



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Análisis de sensibilidad de variables para evaluar el desempeño de pavimentos rígidos para aeropuertos, diseñados por el método de la FAA.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Civil

Autora:

Giovanna Janneth Bravo Palacios

CI: 0106025836

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, M.Sc. Ph.D

CI:0301500476

Cuenca, Ecuador

Abril, 2019



Resumen:

El presente trabajo de investigación consistió en realizar un análisis de sensibilidad de variables en el diseño de pavimentos rígidos para aeropuertos, mediante la variación y combinación de distintos parámetros de entrada relacionados con la calidad de los materiales y caracterización del tráfico. Para el caso de los materiales, éstos se definieron en función de lo establecido por la FAA y la MOP, por otra parte los parámetros relacionados con el tráfico aéreo están constituidos por la caracterización de dos aeropuertos que abastecen las solicitudes actuales de transporte en el país, estos parámetros se definieron con el fin de realizar un análisis cuyas variables de entrada se ajusten a las necesidades del medio. Del análisis de sensibilidad se obtendrán las variables que influyen mayoritariamente en el diseño de pavimentos rígidos, para a partir de éstas establecer un modelo que permita diseñar estructuras de pavimento de manera práctica y confiable.

Para evaluar el desempeño de los diseños obtenidos se aplicará un análisis integral, por lo que se establecieron tres ámbitos de estudio: estructural, económico y ambiental; de esta evaluación integral se podrá definir la funcionalidad, seguridad y sustentabilidad de los diseños propuestos, en base al análisis de esfuerzos y deformaciones, costos e impacto ambiental.

Palabras claves: Análisis de sensibilidad. Pavimentos rígidos.
Caracterización de tráfico. Sustentabilidad. Esfuerzos.



Abstract:

The following investigation consists in analyzing the sensibility of variables in the design of rigid pavements for airports, by varying and combining input parameters related to the quality of materials and traffic characterization. In the case of materials, these were defined according to the provisions of the FAA and the MOP, in order to establish an analysis that meets the needs of the environment, on the other hand the parameters related to air traffic are constituted by the characterization of two airports that supply the current requests for transport in the country. From the sensitivity analysis we will obtain the variables that mainly influence the design of rigid pavements, from which to establish a model that allows to design pavement structures in a practical and reliable way. To evaluate the performance of the designs obtained, analyzes will be applied in an integral manner, for which three study areas were established: structural, economic and environmental. In the case of structural analysis, the stresses and deformations to which the structure is subjected to different depths of the layers were determined; while in the economic analysis a life cycle cost analysis (LCCA) was applied, to determine the costs of the designs determined from the beginning until the end of its useful life, finally for the environmental analysis it applied a life cycle analysis (LCA), where the greenhouse gas emissions of the designs were established. From this integral evaluation, the functionality, safety and sustainability of the proposed designs can be defined with the mathematical model.

Keywords: Sensitivity analysis. Rigid pavements. Traffic characterization. Sustainability. Stresses.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	16
1.1	Antecedentes.....	16
1.2	Problemática	17
1.3	Justificación	18
1.4	Objetivos.....	18
1.4.1	General	18
1.4.2	Específicos	18
1.5	Alcance	19
2	MARCO TEÓRICO.....	20
2.1	Diseño de Pavimentos Rígidos, según la FAA.....	20
2.1.1	Método de diseño: Aeroplano Equivalente	25
2.1.2	Método de diseño: Falla por Daño Acumulativo	26
2.1.3	Diseño de pavimentos rígidos con software validado por la FAA.....	27
2.2	Análisis estadístico	30
2.2.1	Análisis de varianza	30
2.3	Evaluación del desempeño del pavimento.....	36
2.3.1	Análisis estructural.....	36
2.3.2	Análisis económico	41
2.3.3	Análisis de impacto ambiental	43
3	METODOLOGÍA	45
3.1	Obtención de los diseños de pavimento rígido usando el software validado por la FAA.....	45



3.1.1	Parámetros de entrada	45
3.1.2	Definición de rangos y valores para el análisis	47
3.1.3	Obtención de los diseños, parámetros de salida software FAARFIELD	49
3.2	Análisis de varianza de los diseños obtenidos, ANOVA de una vía.....	57
3.2.1	Determinación de la significancia de las variables en el diseño del pavimento, utilizando el software SAS (Statistical Analysis Software).....	57
3.2.2	Obtención de un modelo matemático para determinar el espesor de las capas del pavimento.....	60
3.3	Evaluación del desempeño de los diseños obtenidos	60
3.3.1	Análisis estructural con software	60
3.3.2	Análisis económico	50
3.3.3	Análisis de impacto ambiental	53
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	54
4.1	Obtención de los diseños con FAARFIELD	54
4.2	Análisis estadístico de los diseños obtenidos	55
4.2.1	Determinación de la significancia de las variables en el diseño del pavimento, utilizando el software JMP.....	55
4.2.2	Definición y selección de un modelo matemático que permita predecir el espesor de la capa de rodadura.....	58
4.3	Evaluación del desempeño de los diseños	59
4.3.1	Análisis estructural.....	59
4.3.2	Análisis económico	72
4.3.3	Análisis de impacto ambiental	73
5	CONCLUSIONES	74
5.1	Conclusiones.....	74
5.2	Recomendaciones	78



5.3 Futuras líneas de estudio.....	78
6 ANEXOS	80
Anexo 1: combinaciones posibles de diseño para cada aeropuerto	80
Anexo 2: diseños obtenidos con FAARFIELD.....	82
Anexo 3: Parámetros de entrada y salida para el análisis de varianza	86
Anexo 4: Parámetros de entrada utilizados en la primera aproximación del modelo (espesor PCC)	90
Anexo 5: Parámetros de entrada utilizados y espesores obtenidos del modelo final.....	94
Anexo 6: Detalle de la estructura de pavimento obtenida en FAARFIELD y con el Modelo	98
Anexo 7: Detalle de los diseños que se evalúan estructuralmente	101
Anexo 8: Comparación del desempeño de los diseños (FAARFIELD vs. Modelo)	103
Aeropuerto A.....	103
Aeropuerto B.....	109
Anexo 9: Esfuerzos y deformaciones de los diseños seleccionados (FAARFIELD y Modelo).....	113
7 REFERENCIAS.....	125



LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Condiciones donde la subbase no es requerida, según la calidad de la subrasante [8].....	21
Tabla 2-2. Características de la subrasante, según el tipo de suelo [8].	22
Tabla 2-3. Factores de conversión para el cálculo del número de salidas equivalentes [1].....	26
Tabla 3-1. Capas y tipos de materiales que conforman el pavimento [8].....	45
Tabla 3-2. Caracterización de la flota para el aeropuerto A.	46
Tabla 3-3. Caracterización de la flota para el aeropuerto B.	46
Tabla 3-4. Materiales seleccionados para el diseño de pavimento rígido.	47
Tabla 3-5. Ejemplo de estructuras tipo obtenidas de las combinaciones de capas y variación del kValue de la subrasante.	49
Tabla 3-6. Categorización del MÓDULO DE LA BASE/SUBBASE ESTABILIZADA.	58
Tabla 3-7. Categorización del MÓDULO DE LA BASE/SUBBASE GRANULAR.	59
Tabla 3-8. Categorización del MÓDULO EFECTIVO DE LA SUBRASANTE.	59
Tabla 3-9. Categorización del Tráfico.	59
Tabla 3-10. Representación de resultados de la prueba ANOVA de una vía.	60
Tabla 3-11. Profundidades para el análisis estructural.	49
Tabla 3-12. Precios unitarios de los materiales [23].....	51
Tabla 3-13. Factores de emisión para los materiales usados en el diseño [19].	53
Tabla 4-1. Resumen de los diseños obtenidos.	54
Tabla 4-2. Contribución al daño por cada flota de aeropuerto	55
Tabla 4-3. Resumen de los parámetros utilizados en el análisis de varianza.	56
Tabla 4-4. Resultados obtenidos del análisis de varianza para el módulo base / subbase estabilizada.	56
Tabla 4-5. Resultados obtenidos del análisis de varianza para el módulo base / subbase granular.	56



Tabla 4-6. Resultados obtenidos del análisis de varianza del módulo efectivo (k) de la subrasante.	57
Tabla 4-7. Resultados obtenidos del análisis de varianza de la caracterización del tráfico.	57
Tabla 4-8. Resumen del ajuste del análisis de varianza para la capa de rodadura.	57
Tabla 4-9. Resultados obtenidos de la regresión con los datos crudos.	58
Tabla 4-10. Resultados obtenidos de la regresión con tratamiento de los datos de entrada.	59
Tabla 4-11. Detalle del ajuste.	59
Tabla 4-12. Estructura de pavimento combinación 28.	60
Tabla 4-13. Esfuerzos horizontales - combinación 28.	62
Tabla 4-14. Esfuerzos verticales - combinación 28.	63
Tabla 4-15. Deformación vertical - combinación 28.	63
Tabla 4-16. Análisis estructural - combinación 28 FAARFIELD.	66
Tabla 4-17. Análisis estructural - combinación 28 Modelo.	67
Tabla 4-18. Análisis de esfuerzos horizontales en la parte inferior de la losa.	68
Tabla 4-19. Deformaciones en la superficie e interface de la estructura de pavimento.	70
Tabla 4-20. Deformaciones en la superficie e interface de la estructura de pavimento.	70



LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Configuración del tren de aterrizaje tipo single gear aircraft [1].	23
Figura 2-2. Configuración del tren de aterrizaje tipo dual gear aircraft [1].	24
Figura 2-3. Configuración del tren de aterrizaje tipo dual tándem gear aircraft [1].	24
Figura 2-4. Posibilidades de configuración del tren de aterrizaje tipo wide body aircraft [1].	25
Figura 2-5. Condiciones de apoyo de una viga sobre una subrasante elástica [9].	28
Figura 2-6. Curva de diseño para estimar el espesor del pavimento rígido usando el análisis de Westergaard [1].	28
Figura 2-7. Modelo estructural y distribución de tensiones en las distintas capas del pavimento bajo la carga de un neumático [10].	29
Figura 2-8. Carga de esquina [17].	39
Figura 2-9. Carga de borde [17].	39
Figura 2-10. Carga interior. [17].	40
Figura 2-11. Condición del pavimento en el tiempo y su costo a través del tiempo [18].	41
Figura 3-1. Ambiente de trabajo de FAARFIELD.	50
Figura 3-2. Creación de un nuevo proyecto.	51
Figura 3-3. Definición del tipo de pavimento y sección para el proyecto.	51
Figura 3-4. Definición del tipo de pavimento y sección para el proyecto.	52
Figura 3-5. Ingreso de parámetros de entrada.	52
Figura 3-6. Ingreso de datos acerca de la caracterización del tráfico.	53
Figura 3-7. Ingreso de información acerca de la caracterización del tráfico.	54
Figura 3-8. Ingreso de la información acerca de la caracterización del tráfico.	54
Figura 3-9. Ingreso de información acerca de los materiales.	55
Figura 3-10. Ingreso de información acerca de los materiales.	55
Figura 3-11. Ingreso de información acerca de los materiales.	56
Figura 3-12. Ingreso de información acerca de los materiales.	56



Figura 3-13. Finalización del ingreso de parámetros.....	57
Figura 3-14. Obtención del diseño del pavimento.....	57
Figura 3-15. Página de inicio WESLEA.....	61
Figura 3-16. Ingreso de la caracterización de materiales.	61
Figura 3-17. Ingreso de la caracterización de tráfico.	62
Figura 3-18. Ingreso de puntos de análisis.	49
Figura 3-19. Resultados del análisis estructural.	50
Figura 3-20. Análisis del costo de ciclo de vida para las alternativas de diseño.....	52
Figura 3-21. Costo final de las alternativas.	52
Figura 3-22. Comparación de impacto ambiental combinación de diseño 17.....	53
Figura 4-1. Representación de los esfuerzos normales y profundidades para el análisis estructural.	60
Figura 4-2. Gráfica del esfuerzo normal en X para la combinación 28.....	61
Figura 4-3. Gráfica del esfuerzo normal en Y para la combinación 28.....	61
Figura 4-4. Gráfica del esfuerzo normal en Z para la combinación 28.	62
Figura 4-5. Deformación vertical del pavimento para la combinación 28.	63
Figura 4-6. Comparación de esfuerzos normales en X – combinación 28.	64
Figura 4-7. Comparación de esfuerzos en Y – combinación 28.....	65
Figura 4-8. Comparación de esfuerzos en Z – combinación 28.	65
Figura 4-9. Comparación de deformaciones - combinación 28.....	65
Figura 4-10. Análisis del costo de ciclo de vida para los diseños seleccionados del aeropuerto A.	72
Figura 4-11. Análisis del costo de ciclo de vida para los diseños seleccionados del aeropuerto B.....	72
Figura 4-12 Análisis de impacto ambiental para los diseños seleccionados del aeropuerto A.	73
Figura 4-13 Análisis de impacto ambiental para los diseños seleccionados del aeropuerto B.....	73
Figura 5-1. Módulo de reacción de la subrasante vs. espesor capa de rodadura.	76



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1. Funcionamiento de ANOVA unifactorial.	32
Ilustración 2-2. Representación de información de resultados prueba ANOVA.....	36



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, Giovanna Janneth Bravo Palacios en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de sensibilidad de variables para evaluar el desempeño de pavimentos rígidos para aeropuertos, diseñados por el método de la FAA", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de abril de 2019.

Giovanna Janneth Bravo Palacios

C.I: 0106025836



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Giovanna Janneth Bravo Palacios, autora del trabajo de titulación "Análisis de sensibilidad de variables para evaluar el desempeño de pavimentos rígidos para aeropuertos, diseñados por el método de la FAA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 22 de abril de 2019.

Giovanna Janneth Bravo Palacios

C.I: 0106025836



En primer lugar quiero agradecer a mis padres: Giovanni y Jeanneth, quienes con su cariño, esfuerzo, paciencia y apoyo incondicional me permitieron llegar hasta aquí, gracias por confiar en mí y permitirme escoger mi camino.

A mis cómplices: Sammy y Giovanni Jr, por su incondicionalidad, amor y paciencia.

A mis abuelitos: María, Elsita y Maurito por demostrarