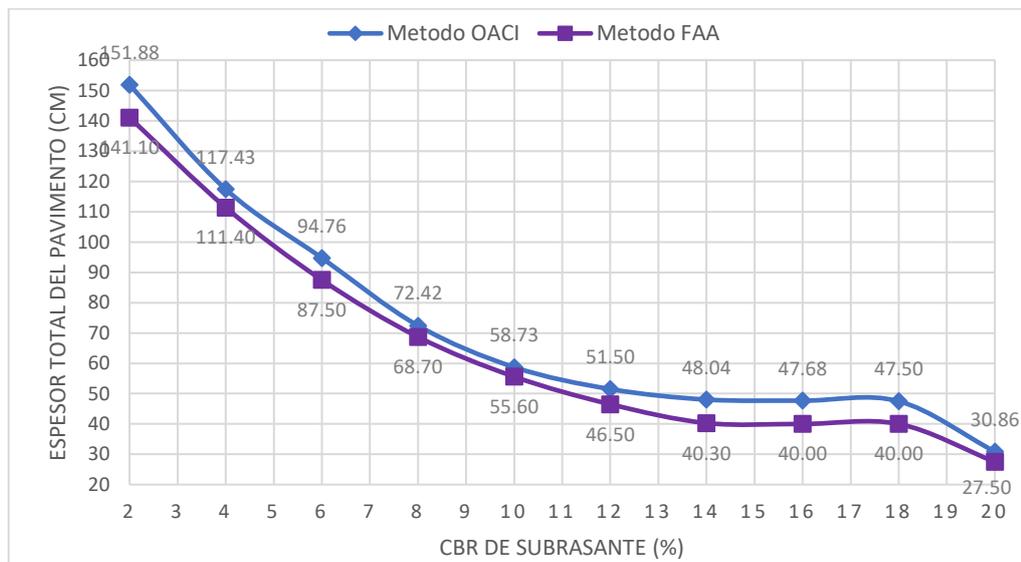
De los resultados del diseño con el método de capas elásticas y haciendo uso del software FAARFIELD se observó que el espesor mínimo de la superficie de rodadura es 10 cm y no se aceptan menores valores, esto se explica por los altos valores de carga aplicados sobre el pavimento. Este método permite fijar el espesor de la base, siendo el espesor de la subbase la única variable por conocer.

Esta investigación coincide con lo señalado por Blanco (2022), el diseño del espesor del pavimento no predice su falla, sino que, determina una combinación razonablemente económica de capas y espesores de materiales que reducen la probabilidad de que el pavimento alcance una condición de falla a un nivel aceptablemente bajo. También conocido con Heymsfield (2021), en el

sentido de que es el método de capas elásticas LED, para idealizar y analizar un pavimento flexible es muy adecuado y preciso, al mismo tiempo el método de elementos finitos FEM, es muy adecuado para su uso en el análisis de pavimentos rígidos.

Figura 72

Comparación de los métodos de diseño de pavimento flexible



De los resultados del diseño por ambos métodos, se puede observar que, y en concordancia con lo afirmado por Roel (2018), al comparar los espesores totales se obtienen menores valores al utilizar el método de capas elásticas, esto se debe a que la implementación de la nueva metodología de diseño de capas elásticas de la FAA, se busca optimizar las secciones de pavimento y con ello también reducir los costos, por lo tanto, basándonos en el aspecto económico se eligió como la mejor opción los resultados obtenidos por el método desarrollado por la FAA.

Este estudio respalda con la afirmación de Torres (2014) de que los espesores obtenidos con el uso de los nomogramas de diseño o con el programa FAARFIELD tienen una leve variación entre el 2 y 6 %.

Como Quintero (2011) ha señalado, esta investigación también encontró que el método racional utilizado para el chequeo de espesores del de pavimento flexible representa un método práctico y con buenas aplicaciones que facilita el estudio de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la estructural del mismo.

4.5. SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Un análisis de sensibilidad es una herramienta poderosa para aclarar, verificar, comprender cuantitativamente y comparar las especificaciones del diseño de pavimentos aeroportuarios. Según la FAA (2004) la sensibilidad de la vida del pavimento, L , a cualquier variable x es:

$$S_{x,L} = \frac{\partial L}{\partial x} \frac{x}{L}$$

La ecuación anterior se utiliza para el análisis de sensibilidad del pavimento tanto HMA como PCC. El análisis numérico se hace necesario para calcular la sensibilidad de x . Se debe utilizar la siguiente ecuación establecida por la FAA (2004):

$$S_{x,L} = \frac{\partial L}{\partial x} \frac{x}{L} \cong \frac{L[x + \Delta x] - L[x - \Delta x]}{2\Delta x} \frac{x}{L[x]}$$

Donde: x es el valor de la variable, Δx es una cantidad muy pequeña que es significativamente más pequeña que el valor de x , $L[x + \Delta x]$, $L[x]$ y $L[x - \Delta x]$ son los valores de L en $x = x + \Delta x$, x y $x = x - \Delta x$, respectivamente.

Un valor positivo de $S_{x,L}$ indica que la vida del pavimento aumenta cuando x aumenta, y un valor negativo indica que la vida del pavimento disminuye cuando x aumenta. Una gran magnitud de $S_{x,L}$ indica que x es sensible a L , no importa si es positivo o negativo. A continuación, y en base a la mejor opción de diseño elegida, se realizará el análisis de sensibilidad de la vida útil del pavimento al módulo de HMA, al espesor de la

capa de HMA, al espesor de base, al espesor de subbase y al peso de la aeronave crítica de diseño.

Tabla 41

Resultados del análisis de sensibilidad

CBR	x	Δx	$x + \Delta x$	$x - \Delta x$	$L[x]$	$L[x + \Delta x]$	$L[x - \Delta x]$	$S_{x,L}$
Sensibilidad al módulo HMA (ksi)								
2	200	20	220	180	20	23.0	16.9	1.525
4	200	20	220	180	20	23.6	16.4	1.800
6	200	20	220	180	20	24.1	16.2	1.975
8	200	20	220	180	20	25.0	15.6	2.350
10	200	20	220	180	20	25.3	15.6	2.425
12	200	20	220	180	20	25.9	15.3	2.650
14	200	20	220	180	20	26.4	15.1	2.825
Sensibilidad al espesor de la capa de HMA (cm)								
2	10	1	11	9	20	27.1	14.7	3.100
4	10	1	11	9	20	23.6	13.7	2.475
6	10	1	11	9	20	30.6	13.1	4.375
8	10	1	11	9	20	33.6	12.0	5.400
10	10	1	11	9	20	34.7	11.5	5.800
12	10	1	11	9	20	37.2	11.0	6.550
14	10	1	11	9	20	40.1	10.6	7.375
Sensibilidad al espesor de base (cm)								
2	15	1.5	16.5	13.5	20	34.9	11.6	5.825
4	15	1.5	16.5	13.5	20	39.4	10.4	7.250
6	15	1.5	16.5	13.5	20	42.2	9.6	8.150
8	15	1.5	16.5	13.5	20	50.8	8.2	10.650
10	15	1.5	16.5	13.5	20	54.6	7.4	11.800
12	15	1.5	16.5	13.5	20	63.5	6.8	14.175
14	15	1.5	16.5	13.5	20	70.1	6.2	15.975
Sensibilidad al espesor de subbase (cm)								
2	116.0	11.60	127.6	104.4	20	224.6	2.7	35.475
4	79.1	7.91	87.01	71.19	20	100.4	5.0	23.850
6	54.3	5.43	59.73	48.87	20	53.4	7.8	11.400
8	37.1	3.71	40.81	33.39	20	44.8	9.4	8.850
10	25.5	2.55	28.05	22.95	20	36.3	11.0	6.325
12	18.3	1.83	20.13	16.47	20	34.0	12.0	5.500
14	15.2	1.52	16.72	13.68	20	31.8	13.1	4.675

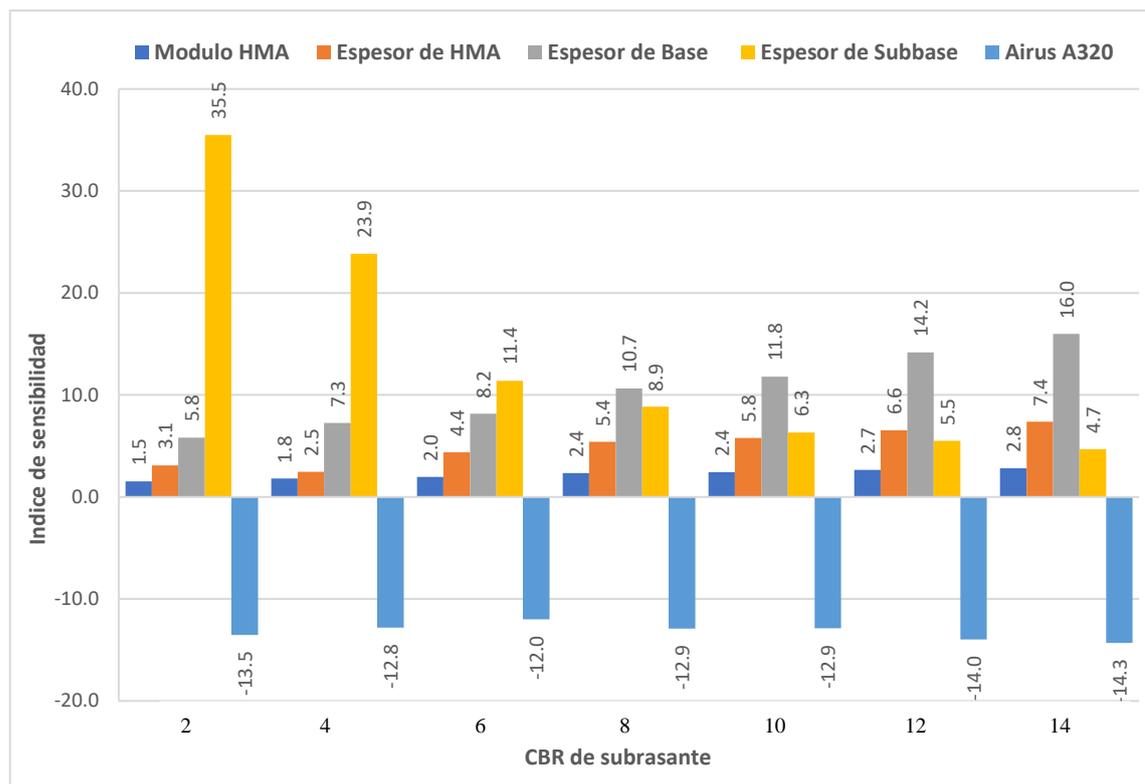
Tabla 42

Resultados del análisis de sensibilidad (continuación)

CBR	x	Δx	$x + \Delta x$	$x - \Delta x$	$L[x]$	$L[x + \Delta x]$	$L[x - \Delta x]$	$S_{x,L}$
Sensibilidad al peso bruto de la aeronave crítica Boeing 727-200								
2	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.5	47.6	-13.525
4	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.6	44.8	-12.800
6	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.8	41.8	-12.000
8	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.7	45.3	-12.900
10	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.9	45.4	-12.875
12	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.9	49.8	-13.975
14	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	6.0	51.2	-14.300

Figura 73

Sensibilidad de la vida útil del pavimento variando el CBR



De todos los parámetros estudiados en el análisis de sensibilidad, como se muestra en la Figura 73, el módulo HMA tuvo la sensibilidad más baja, es decir es la variable que menos influencia tiene en la vida útil de un pavimento flexible. La sensibilidad al módulo HMA aumenta con el aumento de la resistencia de la subrasante (CBR).



La sensibilidad del espesor de HMA a la vida útil del pavimento es más alta que la sensibilidad del módulo de HMA, pero comparativamente más baja cuando se compara con otros parámetros de análisis. Para los pavimentos en subrasante de alta resistencia, la sensibilidad de la vida útil del pavimento al espesor de HMA fue mayor en comparación con la subrasante de baja resistencia.

La vida útil del pavimento es más sensible al espesor de la base en comparación con el módulo de HMA y el espesor HMA. La sensibilidad se incrementa con el aumento del CBR de subrasante. La sensibilidad es mayor para subrasantes de alta resistencia en comparación con subrasantes de resistencia media y baja.

La vida útil del pavimento es más sensible al espesor de la subbase, en comparación con el espesor de base, el módulo HMA y el espesor HMA, con valores de CBR bajos menores al 6%. La sensibilidad se reduce con el aumento del CBR de subrasante. La sensibilidad es mayor para subrasantes de baja resistencia en comparación con subrasantes de resistencia media y alta.

Para el análisis de sensibilidad del tráfico, se consideró la aeronave crítica de diseño Boeing 727 (peso bruto 95028 kg). Además, dado que la sensibilidad es negativa, significa que la vida útil del pavimento se reduce con el aumento del peso bruto de la aeronave.

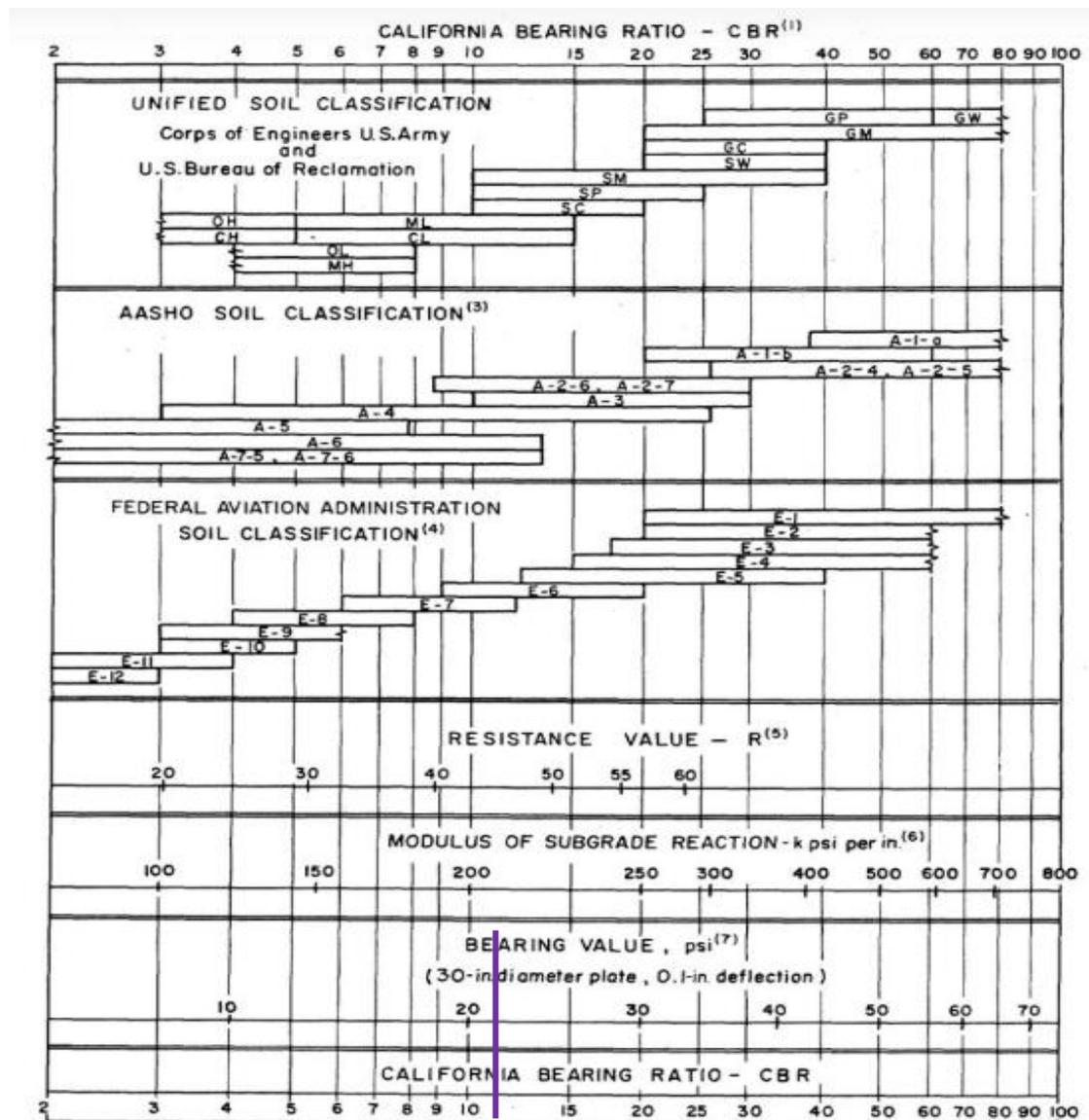
Por lo tanto, coincido con Barragán (2015), en que el peso bruto de la aeronave es la variable que tiene mayor influencia en la vida útil del pavimento, es decir es el parámetro más sensible al momento de dimensionar las capas de un pavimento flexible de un aeropuerto.

4.6. DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO OACI

Con el valor de CBR obtenido en el estudio de suelos se calculó el valor del módulo de reacción de subrasante (k) utilizando el nomograma presentado por OACI para la determinación de la capacidad de carga del terreno de fundación.

Figura 74

Cálculo del módulo de reacción de subrasante



Adaptada de Manual de diseño de aeródromos (Doc. 9157-AN/901) - Parte 3, OACI.

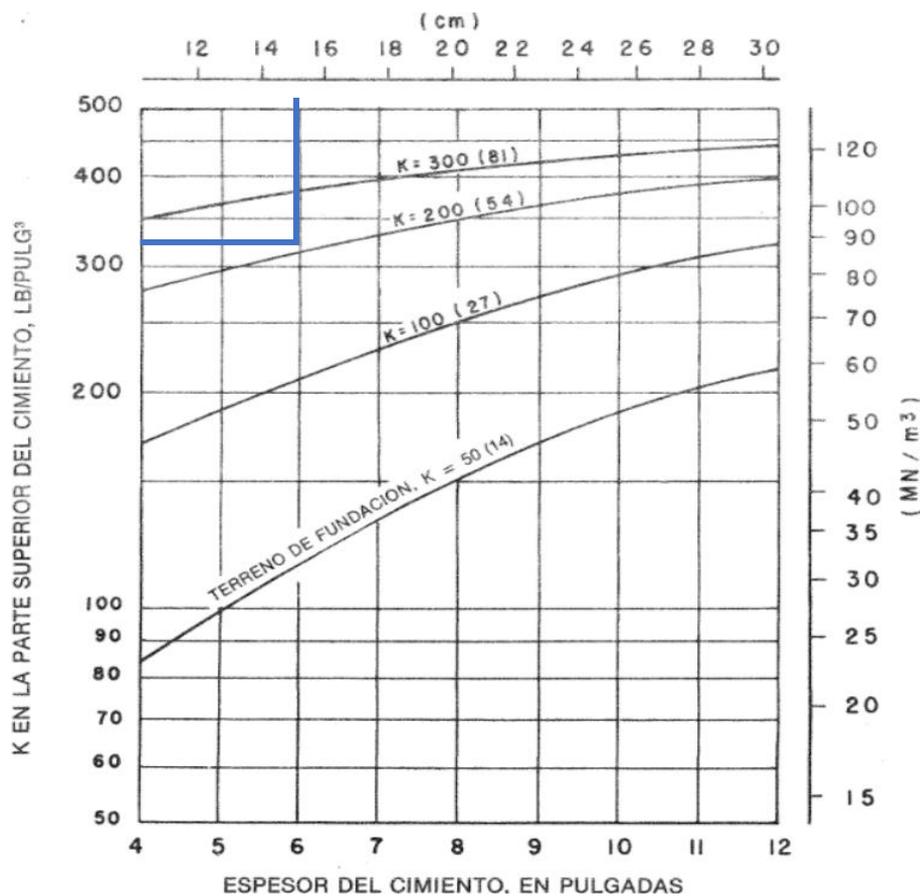
Obtenemos un valor del módulo de reacción de subrasante de 210 pci para la pista de aterrizaje.

4.6.1. Cálculo de espesores de la pista de aterrizaje

Con un módulo de reacción de la subrasante de $k=210 \text{ pci}$ para la pista, para hallar el coeficiente de balasto de la subbase, se introdujo este valor en el nomograma como se muestra en la Figura 75, y considerando la base estabilizada de 15 cm, obtenemos un coeficiente del cemento de $k_{\text{cemento}} = 330 \text{ pci}$.

Figura 75

Cálculo del coeficiente de balasto de subbase estabilizada



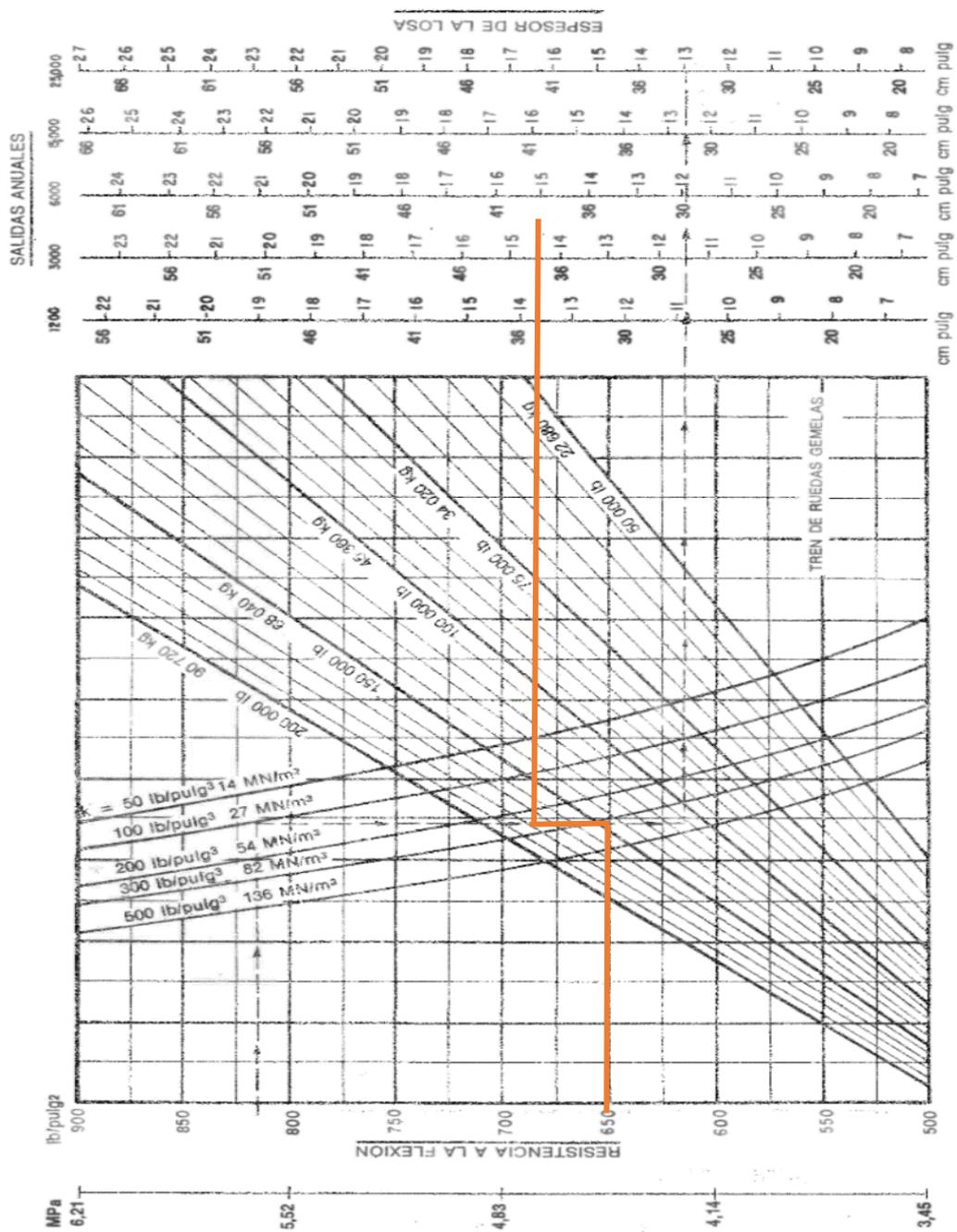
Adaptada de Manual de diseño de aeródromos (Doc. 9157-AN/901) - Parte 3, OACI.

Se calculó el espesor de la losa de concreto utilizando la gráfica tal como se muestra en la Figura 76, para ello se consideró la aeronave de equivalente diseño Airbus A320, con peso bruto de 78000 kg y 5566 salidas anuales equivalentes (determinadas utilizando el mismo procedimiento que para el caso del pavimento flexible y una resistencia a la flexión diseño del concreto de 4.5

MPa o 650 psi. De la Figura 76, mediante interpolación, obtenemos un valor de 39.20 cm de espesor de la losa de concreto. Por lo tanto, el pavimento de la pista estará conformado por: 15 cm de subbase estabilizada (P-403) y 39.20 cm de losa de concreto (P-501).

Figura 76

Cálculo del espesor de losa de concreto para la pista de aterrizaje



Adaptada de Manual de diseño de aeródromos (Doc. 9157-AN/901) - Parte 3, OACI.

Cabe mencionar que a pesar que el espesor mínimo de subbase establecido es 12.5 cm, el criterio fue adoptar una subbase de 15 cm; esto debido a que algunos autores afirman que una subbase de 15 es más consistente para las aeronaves más pesadas, además se logra mayor compatibilidad con el proceso constructivo. En resumen, los espesores obtenidos utilizando el método de diseño basado en las teorías de Westergaard son:

Tabla 43

Resumen del cálculo de espesores obtenidos con el método de Westergaard

Pista de aterrizaje	cm	Total	Pulg.	Total
Esesor de losa (cm)	39.20	54.20 cm	15.43	21.34 pulg
Esesor de subbase (cm)	15.00		5.91	

Nota: Se muestran los espesores finales obtenidos por el método OACI.

4.6.2. Cálculo de esfuerzos y deflexiones en pavimento rígido

Se realizó el cálculo de esfuerzos y deflexiones mediante las soluciones cerradas de Westergaard para 3 puntos críticos: carga en la esquina, en el borde y en el interior de la losa rígida de concreto:

a) Parámetros del análisis de Westergaard

De acuerdo con los análisis de Westergaard la estructura del pavimento está compuesta por una losa simple, apoyada directamente sobre la subrasante líquida winkleriana y soportando una carga de rueda uniformemente distribuida sobre un área de contacto circular. Los parámetros de cálculo corresponden a la combinación de las siguientes características:

- Espesor de la losa: El espesor de losa obtenido es 15.04 pulg para la pista de aterrizaje.



- Módulo de reacción de la subrasante: Se tienen para la pista de aterrizaje $k=210$ pci.
- Módulo elástico del concreto: Se aplicó el valor utilizado en el diseño, que es 4000000 psi para la pista.
- Relación de poisson del concreto: Se utilizó el valor de 0.15 para la estructura, que es el típico utilizado en diseño.
- Aeronave crítica de diseño: Boeing 727, con MTOW = 95028 kg.
- Carga por rueda: Se usará el siguiente valor para todas las estructuras:

$$\frac{95\% * 95028}{4} = \frac{90276.6}{4} = 22569 \text{ kg} = 49756 \text{ lb}$$

- Radio de contacto: Se usará el valor calculado de 22.46 cm = 8.84 pulg.

Se utilizará el sistema de unidades inglés, esto debido a que las ecuaciones cerradas de Westergaard son aplicables en dicho sistema de unidades.

Tabla 44

Datos de entrada para las fórmulas de Westergaard

Datos de entrada, fórmulas de Westergaard	
Espesor de losa, h (pulg)	15.43
Módulo de reacción del terreno, k (lb/pulg ³)	210
Carga equivalente de una rueda (lb)	49756
Radio del área de contacto, a (pulg)	8.84
Modulo elástico del concreto, E (lb/pulg ²)	4.000.000
Relación de poisson de concreto, μ	0.15

NOTA: en la presente tabla se muestran los datos necesarios para el cálculo de esfuerzos y deformaciones con las ecuaciones de Westergaard.

b) Cálculo de esfuerzos y deflexiones

Se realizó el cálculo de esfuerzos y deflexiones con las fórmulas de Westergaard para un área de carga circular en la esquina, en el borde y en el

interior de la losa aplicando los parámetros de entrada de la Tabla 44. Dichos resultados se muestran a continuación:

Tabla 45

Esfuerzos y deflexiones en pavimento rígido - Westergaard

Estructura	Pista de aterrizaje		
	En la esquina	En el borde	En el interior
Esfuerzos (kPa)	2122.302	3693.027	1621.443
Deflexiones (mm)	0.311	0.255	0.222

NOTA: en la presente tabla se muestran los esfuerzos y deflexiones calculados con las ecuaciones de Westergaard.

De los resultados mostrados en la tabla anterior se observa que el esfuerzo máximo ocurre en el borde del pavimento, además, la deflexión máxima ocurre en la esquina de la losa rígida de concreto.

4.7. DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO FAA

Para el diseño del pavimento rígido se han utilizado los criterios establecidos por la FAA en la AC N° 150/5320-6G. Según el estudio de tráfico realizado para el diseño, varias aeronaves superan los 45360 kg de carga de diseño, por lo que será necesario contar con una subbase estabilizada como lo establece el método de la FAA.

Tabla 46

Opción de diseño para pavimento rígido

Materiales a usar en el pavimento rígido (Con subbase estabilizada)
P-501 Concreto de Cemento Portland
P-403 Subbase estabilizada

NOTA: en la presente tabla se muestran los materiales a utilizar según la FAA.

a) Módulo de reacción de subrasante (k)

El módulo de reacción de la subrasante lo determinamos utilizando la siguiente expresión:

$$k = 28.6926 * CBR^{0.7788} (k \text{ en } pci) \quad (6)$$

$$k = 28.6926 * 11.4^{0.7788} (k \text{ en } pci)$$

$$k = 190.93 \text{ pci}$$

Se obtiene un valor del módulo de reacción de 190.9 pci para la pista de aterrizaje.

b) Módulo de elasticidad (E)

El módulo de elasticidad de la subrasante lo determinamos según la FAA utilizando la siguiente expresión:

$$E \text{ (psi)} = 20.15 * k^{1.284} (k \text{ en } pci)$$

$$E \text{ (psi)} = 20.15 * 190.93^{1.284} (k \text{ en } pci)$$

$$E = 17097.57 \text{ pci}$$

Por lo que obtenemos un valor del módulo de elasticidad de subrasante de 17097.57 pci o 117.9 MPa para la pista de aterrizaje.

4.7.1. Procedimiento de diseño en FAARFIELD

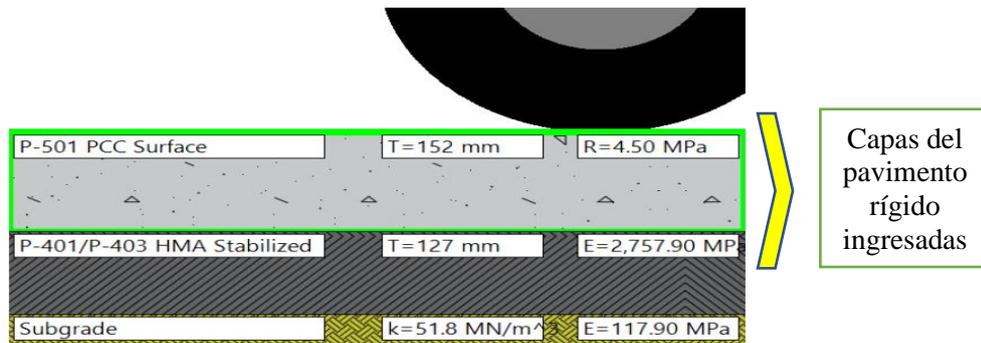
a. Selección del material

- **Losa de concreto:** Se diseñará con el tipo de material de tipo P-501: Concreto de Cemento Portland (PCC). El espesor mínimo es 15 cm. OACI establece un rango de resistencia a la flexión para pavimentos aeroportuarios (4,14 a 5,17 MPa), fuera de este rango deben ser aprobados por OACI. Por lo que para el diseño se utilizará un valor medio de 4.5 MPa.
- **Capa subbase:** Debido a las elevadas cargas impuestas por las ruedas de las aeronaves, se utilizará una subbase estabilizada con asfalto P-403. El espesor mínimo es 12.5 cm.

Para realizar el cálculo del espesor de las capas del pavimento, se realizó un procedimiento similar al empleado para el diseño de pavimento flexible.

Figura 77

Sección previa del pavimento rígido



Tomada de FAARFIELD, 2023

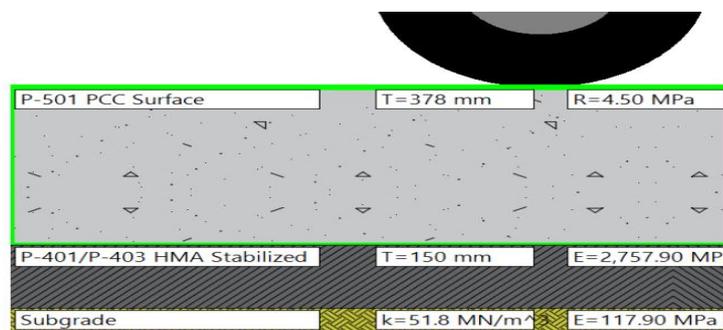
4.7.2. Cálculo del espesor de la pista de aterrizaje

En este caso, el espesor de la capa a ser ajustada será la placa de concreto, el programa ajustará esta capa de diseño hasta que el valor del daño acumulativo CDF llegue a 1.0. y falle la estructura.

Se realiza el diseño de la pista considerando el valor del CBR calculado en el estudio de suelos de 11.4 %.

Figura 78

Espesores obtenidos del pavimento rígido para pista de aterrizaje



Nota: Se muestra los espesores obtenidos de las capas del pavimento. Tomada de FAARFIELD, 2022

El pavimento rígido para la pista de aterrizaje con subbase estabilizada presentará un espesor total de 51.1 cm y estará formada por las siguientes capas:

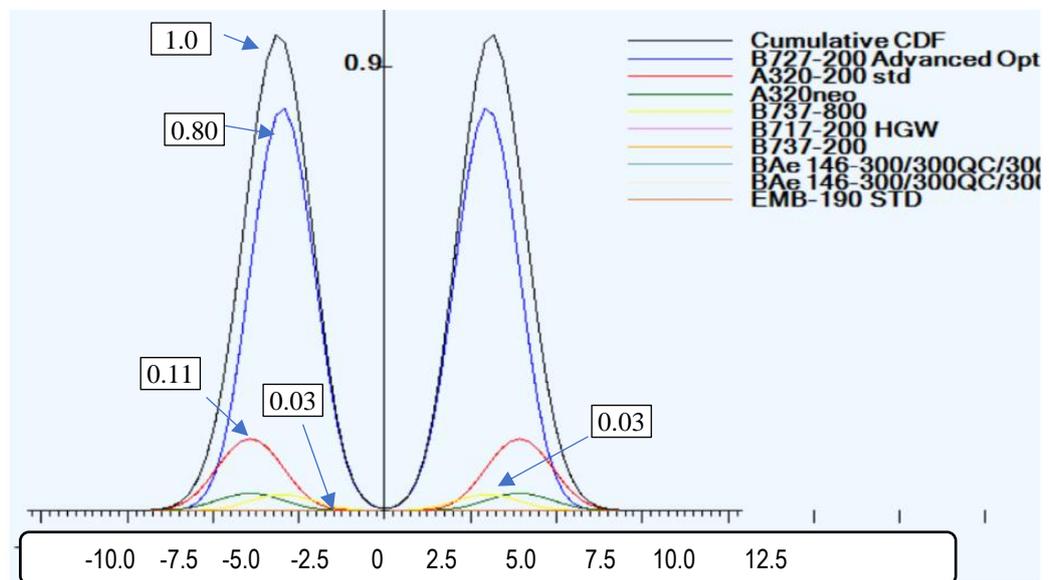
Tabla 47

Espesores de pavimento rígido para la pista de aterrizaje

Capa	Espesor (cm)	Total (cm)
P-501: Concreto de Cemento Portland (PCC)	37.8	52.8
P-403: Capa subbase estabilizada	15.0	

Figura 79

Factor de daño acumulativo del mix de aeronaves en pavimento rígido



Nota: Se muestra el factor de daño acumulativo del mix de aeronaves. Donde cada color hace referencia al daño producido por cada aeronave distinta. Adaptada de FAARFIELD, 2022.

De lo anterior podemos observar que la contribución más alta de 0,80 la produce el B727-200 (con CDF máximo es 0.82), A320-200 contribuye con 0.11 (con CDF máximo es 0.15), B737-800 contribuye con 0.03 (con CDF máximo es 0.03), la aeronave A320Neo contribuye con 0.03 (con CDF máximo es 0.03) y las aeronaves B717-200, B737-200, EMB-190, BAE 146-200 y BAE 146-300 contribuyen con 0.004 cada una. Además, la sumatoria de todos los daños

individuales de cada aeronave nos da como resultado un CDF de 1 para una vida útil de 20 años.

a) Cálculo del espesor del margen de la pista de aterrizaje

Para el diseño de espesores del pavimento rígido se realizó el mismo procedimiento que en el caso de pavimentos flexibles, se proyectó para un total de 15 salidas anuales totales de la aeronave más exigente.

Luego de la evaluación de las 4 aeronaves de diseño obtenemos como resultado que el margen de pista con una subbase estabilizada tiene 26.9 cm de espesor total conformado por: 15 cm de losa de concreto P-501 y 11.9 cm de subbase estabilizada P-403.

Tabla 48

Resumen del cálculo de espesores obtenidos con el método FAA

	Pista de aterrizaje	Margen
Espesor de losa (cm)	37.8	22.9
Espesor de subbase (cm)	15.0	15.0
Total (cm)	52.8	37.9

Nota: Se muestran los espesores obtenidos para el pavimento rígido.

4.8. SELECCIÓN DE JUNTAS A UTILIZAR

a) Tipos de juntas a utilizar

- Juntas de dilatación: Serán necesarias en las uniones entre la pista de aterrizaje, las calles de rodaje y plataforma del aeropuerto; en donde se producen diferencias en la dirección del movimiento de las aeronaves. Se usará el tipo de junta A, debido a que no existe ningún impedimento y se permite el aumento del borde de las estructuras de pavimento.



- Juntas de contracción: Por el espesor de nuestra losa (mayor a 22.5 cm), es conveniente utilizar juntas longitudinales de contracción con pasadores tipo C (dowels) en zonas cercanas a los bordes y juntas de contracción ficticia tipo D (dummy) para las restantes.
- Juntas de construcción: Se usará la junta de contracción tipo E (dowels) ya que los pavimentos servirán para aeronaves con un peso bruto mayor o igual a 30000 lb o 13610 kg.

b) Espaciado de juntas

Para la separación de juntas, se han utilizado los valores mínimos establecidos por la FAA e indicados en la Tabla 6, considerando además que el pavimento cuenta con subbase estabilizada.

Para una losa rígida que tiene espesor de 39.1 cm, se deberá emplear un espaciado máximo de 5.3 m, por lo que se usará 5 m como medida estándar para las 3 estructuras; y para los márgenes que tienen 15 cm de espesor promedio, se deberán colocar juntas espaciadas a un máximo de 3.8 m, por lo tanto, estas juntas tendrán un espaciado de 3.5 m en los márgenes de la pista de aterrizaje y la plataforma y de 3 m en las calles de rodaje.

c) Barras de unión en juntas

Se usarán en las juntas longitudinales para mantener ancladas unas con otras, de esta manera se garantiza la correcta transferencia de cargas.

La FAA establece que para nuestro tipo de losa se deberá colocar barras N° 5 con 76.2 cm de longitud como mínimo y espaciadas a 76.2 cm como máximo en el centro. Por ello, se colocarán barras de unión N° 5 con longitud y espaciado de 75 cm.

d) Pasadores en juntas

Se utiliza para proporcionar transferencia de carga y para prevenir el desplazamiento vertical relativo de los extremos de la losa adyacente. El tamaño, longitud y espaciado de los mismos deben ser tal que resistan los esfuerzos cortantes y de flexión producidos por las cargas sobre el pavimento:

- Diámetro: 1 ¼ in para las superficies principales y ¾ in para los márgenes.
- Longitud: 50 cm para las superficies principales y 45 cm para los márgenes.
- Espaciado: 35 cm para las superficies principales y 30 cm para los márgenes.

Figura 80

Distribución de juntas en la pista de aterrizaje



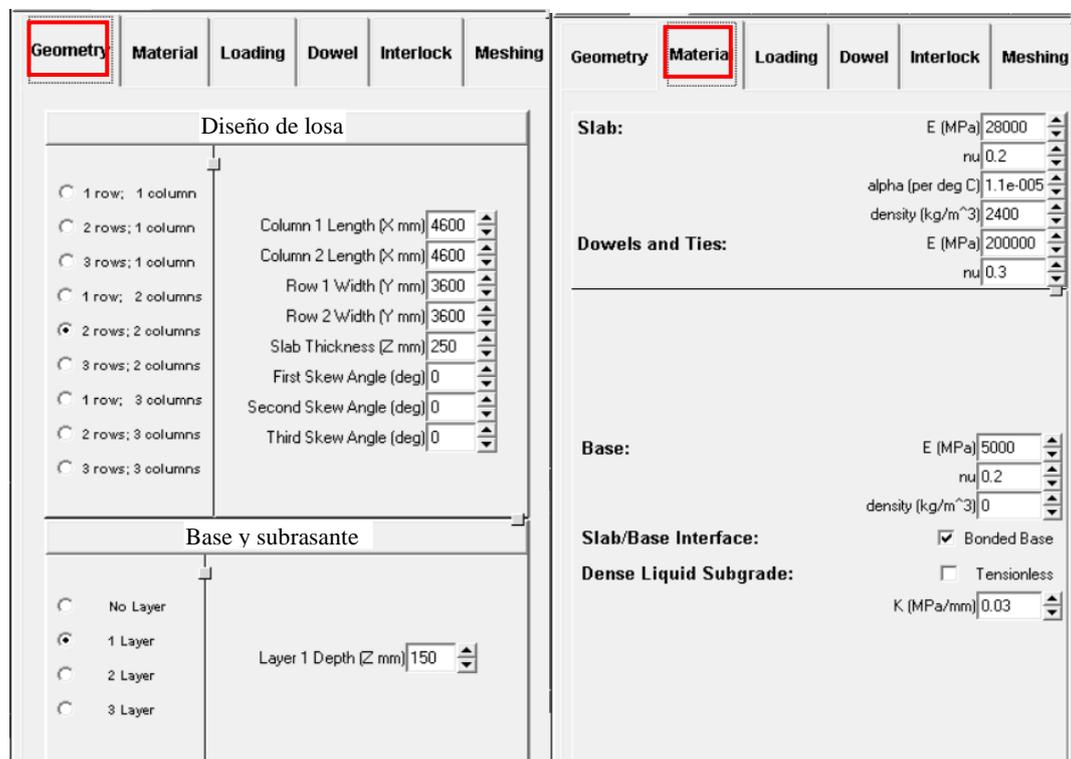
4.9. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PAVIMENTO RÍGIDO

Para la determinación de la respuesta estructural del pavimento diseñado por el método de elementos finitos se realizó el análisis estructural empleando el software Everfe 2.26 el cual nos permite obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones para pavimentos rígidos a través de elementos finitos tridimensionales, que simulan el comportamiento del pavimento rígido con juntas, bajo la acción de cargas y efectos térmicos del medioambiente.

Everfe es una herramienta muy completa de análisis de elementos finitos en 3D, desarrollada para simular la respuesta de los sistemas de pavimento de hormigón articulado sometidos a cargas de eje y efectos ambientales (Guerra, 2020).

Figura 81

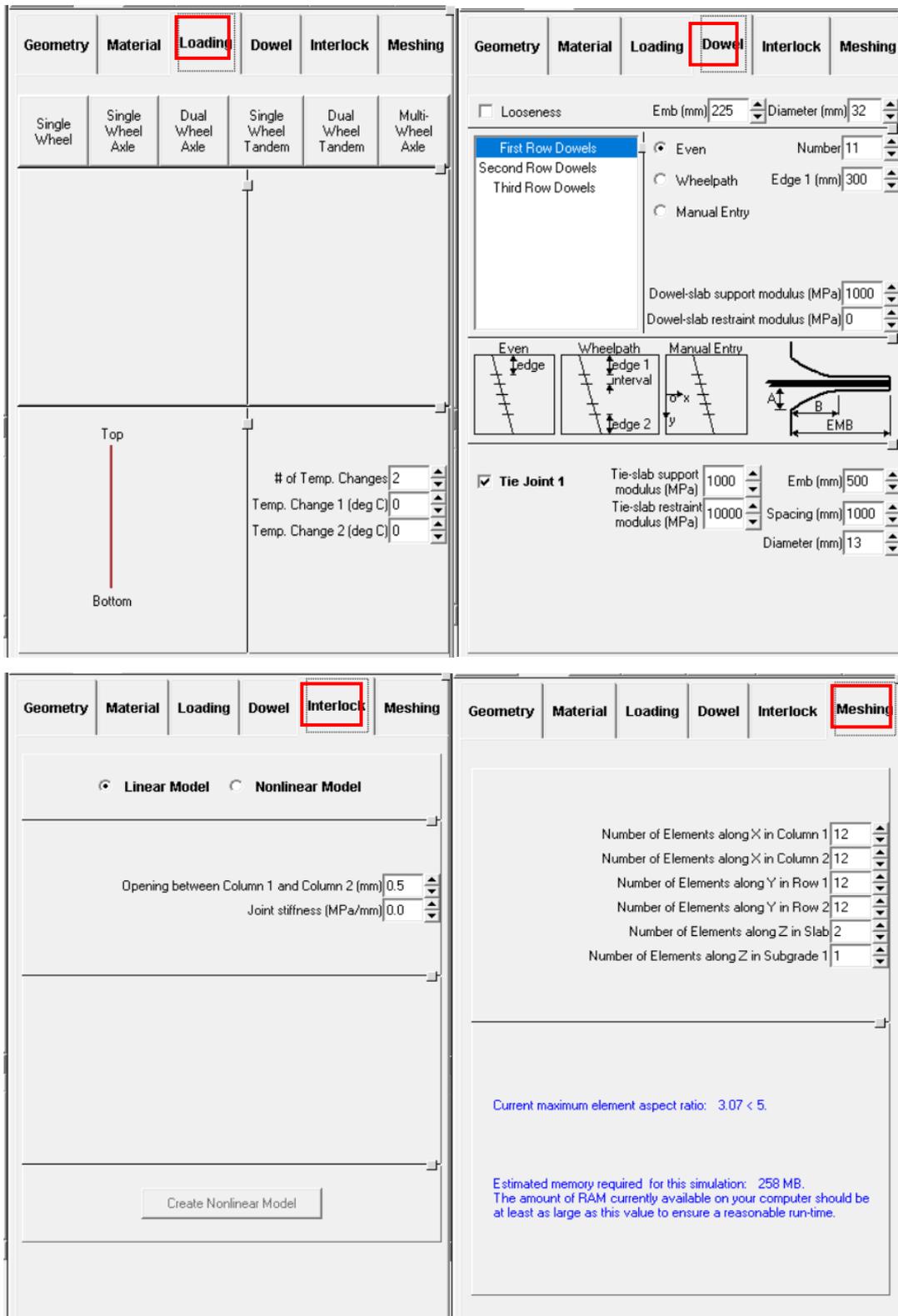
Secciones para la generación de modelos en Everfe



Nota: Se muestran las secciones del programa: Geometry, Material y Loading. Tomada de Everfe, 2023

Figura 82

Secciones para la generación de modelos en Everfe (continuación)



Nota: Se muestran las secciones del programa: Dowel, Interlock y Meshing. Tomada de Everfe, 2023



a) **Parámetros de análisis Everfe**

Los valores de entrada para para el análisis con Everfe requiere el uso de unidades métricas, por ende, utilizaremos las siguientes equivalencias:

- Espesor de la losa: $1 \text{ pulg} = 25.4 \text{ mm}$
- Módulo de reacción: $1 \text{ Lb/pulg}^3 = 2.77 \times 10^{-4} \text{ MPa/mm}$
- Módulo elástico del concreto: $1 \text{ Lb/pulg}^2 = 6.9 \times 10^{-3} \text{ MPa}$
- Carga por rueda: $1 \text{ Lb} = 4.45 \text{ N}$

Área de contacto: Everfe no modela áreas de carga circulares, considera un área de contacto rectangular, por lo que el área circular de Westergaard se debe convierte a un área rectangular o cuadrada equivalente.

- Radio de carga = 22.46 cm y Área circular = $\pi r^2 = 1584.8 \text{ cm}^2$
- Lado del área de carga cuadrada = 39.8 cm.

Dimensiones de la losa: Everfe modela losas finitas con un largo y un ancho definidos a diferencia de Westergaard que modela losas teóricamente infinitas horizontalmente, para el caso de estudió se tiene losas típicas de 5 m x 5 m.

Malla de elementos finitos: Everfe trae un dimensionamiento de malla por defecto de 12 elementos en el eje X y 12 elementos en el eje Y, para el caso de estudio se toma una mallado más fino de 24 elementos en el eje X y 24 elementos en el eje Y, el cual mejora la exactitud de los resultados, pero eleva el tiempo de cálculo del ejercicio.

En el eje Z por defecto trae 2 elementos, pero, se asumen 3 elementos en el eje Z. Las variables de entrada para la estructura de pavimento rígido que se modela con el programa Everfe se resumen en la Tabla 48.

Tabla 49

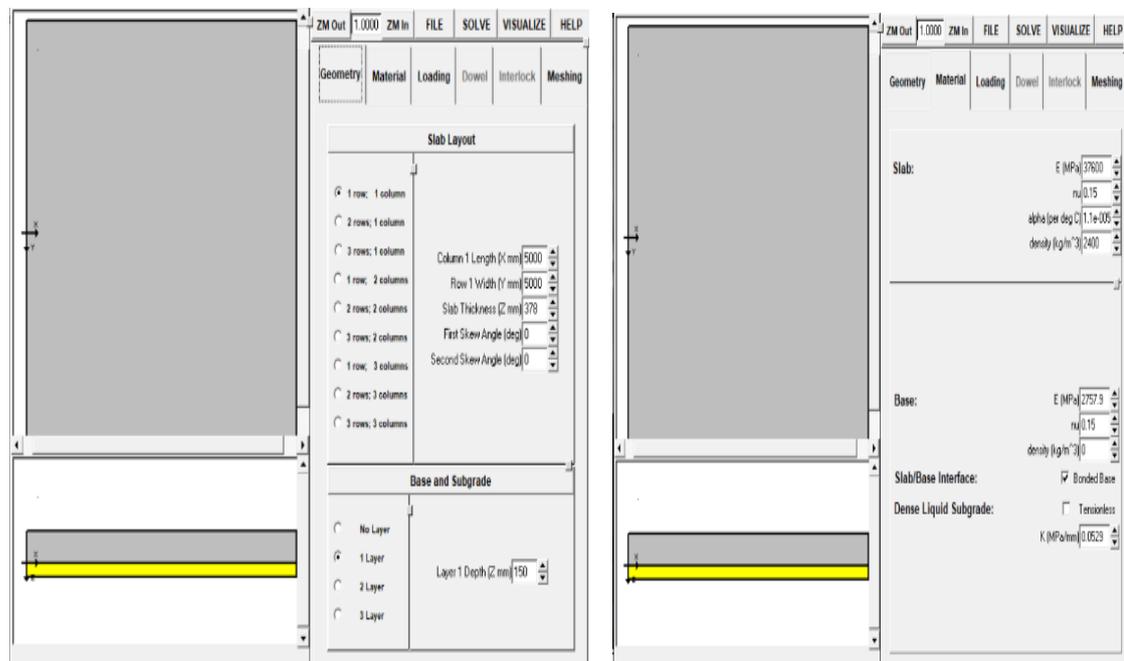
Datos de entrada programa Everfe

Estructura	Pista de aterrizaje
Espesor de la losa (mm)	378.0
Módulo de reacción de la subrasante (Mpa/mm)	0.0529
Carga por rueda (kN)	221.91
Longitud área de carga, L (mm)	398
Ancho área de carga, W (mm)	398
Modulo elástico del concreto, E (MPa)	27600
Relación de Poisson del concreto, u	0.15
Longitud de la losa, Lx (mm)	5000
Ancho de la losa, Ly (mm)	5000
Mallado número de elementos eje X	24
Mallado número de elementos eje Y	24
Mallado número de elementos eje Z	3

Nota: Se muestran los datos de entrada para el modelamiento en Everfe, 2023.

Figura 83

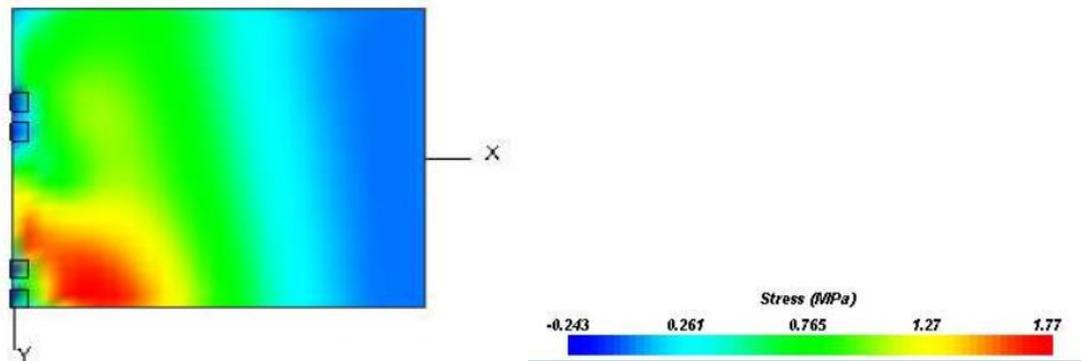
Modelación del pavimento rígido en Everfe 2.26



Nota: Se muestra el modelamiento de la losa rígida en Everfe, 2023.

Figura 84

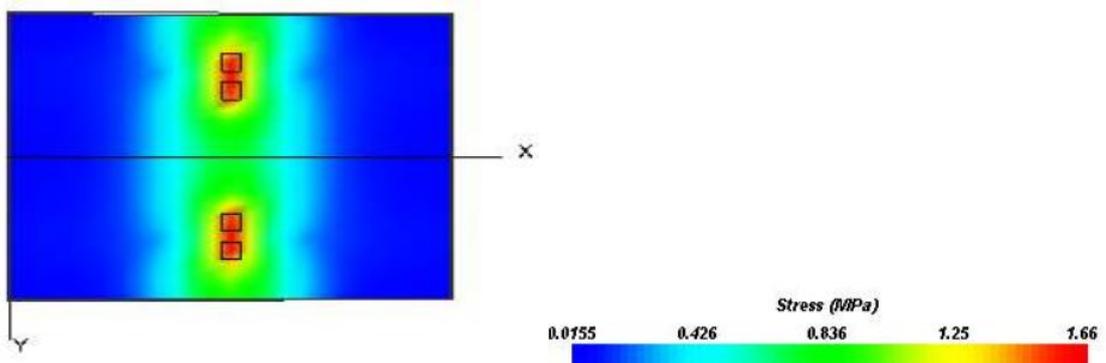
Esfuerzos por carga en la esquina de la losa



Nota: Se muestran los resultados de los esfuerzos en la esquina de la losa en Everfe, 2023.

Figura 85

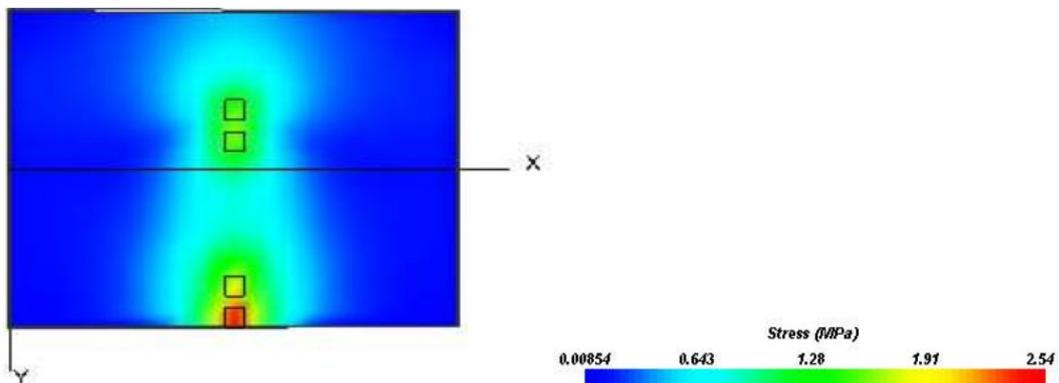
Esfuerzos por carga en el centro de la losa



Nota: Se muestran los resultados de los esfuerzos en el centro de la losa en Everfe, 2023.

Figura 86

Esfuerzos por carga en el borde de la losa



Nota: Se muestran los resultados de los esfuerzos en el borde de la losa en Everfe, 2023.



Tabla 50

Esfuerzos y deflexiones en pavimento rígido – Everfe

Estructura	Pista de aterrizaje		
	En la esquina	En el borde	En el interior
Esfuerzos (kPa)	2362.46	4110.97	1815.75
Deflexiones (mm)	0.403	0.341	0.259

4.10. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS OACI Y FAA

Tabla 51

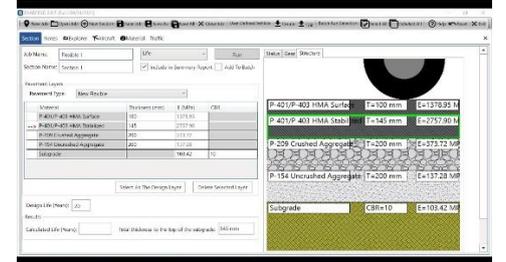
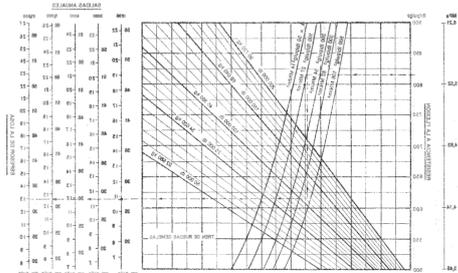
Comparación de los métodos de diseño de pavimento rígido para aeropuertos

Característica	Método de Westergaard	Teoría de elementos finitos
Planteamiento	<p>Teoría de Westergaard</p> <p>Se centró en los cálculos de esfuerzos y deflexiones en pavimentos de hormigón debido a las cargas aplicadas. Se basa en la rigidez a la flexión del hormigón para distribuir las cargas de las ruedas de los aviones a la subrasante.</p>	<p>Diseño mecánico – empírico</p> <p>Mecánico (teoría de elementos finitos) para determinar la respuesta estructural del pavimento y empírico para convertir dicha respuesta en deterioro del pavimento.</p>
Modelo matemático	<p>Hipótesis de Westergaard</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. El pavimento es una losa delgada sostenida por una subrasante especial que se considera elástica solo en la dirección vertical. 2. La losa es un sólido elástico isotrópico homogéneo en equilibrio. 3. Las capas del pavimento que soportan la losa se representan por un solo parámetro de reacción (coeficiente de balasto). 4. Se cuantifica la rigidez de la losa en comparación con la del soporte. 	<p>Teoría de elementos finitos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Divide al pavimento en secciones discretas, en lugar de un material continuo, esto permite una estimación más precisa de los esfuerzos y deformaciones. 2. Al material de cada elemento se le asignan propiedades que pueden variar de un elemento a otro. 3. Se formula la matriz de rigidez de cada elemento y la matriz de rigidez global del sistema 4. Se formula la matriz de carga de cada elemento y la matriz de carga global. 5. Se calculan los desplazamientos nodales y con ello se obtienen los esfuerzos y deflexiones resultantes del sistema.
Modelo de tráfico	<p>Todo el tráfico debe ser convertido a salidas anuales equivalentes de una aeronave de diseño.</p>	<p>Considera todas las aeronaves de diseño, cada una con su peso bruto máximo de despegue (MTOW), tráfico inicial y su tasa de crecimiento anual.</p>
Carga de diseño	<p>Considera la carga equivalente de una sola rueda de la aeronave de diseño en 3 posiciones críticas: en el interior, en la esquina, y en el borde de la losa, asumiendo la distribución de estas como uniforme sobre un área circular de radio a.</p>	<p>Las cargas se aplican como fuerzas concentradas en los puntos nodales.</p>

Tabla 52

Comparación de los métodos de diseño de pavimento rígido (continuación)

Respuesta estructural	La reacción de la subrasante es solo vertical y proporcional a la deflexión de la losa. La resistencia de la subrasante se mide con el módulo de reacción k de la subrasante. La deflexión es causada por la carga equivalente de una sola rueda.	La respuesta del pavimento para resistir las cargas depende de su espesor, composición, las propiedades de los materiales utilizados en su construcción y la resistencia de la subrasante sobre la cual se construye el pavimento.
Modo de falla	El agrietamiento longitudinal a la mitad de la losa y con esto se determinaron las tensiones máximas. Agrietamiento por fatiga, cuando al menos el 50 % de las losas contienen una o más grietas debido a las cargas. No considera la deformación por cortante.	El agrietamiento estructural de profundidad total que resulta de la fatiga de la losa inducida por la carga de la aeronave. Falla por fatiga en términos de un factor de daño acumulativo (CDF).
Diseño del espesor	Westergaard desarrolló fórmulas para calcular esfuerzos y deflexiones en el interior, borde y esquina de una losa; el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. aplicó la teoría y las fórmulas de Westergaard en pruebas a gran escala para elaborar de gráficos de diseño.	Su utiliza el software FAARFIELD el cual realiza un proceso de cálculo iterativo, donde el espesor de las capas se define en función de la CDF y la vida útil del diseño. Utilizando modelos de rendimiento empíricos para procesar un diseño.
Pasos básicos del diseño	1. Determinar la aeronave equivalente, sus salidas anuales equivalentes 2. Determinar el módulo de reacción del terreno de fundación y el coeficiente del cimiento 3. Calcular los espesores del pavimento utilizando nomogramas para cada caso.	1. Estimar el volumen de tráfico esperado inicial y la tasa de crecimiento 2. Determinar el módulo de reacción de la subrasante. 3. Realizar la selección de los materiales de cada capa del pavimento. 4. Calcular los espesores de las capas de mediante un proceso iterativo y haciendo uso del software FAARFIELD.
Resultados del diseño	Pista de aterrizaje: 39.20 cm de losa de concreto y 15 cm de subbase estabilizada.	Pista de aterrizaje: 37.80 cm de losa de concreto y 15 cm de subbase estabilizada.





4.10.1. Discusión de resultados

Algunas deficiencias observadas en el método basado en las teorías de Westergaard son:

- Las capas del pavimento que soportan la losa de concreto se representan por un solo parámetro, el módulo de reacción de la subrasante. En realidad, un pavimento tiene varias capas bajo la losa, una base o subbase y la subrasante, cada capa con espesores y rigidez diferente, el método de Westergaard representa la respuesta del conjunto de capas con único valor de coeficiente de balasto, lo que se aleja de la realidad y disminuye en cierta medida la exactitud de los resultados.
- Westergaard asumió que la base se comporta como un material isotrópico elástico y lineal. Generalmente los materiales de base y suelos de subrasante no presentan una reacción totalmente elástico-lineal debido a su composición y posición variada de sus partículas, la mayoría son no lineales, su capacidad de reacción cambia a través del tiempo y las condiciones climáticas del medio ambiente.
- Westergaard asumió la losa está en total contacto con la base en todos los puntos. En la realidad se generan espacios de no contacto entre la losa y la base debido a las deflexiones y ondulaciones que trasmite a la base y a diferenciales de compactación que presenta la subrasante.
- Estas fórmulas suponen una losa de dimensiones infinitas para el caso de cargas en el interior y de dimensiones semi - infinitas para los casos de carga en el borde y en la esquina. De esta manera se supone que las juntas, grietas y discontinuidades no tienen efecto sobre los esfuerzos y deflexiones, esta condición se aleja de la realidad, ya que por lo general un pavimento rígido



- no se compone de losas infinitas, son losas estrechas que se ajustan a la dimensión de los carriles y presentan discontinuidades como juntas y grietas.
- Se considera un espesor de la losa uniforme, lo que hace imposible analizar losas con espesores mayores en los bordes o losas de espesor no uniforme.
 - Imposibilita el análisis de las juntas, no pudiendo explicar el fenómeno de transferencia de cargas entre ellas.

Sin embargo, este método sigue siendo utilizado en varios países, esto es debido a que, al igual que el método CBR para pavimento flexible, es considerado un método muy confiable para el diseño de pavimentos rígidos de aeropuertos y además cuenta con el respaldo de importantes países fabricantes de aeronaves como es el caso de los Estados Unidos de Norteamérica.

Por otro lado, el método de elementos finitos (FEM) tiene facilidad para modelar los elementos de separación, interfaces entre capas, condiciones de contorno, restricciones, etc. A continuación, se presentan los espesores obtenidos utilizando el método de Westergaard y de elementos finitos con FAARFIELD, variando el valor CBR de la subrasante.

Este trabajo está en concordancia con lo afirmado por Tamagusko (2020), en que el software de la FAA tiene una solución más elegante, sencilla de entender y más precisa. Esto debido a la constante actualización del procedimiento que se realiza de este por parte de la FAA.

Figura 87

Espesores obtenidos por el método de Westergaard

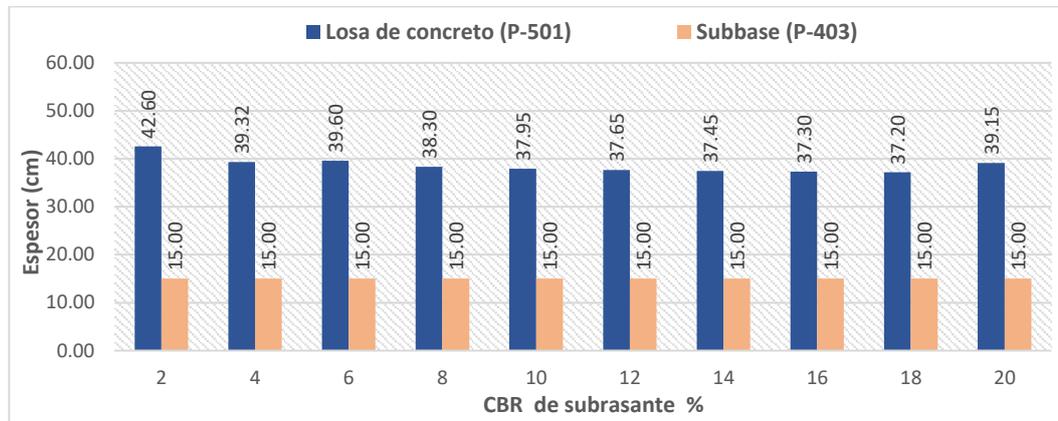


Figura 88

Espesores obtenidos por el método de elementos finitos – FAARFIELD

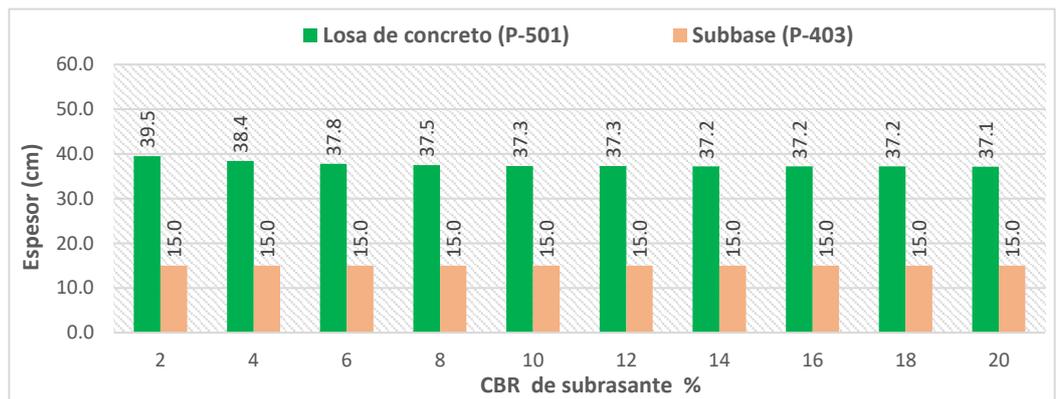
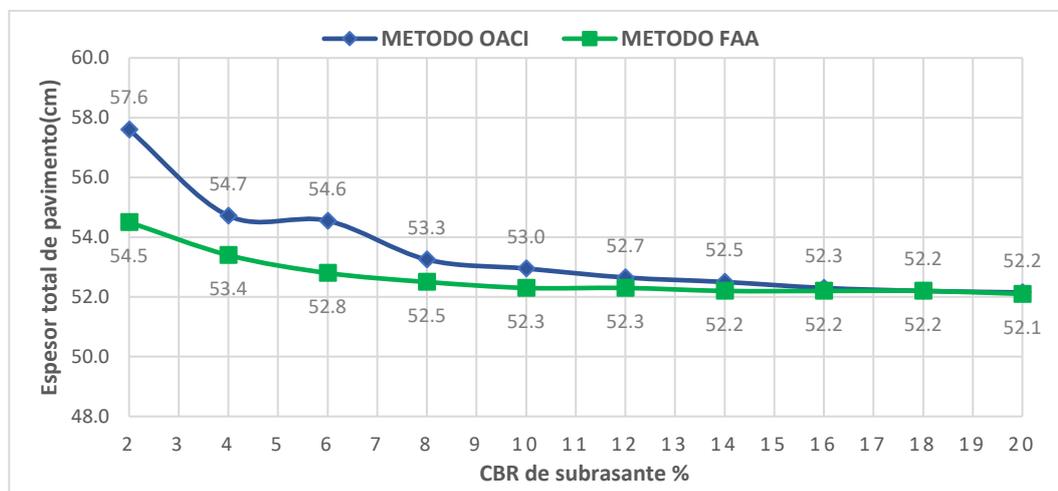


Figura 89

Comparación de los métodos de diseño de pavimento rígido





De los resultados del diseño por ambos métodos, podemos notar que con el método de Westergaard, los resultados son menores a los obtenidos en utilizando la metodología de la FAA, es se debe a que el método de Westergaard realiza un análisis simplificado ocasionando un mayor margen de error.

Este trabajo de investigación respalda lo afirmado por Loizos (2018), quien indica que el modelado de elementos finitos para obtener las máximas tensiones y deflexiones en losas de hormigón y compararlas con las soluciones de Westergaard es una herramienta confiable para el análisis de pavimentos rígidos de aeropuertos.

Además, concuerdo con Marrugo y Orozco (2015), quien señala que mezclas asfálticas P-401 para su uso en la conformación de la carpeta de rodadura deben estar compuestas por agregados mineral y aglutinante de cemento asfáltico mezclado en una planta mezcladora, preparada de acuerdo a las especificaciones de la Administración Federal de Aviación (FAA). Así mismo coincido Marrugo y Orozco (2015), en que es más adecuado el uso de una base estabilizada que una sin estabilizar a pesar del mayor costo inicial, esto debido que una base estabilizada tiene mayores ventajas y comportamiento frente a las elevadas cargas a la que está expuesto un pavimento aeroportuario.

4.11. SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Cada diseño de pavimento necesita muchos parámetros de entrada. Cuando se determina un modelo de diseño, diferentes parámetros de entrada tienen diferentes influencias en la vida útil del pavimento. Se realizó el análisis de sensibilidad de la vida útil del pavimento a la resistencia a la flexión del concreto, al espesor de la losa PCC, al espesor de la base y al peso de la aeronave crítica de diseño.

Tabla 53

Resultados del análisis de sensibilidad

CBR	x	Δx	$x + \Delta x$	$x - \Delta x$	$L[x]$	$L[x + \Delta x]$	$L[x - \Delta x]$	$S_{x,L}$
Sensibilidad a la resistencia a la flexión del concreto (MPa)								
2	4.5	0.45	4.95	4.05	20	88.0	2.9	21.275
4	4.5	0.45	4.95	4.05	20	96.2	2.9	23.325
6	4.5	0.45	4.95	4.05	20	98.5	2.5	24.000
8	4.5	0.45	4.95	4.05	20	106.4	2.3	26.025
10	4.5	0.45	4.95	4.05	20	110.6	2.1	27.125
12	4.5	0.45	4.95	4.05	20	122.5	2.0	30.125
14	4.5	0.45	4.95	4.05	20	121.5	1.6	29.975
Sensibilidad al espesor de la losa PCC (cm)								
2	39.5	3.95	43.45	35.55	20	232.3	0.8	57.875
4	38.4	3.84	42.24	34.56	20	215.4	2.4	53.250
6	37.8	3.78	41.58	34.02	20	203.7	1.1	50.650
8	37.5	3.75	41.25	33.75	20	204.4	1.2	50.800
10	37.3	3.73	41.03	33.57	20	192.8	1.1	47.925
12	37.3	3.73	41.03	33.57	20	203.9	1.2	50.675
14	37.2	3.72	40.92	33.48	20	195.6	1.0	48.650
Sensibilidad al espesor de subbase (cm)								
2	15	1.5	16.5	13.5	20	21.1	19.0	0.525
4	15	1.5	16.5	13.5	20	20.9	19.1	0.450
6	15	1.5	16.5	13.5	20	20.8	19.1	0.425
8	15	1.5	16.5	13.5	20	20.9	19.3	0.400
10	15	1.5	16.5	13.5	20	20.8	19.4	0.350
12	15	1.5	16.5	13.5	20	20.6	19.4	0.300
14	15	1.5	16.5	13.5	20	20.5	19.5	0.250

Nota: se muestran los resultados del análisis de sensibilidad en pavimento rígido.

Tabla 54

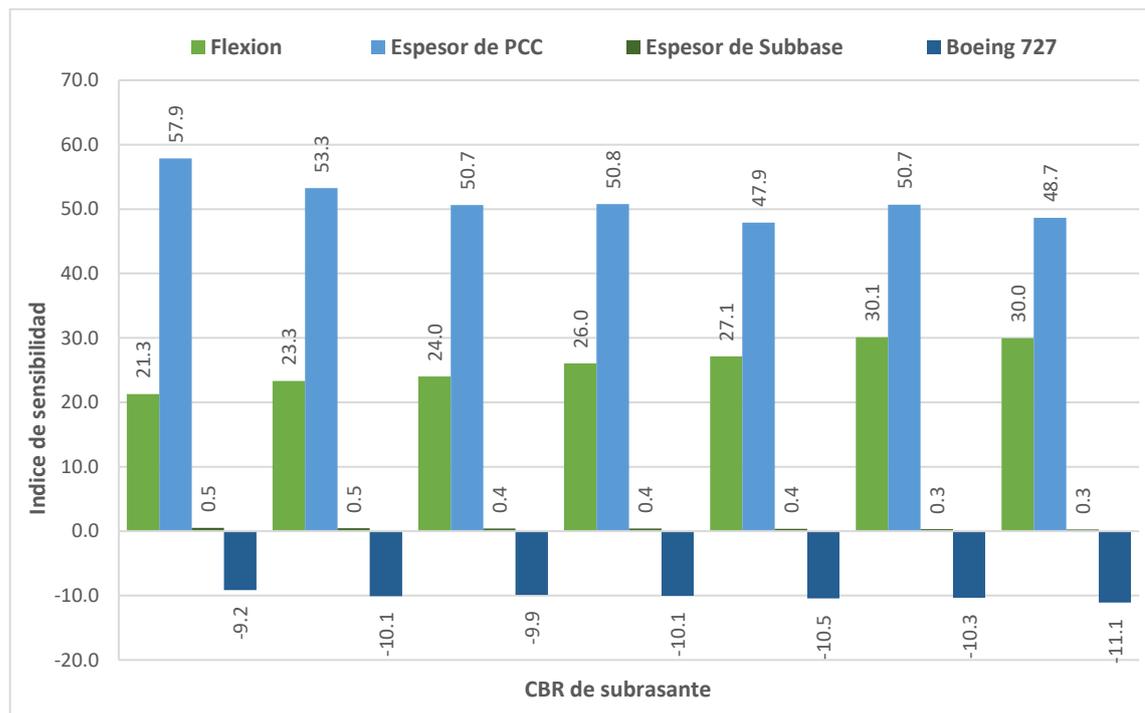
Resultados del análisis de sensibilidad (continuación)

CBR	x	Δx	$x + \Delta x$	$x - \Delta x$	$L[x]$	$L[x + \Delta x]$	$L[x - \Delta x]$	$S_{x,L}$
Sensibilidad al peso bruto de la aeronave Boeing 727-200								
2	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.1	42.6	-9.175
4	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.2	45.5	-10.075
6	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.4	44.9	-9.875
8	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.2	45.4	-10.050
10	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.5	47.3	-10.450
12	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.4	46.7	-10.325
14	95028	9502.8	104530.8	85525.2	20	5.7	50.1	-11.100

Nota: se muestran los resultados del análisis de sensibilidad en pavimento rígido.

Figura 90

Sensibilidad de la vida útil del pavimento



De todos los parámetros estudiados en el análisis de sensibilidad, el espesor de la losa de concreto tuvo la sensibilidad más alta, como se muestra en la figura 90. La sensibilidad de la vida útil del pavimento al espesor de PPC disminuye ligeramente con el aumento de la resistencia de la subrasante (CBR).



La sensibilidad de la vida útil del pavimento a la resistencia a la flexión del concreto es más alta que la sensibilidad al peso de la aeronave crítica, pero más baja cuando se compara con el espesor de la losa de concreto. Para los pavimentos en subrasante de alta resistencia, la sensibilidad de la vida útil del pavimento a la resistencia a la flexión del concreto fue mayor en comparación con la subrasante de baja resistencia.

La vida útil del pavimento es mucho menos sensible al espesor de la subbase, en comparación con la resistencia a la flexión del concreto, el espesor de PCC y el peso de la aeronave crítica. La sensibilidad se reduce ligeramente con el aumento del CBR de subrasante. La sensibilidad es mayor para subrasantes de baja resistencia en comparación con subrasantes de resistencia alta.

Para el análisis de sensibilidad se consideró la aeronave crítica de diseño Boeing 727 (peso bruto 95028 kg). Como se muestra en la Figura 90, el peso bruto de la aeronave tiene la tercera mayor sensibilidad en la vida útil del pavimento. Además, dado que la sensibilidad es negativa, significa que la vida útil del pavimento se reduce con el aumento del peso bruto de la aeronave crítica de diseño.

4.12. ANÁLISIS ECONÓMICO

Una vez dada la propuesta del uso del método de la FAA para los diseños de pavimento flexible o rígido en el aeropuerto en estudio. Otro aspecto importante que debemos tener en cuenta es conocer los costos necesarios que demandarán los diseños realizados, por ello se realizará el análisis económico de los pavimentos flexible y rígido para luego realizar la comparación entre ambos presupuestos de construcción. Para la pista del Aeropuerto Internacional de Ventilla se tiene:

Tabla 55

Dimensiones de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Ventilla

Descripción	Cantidad	Longitud (m)	Ancho (m)	Área (m ²)
Pista de aterrizaje	1	-	-	190 624
Marge de la pista de aterrizaje	1	8 046	7.5	60 345

Nota: Para áreas adicionales como la zona de parada, la zona libre de obstáculos, se considerará que estas van a consistir de terreno nivelado y compactado.

a) Consideraciones para pavimento rígido

Deberá consistir en la elaboración de la mezcla de concreto hidráulico con cemento portland y su colocación sobre una superficie previamente preparada.

- Se utilizará concreto premezclado con resistencia a la flexión de 4.5 MPa.
- Acero longitudinal: Según lo obtenido en el ítem 3.10.3.9. Diseño de Juntas, se utilizarán barras de acero corrugado con $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ – Grado 60, de 5/8” de 75 cm de longitud y espaciadas a 75 cm.
- Acero transversal: Según lo obtenido en el ítem 3.10.3.9. Diseño de Juntas, se colocará acero de liso de 1 ¼” de 50 cm de longitud y espaciadas a 35 cm.
- Espaciamiento de juntas, es decir, la longitud de los paños será de 5 m, sin embargo, en los márgenes se reduce a 3.5 m.

b) Metrados

Tabla 56

Metrado de las partidas de pavimento flexible

PAVIMENTO FLEXIBLE								
Ítem	Descripción	Und.	Núm.	Long	Anch	Área	Esp.	Metrado
1 Pista de aterrizaje								
1.1	Subbase granular P-154	m ³	1	-	-	190624	0.24	45749.8
1.2	Conformación de base con material de cantera	m ³	1	-	-	190624	0.15	28593.6
1.3	Estabilización de base con cemento asfáltico	m ²	1	-	-	190624	-	190624.0
1.4	Imprimación Asfáltica	m ²	1	-	-	190624	-	190624.0
1.5	Pavimento de concreto asfáltico en caliente P-401	m ³	1	-	-	190624	0.10	19062.4
1.6	Riego de liga	m ²	2	-	-	190624	-	381248.0
2 Margen de la pista de aterrizaje								
2.1	Subbase granular P-154	m ³	1	8046	7.5	-	0.10	6034.5
2.2	Conformación de base con material de cantera	m ³	1	8046	7.5	-	0.15	9051.8
2.3	Estabilización de base con cemento asfáltico	m ²	1	8046	7.5	-	-	60345.0
2.4	Imprimación Asfáltica	m ²	1	8046	7.5	-	-	60345.0
2.5	Pavimento de concreto asfáltico en caliente	m ³	1	8046	7.5	-	0.10	6034.5
2.6	Riego de liga	m ²	2	8046	7.5	-	-	120690.0

Nota: Los metrados se realizaron haciendo uso de los planos mostrados en los anexos.

Tabla 57

Metrado de las partidas de pavimento rígido

PAVIMENTO RÍGIDO								
Ítem	Descripción	Und.	Núm.	Long.	Anch	Área	Esp.	Metrado
1 Pista de aterrizaje								
1.1	Conformación de subbase con material de cantera	m ³	1	-	-	190624	0.15	28593.6
1.2	Estabilización de subbase con cemento asfáltico	m ²	1	-	-	190624	-	190624.0
1.3	Losa de concreto f'c= 420 Kg/cm ²	m ³	1	-	-	190624	0.38	72055.9
1.4	Encofrado plano	m ²	1	72432	-	-	0.60	43459.2
1.5	Acero corrugado fy=4200 kg/cm ² grado 60	kg	1	-	-	-	-	4295.1
1.6	Juntas longitudinales de construcción	m	1	-	-	-	-	8560.0
1.7	Juntas de contracción	m	1	-	-	-	-	63766.0
1.8	Juntas de aislamiento	m	1	-	-	-	-	106.0
2 Margen de la pista de aterrizaje								
2.1	Conformación de subbase con material de cantera	m ³	1	8046	7.5	-	0.10	6034.5
2.2	Estabilización de subbase con cemento asfáltico	m ²	1	8046	7.5	-	-	60345.0
2.3	Losa de concreto f'c= 420 Kg/cm ²	m ³	1	8046	7.5	-	0.15	9051.8
2.4	Encofrado plano	m ²	1	24481	-	-	0.60	14688.6
2.5	Acero corrugado fy=4200 kg/cm ² grado 60	kg	1	-	-	-	-	2592.4
2.6	Juntas longitudinales de construcción	m	1	-	-	-	-	8240.0
2.7	Juntas de contracción	m	1	-	-	-	-	16241.0

Nota: Los metrados se realizaron haciendo uso de los planos mostrados en los anexos.



ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS



Proyecto: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE LA PISTA DE ATERRIZAJE DE UN AEROPUERTO INTERNACIONAL EN LA REGIÓN DE PUNO
Sub presup. 01 - PAVIMENTO ASFALTICO Ubic. Puno - Puno - Puno

Partida	01.01	SUBBASE GRANULAR P-154				
Código	Descripción / insumo		Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra						
0104010012	PEÓN		hh	0.0300	12.43	0.37
						0.37
Materiales						
0293010574	AGUA		m3	0.0600	3.82	0.23
0293010572	MATERIAL PARA SUBBASE		m3	1.4000	60.07	84.10
						84.33
Equipos						
0305010061	CAMIÓN CIST 10 M ³ C/BOMBA Y ASP ALQ C/COND		hm	0.0100	91.97	0.92
0305010063	MOTONIVELADORA 130 CV		hm	0.0100	127.17	1.27
0305010066	COMPACTADOR NEUMÁT.AUTP.100CV		hm	0.0100	135.09	1.35
						3.54
Costo unitario por (m3):						88.24

Partida	01.02	COMFORMACIÓN DE BASE CON MATERIAL DE CANTERA				
Código	Descripción / insumo		Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra						
0104010008	OPERARIO PRIMERA		hh	0.0050	16.08	0.08
0104010012	PEÓN		hh	0.0100	12.43	0.12
						0.20
Materiales						
0293010573	MATERIAL DE CANTERA PARA BASE		m3	1.0000	50.27	50.27
0293010574	AGUA		m3	0.0500	3.82	0.19
						50.46
Equipos						
0305010028	PALA CARGAD.C/CONVERTIDOR 1,30 M3		hm	0.0050	178.78	0.89
0305010029	MOTONIVELAD. DE BASTIDOR >100 KW		hm	0.0040	279.05	1.12
0305010030	COMPACTA. VIBRAT. 1 CILINDRO AUTO.		hm	0.0130	118.68	1.54
0305010031	CAMIÓN BAÑERA BASCULANTE 12 M ³		hm	0.0360	235.10	8.46
0305010032	ESTABILIZADOR DE SUELOS INTEGRAL.		hm	0.0100	727.93	7.28
						19.30
Costo unitario por (m3):						69.96

Partida	01.03	ESTABILIZACIÓN DE BASE CON CEMENTO ASFÁLTICO P-403				
Código	Descripción / insumo		Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra						
0147010001	CAPATAZ		hh	0.0172	19.30	0.33
0147010003	OFICIAL		hh	0.0057	13.79	0.08
0147010004	PEÓN		hh	0.1319	12.43	1.64
						2.05
Materiales						
0220010005	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70		gal	0.7800	7.97	6.22
						6.22
Equipos						
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		0.10	0.10
0348040003	CAMION CISTERNA 4 X 2 (AGUA) 122 HP 1,500 gl		hm	0.0075	131.56	0.99
0348040006	CAMION CISTERNA 4 X 2 (ASF) 178-210 HP 2,000 gl		hm	0.0250	156.80	3.92
0348040038	CAMION VOLQUETE 15 M3		hm	0.0039	258.61	1.01
0349030007	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135HP 10-12 ton		hm	0.0250	149.49	3.74
0349040009	CARGADOR SOBRE LLANTAS 125 HP 2.5 yd3		hm	0.0027	150.34	0.41
0349040010	CARGADOR SOBRE LLANTAS 125-155 HP 3 yd3		hm	0.0022	175.96	0.39
0349040034	TRACTOR DE ORUGAS DE 190-240 HP		hm	0.0035	338.98	1.19
0349080010	ZARANDA VIBRATORIA 4" X 6" X 14" MOTOR ELECTRICO 15 HP		hm	0.0088	51.35	0.45
0349090000	MOTONIVELADORA DE 125 HP		hm	0.0250	161.67	4.04
0349150000	GRUPO ELECTROGENO 116 HP 75 KW		hm	0.0088	140.22	1.23
0349180055	FAJA TRANSPORTADORA 18" X 40" M.E. 3 HP 150 ton/h		hm	0.0088	5.53	0.05



					17.51		
					Costo unitario por (m2):		
					25.77		
Partida	01.04	IMPRIMACIÓN ASFÁLTICA					
Código	Descripción / insumo			Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra							
0147010001	CAPATAZ			hh	0.0014	19.30	0.03
0147010003	OFICIAL			hh	0.0014	13.79	0.02
0147010004	PEÓN			hh	0.0084	12.43	0.10
							0.15
Materiales							
0213000037	ASFALTO RC 250			gal	0.2550	6.93	1.77
							1.77
Equipos							
0349040099	BARREDORA MECANICA 10 20 HP 7 P.LONG.			hm	0.0014	47.77	0.07
0349310007	CAMION IMPRIMADOR DE 2000 gl			hm	0.0014	142.26	0.20
							0.27
					Costo unitario por (m2):		2.18
Partida	01.05	PAVIMENTO DE CONCRETO ASFALTICO P-401					
Código	Descripción / insumo			Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra							
0147010001	CAPATAZ			hh	0.0333	19.30	0.64
0147010002	OPERARIO			hh	0.0667	16.08	1.07
0147010004	PEÓN			hh	0.2000	12.43	2.49
							4.20
Materiales							
0204000006	ARENA PARA CONCRETO ASFALTICO			kg	500.00	0.01	5.00
0205010064	PIEDRA CHANCADA PARA HORMIGON ASFALTICO			kg	1800.00	0.02	36.00
0213000033	POLIMERO MODIFICADO DE ASFALTO			kg	1.8100	33.22	60.13
0213000034	ACIDO POLIFOSFORICO (CATALIZADOR)			kg	0.1100	11.01	1.21
0213000035	CEMENTO ASFALTICO PEN 85-100			kg	144.00	2.90	417.60
							519.94
Equipos							
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		0.42	0.42
0349030021	RODILLO NEUMATICO AUTOPROPULSADO 135 HP 9-26 ton			hm	0.0333	124.96	4.16
0349030046	RODILLO TANDEM VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 111-130HP 9-11 ton			hm	0.0333	114.40	3.81
0349050035	PAVIMENTADORA SOBRE ORUGAS 105 HP			hm	0.0333	139.70	4.65
							13.04
					Costo unitario por (m3):		537.18
Partida	01.06	RIEGO DE LIGA					
Código	Descripción / insumo			Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra							
0147010003	OFICIAL			hh	0.0020	13.79	0.03
0147010004	PEÓN			hh	0.0060	12.43	0.07
							0.10
Materiales							
0213000036	ASFALTO PEN 85 100			gal	0.1200	6.93	0.83
							0.83
Equipos							
0349010002	COMPRESORA NEUMATICA 250-330 PCM, 87 HP			hm	0.0020	78.00	0.16
0349310007	CAMION IMPRIMADOR DE 2000 gl			hm	0.0020	142.26	0.28
							0.44
					Costo unitario por (m2):		1.37



ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS



Proyecto: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE LA PISTA DE ATERRIZAJE DE UN AEROPUERTO INTERNACIONAL EN LA REGIÓN DE PUNO
Sub presup. 02 - PAVIMENTO HIDRÁULICO Ubic. Puno - Puno - Puno



Partida	02.01	COMFORMACIÓN DE SUB BASE CON MATERIAL DE CANTERA	Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
		Mano de Obra				
0104010008		OPERARIO PRIMERA	hh	0.0050	16.08	0.08
0104010012		PEÓN	hh	0.0100	12.43	0.12
						0.20
		Materiales				
0293010573		MATERIAL DE CANTERA PARA SUB BASE	m3	1.0000	50.27	50.27
0293010574		AGUA	m3	0.0500	3.82	0.19
						50.46
		Equipos				
0305010028		PALA CARGAD.C/CONVERTIDOR 1,30 M3	hm	0.0050	178.78	0.89
0305010029		MOTONIVELAD. DE BASTIDOR >100 KW	hm	0.0040	279.05	1.12
0305010030		COMPACTA. VIBRAT. 1 CILINDRO AUTO.	hm	0.0130	118.68	1.54
0305010031		CAMIÓN BAÑERA BASCULANTE 12 M ³	hm	0.0360	235.10	8.46
0305010032		ESTABILIZADOR DE SUELOS INTEGRAL.	hm	0.0100	727.93	7.28
						19.30
						Costo unitario por (m3): 69.96

Partida	02.02	ESTABILIZACIÓN DE SUB BASE CON CEMENTO ASFÁLTICO P-401	Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
		Mano de Obra				
0147010001		CAPATAZ	hh	0.0172	19.30	0.33
0147010003		OFICIAL	hh	0.0057	13.79	0.08
0147010004		PEÓN	hh	0.1319	12.43	1.64
						2.05
		Materiales				
0220010005		CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal	0.7800	7.97	6.22
						6.22
		Equipos				
0337010001		HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		0.10	0.10
0348040003		CAMION CISTERNA 4 X 2 (AGUA) -122 HP 1,500 gl	hm	0.0075	131.56	0.99
0348040006		CAMION CISTERNA 4 X 2 (ASF) 178-210 HP 2,000 gl	hm	0.0250	156.80	3.92
0348040038		CAMION VOLQUETE 15 M3	hm	0.0039	258.61	1.01
0349030007		RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135HP 10-12 ton	hm	0.0250	149.49	3.74
0349040009		CARGADOR SOBRE LLANTAS 125 HP 2.5 yd3	hm	0.0027	150.34	0.41
0349040010		CARGADOR SOBRE LLANTAS 125-155 HP 3 yd3	hm	0.0022	175.96	0.39
0349040034		TRACTOR DE ORUGAS DE 190-240 HP	hm	0.0035	338.98	1.19
0349080010		ZARANDA VIBRATORIA 4" X 6" X 14" MOTOR ELECTRICO 15 HP	hm	0.0088	51.35	0.45
0349090000		MOTONIVELADORA DE 125 HP	hm	0.0250	161.67	4.04
0349150000		GRUPO ELECTROGENO 116 HP 75 KW	hm	0.0088	140.22	1.23
0349180055		FAJA TRANSPORTADORA 18" X 40" M.E. 3 HP 150 ton/h	hm	0.0088	5.53	0.05
						17.51
						Costo unitario por (m2): 25.77

Partida	02.03	LOSA DE CONCRETO f'c= 420 Kg/cm2	Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
		Mano de Obra				
0147000022		OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hh	0.0222	16.08	0.36
0147010001		CAPATAZ	hh	0.0222	19.30	0.43
0147010002		OPERARIO	hh	0.0667	16.08	1.07
0147010003		OFICIAL	hh	0.0667	13.79	0.92
0147010004		PEON	hh	0.0889	12.43	1.11
						3.88
		Materiales				
0221010042		CONCRETO PREMEZCLADO T. I f'c= 420 Kg/cm2	m3	1.0300	393.83	405.64
0229010041		CURADOR MENBRANIL	gal	0.0500	23.71	1.19
0230010002		POLIPROPILENO	kg	2.0000	15.34	30.68
						437.51
		Equipos				



0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		0.19	0.19
0349070003	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.50"	hm	0.0222	5.18	0.11
0349250008	PAVIMENTADORA DE CONCRETO	hm	0.0222	687.50	15.26
					15.57
Costo unitario por (m3):					456.96

Partida	02.04	ENCOFRADO PLANO				
Código	Descripción / insumo		Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra						
0147010002	OPERARIO		hh	1.0000	16.08	16.08
0147010003	OFICIAL		hh	1.0000	13.79	13.79
0147010004	PEON		hh	2.0000	12.43	24.86
						54.73
Materiales						
0221010042	ALAMBRE NEGRO RECOCIDO # 8		kg	0.3500	2.94	1.03
0202010023	CLAVOS PARA MADERA CON CABEZA DE 3"		kg	0.3500	3.36	1.18
0229010041	MADERA TORNILLO PARA ENCOFRADOS INCLUYE CORTE		p2	8.0000	3.78	30.24
0230010002	TRIPLAY LUPUNA 4X12		pl	0.0347	66.38	2.30
						34.75
Equipos						
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		1.64	1.64
						1.64
Costo unitario por (m2):					91.12	

Partida	02.05	ACERO CORRUGADO fy=4200 kg/cm2 GRADO 60				
Código	Descripción / insumo		Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra						
0147010002	OPERARIO		hh	0.0180	16.08	0.29
0147010003	OFICIAL		hh	0.0180	13.79	0.25
						0.54
Materiales						
0202110017	ALAMBRE NEGRO RECOCIDO # 16		kg	0.0060	2.94	0.02
0203020003	ACERO CORRUGADO fy=4200 kg/cm2 GRADO 60		kg	1.0950	2.29	2.51
						2.53
Costo unitario por (kg):					3.06	

Partida	02.06	JUNTAS LONGITUDINALES DE CONSTRUCCIÓN				
Código	Descripción / insumo		Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra						
0147010001	CAPATAZ		hh	0.0225	19.30	0.43
0147010002	OPERARIO		hh	0.2244	16.08	3.61
0147010003	OFICIAL		hh	0.0466	13.79	0.64
0147010004	PEON		hh	0.2244	12.43	2.79
						7.47
Materiales						
0221010042	ALAMBRE NEGRO RECOCIDO # 16		kg	0.1456	2.94	0.43
0202110017	ACERO LISO		kg	7.1700	3.00	21.51
0203020003	ACERO CORRUGADO fy=4200 kg/cm2 GRADO 60		kg	1.5288	2.29	3.50
0205010062	MATERIAL DE RESPALDO DE 3/4"		kg	1.0000	0.98	0.98
0230750114	SELLANTE ELASTOMERICO		gal	0.1160	24.00	2.78
0254160006	IMPRIMANTE ASFÁLTICO		gal	0.0067	17.30	0.12
						29.32
Equipos						
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		0.22	0.22
0337030020	CORTADORA DE PAVIMENTO		hm	0.1778	28.63	5.09
						5.31
Costo unitario por (m):					42.10	

Partida	02.07	JUNTAS DE CONTRACCIÓN				
Código	Descripción / insumo		Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra						
0147010001	CAPATAZ		hh	0.0180	19.30	0.35
0147010002	OPERARIO		hh	0.3133	16.08	5.04
0147010003	OFICIAL		hh	0.0466	13.79	0.64
0147010004	PEON		hh	0.3133	12.43	3.89
						9.92



Materiales					
020200007	ALAMBRE NEGRO RECOCIDO # 16	kg	0.1456	2.94	0.43
0202110017	ACERO LISO	kg	7.1700	3.00	21.51
0203020003	ACERO CORRUGADO fy=4200 kg/cm2 GRADO 60	kg	1.5288	2.29	3.50
0205010062	MATERIAL DE RESPALDO DE 3/4"	m	1.0000	0.98	0.98
0230750114	SELLANTE ELASTOMERICO	gal	0.1160	24.00	2.78
0254160006	IMPRIMANTE ASFÁLTICO	gal	0.0067	17.30	0.12
					29.32
Equipos					
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		0.30	0.30
0337030020	CORTADORA DE PAVIMENTO	hm	0.1333	28.63	3.82
					4.12
Costo unitario por (m):					43.36
Partida	02.08	JUNTAS DE AISLAMIENTO			
Código	Descripción / insumo	Unid.	Cantidad	Precio S/.	Parcial
Mano de Obra					
0147010001	CAPATAZ	hh	0.0178	19.30	0.34
0147010003	OFICIAL	hh	0.3556	13.79	4.90
0147010004	PEON	hh	0.3556	12.43	4.42
					9.67
Materiales					
0205010062	MATERIAL DE RESPALDO DE 3/4"	m	1.0000	0.98	0.98
0230750114	SELLANTE ELASTOMERICO	gal	0.1160	24.00	2.78
0239300003	TECNOPORT 3/4"	m2	0.2500	3.83	0.96
0254160006	IMPRIMANTE ASFÁLTICO	gal	0.0067	17.30	0.12
					4.84
Equipos					
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		0.29	0.29
					0.29
Costo unitario por (m):					14.79

Cabe mencionar que el análisis de precios unitario precedente corresponde a la ejecución de la obra: “Construcción del Aeropuerto de Chincheros – cusco”. Del cual se han extraído las partidas requeridas solo para la ejecución de la pista de aterrizaje, así mismo se han actualizado los precios de mano de obra al 2023.

4.12.1. Presupuesto pavimento flexible y rígido

Con los metrados del pavimento asfaltico realizados en la Tabla 56 para la pista de aterrizaje y los precios unitarios obtenidos, se procedió a calcular el costo directo total necesario para la construcción de a pista de aterrizaje tal como se muestra en la Tabla 58. Así mismo, con los metrados del pavimento hidráulico obtenidos en la Tabla 57 y los precios unitarios establecidos, se procedió a calcular el costo directo total necesario para la ejecución del pavimento rígido como se muestra en la Tabla 59.

Tabla 58

Presupuesto de pavimento flexible

PAVIMENTO FLEXIBLE					
Ítem	Descripción	Und.	Metrado	Precio	Parcial S/.
1	Pista de aterrizaje				28260359.1
1.1	Subbase granular P-154	m3	57187.2	88.24	4037068.6
1.2	Conformación de base con material de cantera	m3	28593.6	69.96	2000452.3
1.3	Estabilización de base con cemento asfáltico	m2	190624.0	25.77	4913314.3
1.4	Imprimación Asfáltica	m2	190624.0	2.18	416309.5
1.5	Pavimento de concreto asfáltico en caliente P-401	m3	28593.6	537.18	10240003.8
1.6	Riego de liga	m2	381248.0	1.37	523941.5
2	Margen de la pista de aterrizaje				6260443.4
2.1	Subbase granular P-154	m3	6034.5	88.24	532498.8
2.2	Conformación de base con material de cantera	m3	9051.8	69.96	633274.4
2.3	Estabilización de base con cemento asfáltico	m2	60345.0	25.77	1555386.3
2.4	Imprimación Asfáltica	m2	60345.0	2.18	131789.3
2.5	Pavimento de concreto asfáltico en caliente	m3	6034.5	537.18	3241632.9
2.6	Riego de liga	m2	120690.0	1.37	165861.9
COSTO DIRECTO					28391533.5

Nota: En la presente tabla se muestra el presupuesto para la opción de pavimento flexible.

Tabla 59

Presupuesto pavimento rígido

PAVIMENTO RÍGIDO					
Ítem	Descripción	Und.	Metrado	Precio	Parcial S/.
1	Pista de aterrizaje				44501251.7
1.1	Conformación de subbase con material de cantera	m3	28593.6	69.96	2000452.3
1.2	Estabilización de subbase con asfalto	m2	190624.0	25.77	4913314.3
1.3	Losa de concreto $f'c= 420 \text{ Kg/cm}^2$	m3	66718.4	456.96	32926700.8
1.4	Encofrado plano	m2	43459.2	91.12	3959932.2
1.5	Acero corrugado $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ grado 60	kg	4295.1	3.06	13155.2
1.6	Juntas longitudinales de construcción	m	8560.0	42.10	360408.9
1.7	Juntas de contracción	m	63766.0	43.36	2764734.5
1.8	Juntas de aislamiento	m	106.0	14.79	1568.2
2	Margen de la pista de aterrizaje				8511309.6
2.1	Conformación de subbase con material de cantera	m3	9051.8	69.96	422182.9
2.2	Estabilización de subbase con asfalto	m3	60345.0	25.77	1555386.3
2.3	Losa de concreto $f'c= 420 \text{ Kg/cm}^2$	m2	9051.8	456.96	4136293.9
2.4	Encofrado plano	m3	14688.6	91.12	1338401.5
2.5	Acero corrugado $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ grado 60	kg	2592.4	3.06	7940.1
2.6	Juntas longitudinales de construcción	m	8240.0	42.10	346935.7
2.7	Juntas de contracción	m	16241.0	43.36	704169.2
COSTO DIRECTO					55451576.1

Nota: En la presente tabla se muestra el presupuesto para la opción de pavimento rígido.



El costo de construcción de la pista de aterrizaje con pavimento flexible utilizando la metodología de la FAA, es S/. 28,391,533.5 y utilizando la metodología de la OACI es de S/. 28,961,204.9.

El costo de construcción de la pista de aterrizaje usando la alternativa de pavimento rígido con la metodología de la FAA, es S/.55,451,576.1 y con la metodología de la OACI es de S/.56,671,083.6.

4.13. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez calculado el costo de ambas propuestas de diseño, se obtuvo que el pavimento asfáltico requiere para su construcción un presupuesto que asciende a S/.34,520,802.5, superado ampliamente por el pavimento de concreto hidráulico, el cual alcanza una suma de S/.53,223,652.7; por lo que la elección de la mejor alternativa de pavimento para el aeropuerto considerando únicamente el factor económico para su ejecución es la opción de pavimento flexible.

Lo anterior esta concordancia con lo señalado con Coaquira y Conza (2020) en que la mejor opción para utilizar es el pavimento flexible esto debido q que se minimiza los costos de construcción.

Sin embargo, considerando que el movimiento aeronaves antes del despegue es lento y/o estacionario, es decir, permanecerán en esta superficie un tiempo más prolongado generando cargas lo que anterior podría generar en el largo plazo, deterioros más agresivos en una superficie de pavimento flexible. Además, considerando que en la zona en estudio existen precipitaciones fluviales altas y también se advierte la presencia de heladas los cuales tendrán incidencia en el pavimento. Por lo anterior, considero que es más conveniente que la pista de aterrizaje del aeropuerto sea construida utilizando pavimento de concreto hidráulico. Esta propuesta respalda lo señalado por Barragán

(2015), quien sostuvo que a pesar de que la opción de pavimento flexible es más económica al inicio, esto se podría revertir con el paso de los años debido a los costos de mantenimiento, afirma que la opción de pavimento rígido sería la más óptima para el largo plazo. Y si además consideramos que estamos en una región con un clima frío, se propone como opción final para la pista de aterrizaje de un aeropuerto la utilización de pavimento rígido compuesto por:

Tabla 60

Propuesta para la pista de aterrizaje

Componente	Material para las capas
Pista de aterrizaje	P-501 Concreto de Cemento Portland
	P-401 Capa subbase estabilizada

Nota: se muestra la propuesta final de pavimento.

Por otro lado, los resultados del estudio pluviométrico, permitieron encontrar valores de precipitación máxima en 24 h altos en los meses de diciembre, enero, febrero y abril; por lo que en dichos meses se deberán tomar las precauciones debidas para la ejecución del pavimento. Añadido a lo anterior, esta investigación está en concordancia con lo señalado por Gonzales y Delgado (2019), quien sostiene que una subrasante con un CBR entre 12 y 14% no es muy necesario realizar el mejoramiento de este. Por lo que se puede afirmar que la subrasante está en la categoría de regular con la condición de resistencia media.

4.14. VALIDEZ DE LAS HIPÓTESIS

a. De las hipótesis específicas

Del primer objetivo específico: Realizar los estudios previos al diseño del pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto en la región de Puno tales como el estudio de vientos, el estudio de suelos, el estudio pluviométrico y el estudio de tráfico;



para obtener los datos de entrada para el diseño estructural del pavimento. Se realizaron los estudios previos al diseño de pavimentos aeroportuario de los cuales se desprende:

En el estudio de suelos se realizaron 6 calicatas a cielo abierto en la subrasante de la pista de aterrizaje del Aeropuerto de Ventilla, obteniéndose como resultado valores de CBR al 95% de la máxima densidad seca de 13.5%, 11.4%, 13.2%, 16.7%, 15.6%, 14.3%. de los cuales, y siendo conservador en la elección del CBR de diseño, se ha optado por elegir el menor valor, es decir se realizaron los diseños considerando una capacidad portante de la subrasante de 11.4%. En el estudio de tráfico se realizó un análisis exhaustivo y selección de las aeronaves que se han proyectado para operar regularmente en el nuevo aeropuerto obteniendo se las siguientes: Airbus320, Airbus320N, Boeing717, Boeing727, Boeing737-200, Boeing737-800, Embraer190, BAE146-200 y BAE 146-300. En el estudio de vientos se ha determinado la mejor orientación de la pista de aterrizaje en función a los vientos predominantes, del cual se desprende que la mejor orientación para la pista del aeropuerto es O 5° N.

Por lo tanto, según lo precedente, se valida la primera hipótesis específica: Los estudios previos al diseño del pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto en la región de puno tales como el estudio de vientos, el estudio de suelos, el estudio pluviométrico y el estudio de tráfico; nos permitirá obtener los datos de entrada para el diseño estructural del pavimento.

Del segundo objetivo específico: Diseñar el pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto, aplicando el método de la OACI para pavimento flexible y rígido. Se realizo el diseño del pavimento aeroportuario utilizando los estándares y procedimiento establecido por la OACI, obteniendo como resultado un pavimento flexible conformado por 10 cm de mezcla asfáltica en caliente (P-401), 21.77cm de base estabilizada con



asfalto (P-403), y 20.32 cm de subbase granular (P-154); con un costo requerido para su ejecución de S/. 28,961,204.9. Y un pavimento rígido conformado por 39.20 cm de losa de concreto (P-501) y 15 cm de subbase estabilizada con asfalto (P-403); con un costo de S/.56,671,083.6.

Por lo tanto, según el párrafo precedente, se valida la segunda hipótesis específica: El método de diseño empírico de la OACI, utiliza básicamente la experiencia del desempeño de pavimentos en servicio, realizando varias simplificaciones.

Del tercer objetivo específico: Diseñar el pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto, aplicando el método de la FAA para pavimento flexible y rígido. Se realizó el diseño del pavimento aeroportuario utilizando el procedimiento establecido por la FAA, el cual incluye el uso del software FAARFIELD, obteniendo como resultado un pavimento flexible conformado por 10 cm de mezcla asfáltica en caliente (P-401), 15 cm de base estabilizada con asfalto (P-403), y 24 cm de subbase granular (P-154); con un costo requerido para su ejecución de S/. 28,391,533.5. Y un pavimento rígido conformado por 37.80 cm de losa de concreto (P-501) y 15 cm de subbase estabilizada con asfalto (P-403); con un costo de S/.55,451,576.1.

Por lo tanto, según lo precedente, se valida la tercera hipótesis específica: El método mecánico - empírico de la FAA se acercan más a la realidad, optimizando espesores y reduciendo costos; por lo tanto, es el más óptimo en su aplicación.

Del cuarto objetivo específico: Determinar el método de diseño más apropiado en base al planteamiento, modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta estructural, modo de falla y espesores obtenidos de la aplicación de los métodos de la OACI y FAA. En base al análisis comparativo de los métodos en base a parámetros como el planteamiento, modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta



estructural y modelo de falla; se obtiene que el método de la OACI tanto para pavimento flexible como rígido presenta múltiples simplificaciones en su análisis concepción y diseño, generando mayor probabilidad al error.

Por lo tanto, según el párrafo anterior, se valida la cuarta hipótesis específica: En cuanto a planteamiento, modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta estructural, modo de falla y espesores obtenidos el método de la FAA es el más preciso. Los resultados de la aplicación del método de la FAA son menores en comparación con el método de la OACI.

Del quinto objetivo específico: Realizar un análisis de sensibilidad de cada uno de los parámetros que intervienen en el diseño de pavimento a la vida útil de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de Puno. Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar cuál de las siguientes variables para pavimento flexible: módulo HMA, espesor de la capa de HMA, espesor de base, espesor de subbase, peso bruto de la aeronave crítica; y para pavimento rígido: resistencia a la flexión del concreto (MPa), espesor de la losa PCC (cm), espesor de subbase (cm) y peso bruto de la aeronave Boeing 727-200. Encontrándose que la vida útil de un pavimento flexible aeroportuario es más sensible al peso bruto de la aeronave crítica de diseño y menos sensible al módulo de la mezcla asfáltica en caliente de la carpeta de rodadura. Así mismo la vida útil de un pavimento rígido aeroportuario es más sensible al espesor de la losa de concreto y menos sensible al espesor de la subbase.

Por lo tanto, según el párrafo anterior, se valida la quinta hipótesis específica: Un análisis de sensibilidad de cada uno de los parámetros que intervienen en el diseño de pavimento de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de Puno, nos permitirá conocer que parámetro tiene más influencia en la vida útil del pavimento.



b. De la hipótesis general

El objetivo general establece: Realizar el análisis comparativo del método empírico de la OACI frente al método mecánico - empírico de la FAA para el diseño de pavimento flexible y rígido de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de puno en cuanto a espesores del pavimento y costos de construcción. Se realizó el diseño del pavimento aeroportuario utilizando el procedimiento establecido por la OACI y la FAA obteniendo una leve variación en el espesor total del 5.9% para pavimento flexible y 2.6%. para pavimento rígido. Además, en con la utilización del método de la FAA se genera un ahorro de S/.569,671.40 con el uso de pavimento flexible y S/.1,219,507.50 con el uso de pavimento rígido.

Por lo tanto, se valida la hipótesis general que indica: El análisis comparativo del método empírico de la OACI frente al método mecánico - empírico de la FAA para el diseño de pavimento flexible y rígido de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de puno nos permitirá conocer cuál de los dos métodos resulta más óptimo para utilizarse según los criterios de espesores del pavimento y costos de construcción.



V. CONCLUSIONES

PRIMERA: Se diseñó estructuralmente el pavimento flexible y rígido de la pista de aterrizaje de un aeropuerto en la región de Puno utilizando el método empírico de la OACI y el método mecánico empírico de la FAA. Se realizó el diseño tanto de pavimento flexible como de pavimento rígido. Dando como resultado una leve variación en el espesor total del 5.9% para pavimento flexible y 2.6% para pavimento rígido. Además, con el uso del método de la FAA se genera un ahorro de S/.569,671.40 en pavimento flexible y S/.1,219,507.50 en pavimento rígido.

SEGUNDA: Del estudio de vientos se encontró que en la zona de estudio la velocidad viento entre 0.50 y 2.10 m/s es el 47.2 % del total; entre 2.10 y 3.60 m/s es el 24.90 %; entre 3.60 y 5.70 m/s es el 20.7 %; entre 5.70 y 8.80 m/s es el 5.2 %; y entre 8.80 y 11.10 m/s es el 0.2 %. Por lo que, los vientos que generan perjuicio representan solo el 0.2 % cumpliendo el requisito establecido por la DGAC. De la rosa de vientos obtenida se afirma que la mejor orientación para la pista de aterrizaje será O 5° N. Del estudio de suelos de subrasante en 6 calicatas a lo largo de la pista de aterrizaje se obtuvo valores de CBR al 95% de la máxima densidad seca de 13.5%, 11.4%, 13.2%, 16.7%, 15.6%, 14.3%. Del estudio pluviométrico, la precipitación máxima en 24 h de los últimos 30 años es de 18.6 mm. Del estudio de tráfico, las aeronaves de diseño fueron: Airbus320, Airbus320N, Boeing717, Boeing727, Boeing737-200, Boeing737-800, Embraer190, BAE146-200 y BAE 146-300; mostrándose las características de todas ellas en las Tablas 23 y 24.



TERCERA: El método empírico de la OACI en pavimento flexible se basa en la teoría de Boussinesq para una capa homogénea y uniforme, todo el tráfico debe ser convertido a salidas anuales equivalentes de una sola aeronave. Considera la carga equivalente de una sola rueda (ESWL) de la aeronave de diseño. Su modelo de falla se basa en 1 pulg de levantamiento (falla por corte en la subrasante) fuera de la ruta del tráfico o agrietamiento (en la capa HMA hasta ya no es impermeable). Realiza el diseño utilizando ábacos. Obteniéndose por este método un pavimento flexible compuesto por 10 cm de mezcla asfáltica en caliente, 21.77cm de base estabilizada con asfalto, y 20.32 cm de subbase granular. El método de la OACI para pavimento rígido se basa en las teorías de Westergaard, plantea que el pavimento es una losa delgada sostenida por una subrasante winkleriana. Considera como modo de falla el agrietamiento por fatiga, cuando al menos el 50 % de las losas contienen grietas debido a las cargas. Realiza el diseño del pavimento utilizando ábacos. Obteniendo se por este método un pavimento rígido compuesto por 39.20 cm de losa de concreto y 15 cm de subbase estabilizada con asfalto.

CUARTA: El método de la FAA para pavimento flexible utiliza un modelo de sistema de capas elásticas con propiedades definidas por E y ν . El modelo de tráfico considera todas las aeronaves de diseño. La respuesta estructural del pavimento se determina con un análisis elástico de capas. Considera 2 puntos críticos de falla: deformación por tracción en la parte inferior de la capa de rodadura y la deformación por compresión en la parte superior de la subrasante. Realiza el diseño utilizando el software FAIRFIELD. Obteniéndose por este método un pavimento flexible compuesto por 10



cm de mezcla asfáltica en caliente, 15cm de base estabilizada con asfalto, y 24 cm de subbase granular. El método de la FAA para pavimento rígido utiliza un enfoque basado en la teoría de elementos finitos. El modelo tráfico considera todas las aeronaves de diseño. La respuesta estructural del pavimento depende de su espesor, composición, las propiedades de los y la resistencia de la subrasante sobre la cual se construye el pavimento. Considera como modelo de falla el agrietamiento estructural de profundidad total que resulta de la fatiga de la losa inducida por las cargas. Realiza el diseño utilizando el software FAIRFIELD. Obteniendo se por este método un pavimento rígido compuesto por 37.80 cm de losa de concreto y 15 cm de subbase estabilizada con asfalto.

QUINTA: Se concluye que basado en el planteamiento, modelo matemático, modelo de tráfico, carga de diseño, respuesta estructural, modo de falla y diseño del espesor el método de la FAA es el más preciso y adecuado para utilizar en el caso del aeropuerto de Ventilla. Además de que al incluir la parte mecánica en los diseños son menos conservadores reduciendo así los espesores y optimizando de esta manera los costos.

SEXTA: Se realizó un análisis de sensibilidad a la vida útil del pavimento, de cada parámetro de diseño; dando como resultado que para un pavimento flexible del aeropuerto de Ventilla el espesor de la base tiene una sensibilidad de 13.9, el tráfico 13.7, el espesor de la carpeta de rodadura 6.4, el espesor de la subbase 5.3 y el módulo de HMA de 2.5. Y para pavimento rígido el espesor de la losa de concreto tiene una sensibilidad de 49.7, la resistencia a la flexión del concreto 29.2, el tráfico 10.1 y el espesor de la subbase con una sensibilidad de 0.3.



VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda realizar más investigaciones dentro de la línea de diseño estructural de pavimentos aeroportuarios con enfoques más exactos como los métodos mecánicos – empíricos y además cumpliendo con todos estándares de diseño nacionales e internaciones, debido a que es la única forma de asegurar diseños adecuados, confiables y seguros.

SEGUNDA: Se recomienda realizar los estudios previos conforme lo establece la OACI. Así mismo, se recomienda manejar información completa y actualizada de las aeronaves de diseño para un mejor análisis y proyección del tráfico aéreo, de esa manera se estará asegurando que nuestros diseños cumplan su vida de servicio. Para los cálculos del estudio de suelos se recomienda contar con planillas automáticas de tal manera que se pueda reducir el margen de error.

TERCERA: Se recomienda reducir el uso de métodos empíricos como el método de la OACI para el diseño de pavimentos aeroportuarios debido a que estos utilizan modelos analíticos simples, realizan múltiples simplificaciones y no son adaptable a mejoras en el futuro. Por ello decimo que estos métodos a día de hoy son obsoletos.

CUARTA: Se recomienda utilizar más los métodos mecánicos – empíricos como el método de la FAA para el diseño de pavimentos aeroportuarios, debido a que estos se acercan más a la realidad pues combina un procedimiento mecánico con características medibles para determinar la respuesta estructural del pavimento y conservando el procedimiento empírico para convertir esta respuesta estructural en daño o deterioro en el pavimento.



- QUINTA:** Se recomienda usar para cada capa de los pavimentos, los materiales establecidos por la FAA, debido a que solo de esta manera se podrá garantizar la calidad respectiva de las estructuras. Además, se recomienda realizar verificaciones de esfuerzos, deformaciones y deflexiones de las estructuras de pavimento con softwares como el bisar 3.0 para pavimento flexible o Everfe 2.26 para pavimento rígido.
- SEXTA:** Se recomienda tener mucho criterio con las variables que intervienen en el diseño de pavimentos, y aún más con tráfico adoptado debido a que el peso de una aeronave es variable más influyente al momento de dimensionar estructuralmente un pavimento.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AC 150/5320-6G de 2021. [Federal Aviation Administration]. *Evaluación y diseño de pavimentos aeroportuarios*. 7 de junio del 2021. Traducción propia.
https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/1039843
- AC 150/5320-6F de 2016. [Federal Aviation Administration]. *Evaluación y diseño de pavimentos aeroportuarios*. 10 de noviembre del 2021.
https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/1039843
- AC 150 / 5370-10H de 2018. [Federal Aviation Administration]. *Especificaciones estándar para la construcción de aeropuertos*. 21 de diciembre 2018.
https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentnumber/150_5370-10
- Anexo 14 de 2016. [Organización de Aviación Civil Internacional]. *Volumen I Diseño y operaciones de aeródromos*. Julio de 2006.
<https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-14-vol-i.pdf>
- Borja, M. (2016). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*.
<https://studylib.es/doc/8929463/metodologia-de-investigacion-cientifica-para-ingenieros>
- Bórquez, M. (2014). *Diseño de la estructura de pavimento de la pista del aeródromo de Panguipulli* [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile].
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcib736d/doc/bmfcib736d.pdf>



- Chui-Kan, T. y Llerena, J. (2020). *Comparación Entre el Concreto Asfáltico y el Concreto Hidráulico en Pavimentos Aeroportuarios* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/3688>
- Coaquira, W. y Conza, B. (2020). *Diseño de pavimentos de la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional de la Joya* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/11353/ICcohub%26cosuwl.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fernandez, P. (2021). Guía de diseño para determinar pavimentos flexibles aeroportuarios, según la administración federal de aviación (FAA) [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma].
- García, G. (2014). *Diseño de pavimentos para aeropistas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://docplayer.es/62531224-Universidad-nacional-autonoma-de-mexico-facultad-de-ingenieria-diseno-de-pavimentos-para-aeropistas-t-e-s-i-s-que-para-obtener-el-grado-de.html>
- Guerra, D. (2020). Análisis del comportamiento de tensiones máximas inducidas en pavimentos rígidos debido al reemplazo parcial de losas [Artículo, Universidad Santo Tomás, Colombia].
- Gonzales, J. y Delgado, J. (2019). *Diseño del pavimento en el área de movimiento del aeropuerto Mórrope - Lambayeque* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/USSS_7ea48f2402553c8d1d71aa6dd5e214eb
- Horonjeff, R. Y McKelvey, F. (2010). *Planning and Design of Airports*. The McGraw-Hill Companies. Traducción propia. https://www.academia.edu/33106195/Planning_and_Design_of_Airpor



- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. University of Kentucky. Traducción propia. <https://docer.com.ar/doc/nxn5ec>
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos*. Universidad Católica de Colombia. <https://samustuto.files.wordpress.com/2014/09/ingenieric3ada-de-pavimentos-para-carreteras-tomo-i-ed-3ra-alfonso-montejo-fonseca.pdf>
- Nur, A. (2022). Life Cycle Cost Analysis on Airport Pavement Design with Different Types of Materials [Artículo, Universidad de Ingeniería y Tecnología de Bangladesh].
- Parte 1 - Pistas de 2006. [Organización de Aviación Civil Internacional]. *Manual de diseño de aeródromos*. 2006. https://www.academia.edu/32440154/Manual_de_dise%C3%B1o_de_aer%C3%B3dromos_Parte_1_Pistas_1
- Parte 2 - Calles de rodaje, plataformas y apartaderos de espera de 2005. [Organización de Aviación Civil Internacional]. *Manual de diseño de aeródromos*. 2005. <https://es.slideshare.net/DuarteRJ/doc9157part2-taxiways-apronesp2005>
- Pedraza, F. (1970). *Aeropuertos*. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial de España. <https://www.abebooks.com/Aeropuertos-L%C3%B3pez-Pedraza-Munera-F-Parainfo/30695463634/bd>
- Pinto, T. (2020). Difference between Pavement Thickness Design and Pavement Life Prediction for Rigid Aircraft Pavements [Artículo, University of the Sunshine Coast, Australia].
- Quintero, R. (2011). *Diseño de estructuras de pavimento flexible para aeropuertos* [Tesis de postgrado, Universidad Santo Tomás de Aquino – Unidad de Postgrados]. https://www.academia.edu/8909847/Diseno_Pavimentos_Flexibles_Aeropuertos_Presentacion



- RAP 314 de 2021. [Ministerio de Transportes y Comunicaciones]. *Aeródromos Volumen I Diseño y Operaciones de Aeródromos*. 21 de octubre de 2021.
<https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/321330-rap-314-aerodromos>
- R.D. N° 18 - 2016 - MTC/14 de 2017. [Ministerio de Transportes y Comunicaciones]. *Manual de ensayo de materiales*. Lima, junio del 2017.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- Roel, K. (2018). *Diseño del pavimento de un aeropuerto internacional de pisco* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/10191>
- Rolland, D. (2018). *Pavimentos aeronáuticos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México].
https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=BJW93p&q=Pavimentos_aeron%C3%A1uticos&t=search_0&as=0&d=false&a=1&v=1
- Siviruero, D. (2019). *Relación entre el diseño estructural de pavimentos aeroportuarios y el costo - efectividad de construcción* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Los Andes]. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/925>
- Tamagusko, T. (2020). Airport Pavement Design [Artículo, University of Coimbra, Portugal].
- Villavicencio, J. y Castillo, M. (2016). *Diseño de pavimento rígido o flexible, para plataforma de parqueo de avión Airbus 330 – 200, ubicado en el aeropuerto “José Joaquín de Olmedo”, Guayaquil* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil].
http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/15340/1/VILLAVICENCIO_HERRERA_TRABAJO_TITULACION_VIAS_NOVIEMBRE_2016.pdf



Volumen 5.2. Análisis de Costos Unitarios de 2013. [Pro - Inversión]. *Estudio De Preinversión A Nivel De Factibilidad.* septiembre de 2013.

<https://es.scribd.com/document/414414517/Vol-5-2-Analisis-de-costos-unitarios-pdf>

VOLUMEN II de 2017. [Ministerio de Comercio Exterior y Turismo]. *Guía de orientación al usuario del transporte aéreo,* junio del 2015.

<https://repositorio.promperu.gob.pe/handle/123456789/2913>



ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia y operacionalización de variables

Anexo 2. Meteorología

Anexo 3. Registro de exploración de calicatas

Anexo 4. Ensayos de suelos

Anexo 5. Planos



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Sergio Elar Coila Mayta,
identificado con DNI 75497827 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" Análisis comparativo del diseño de pavimentos de la pista
de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la
región de Puno "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 17 de Junio del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Sergio Elías Coila Mayta
identificado con DNI 75497827 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ Análisis comparativo del diseño de pavimentos de la pista de aterrizaje de un aeropuerto internacional en la región de Puno ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia: Creative

Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 17 de Junio del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella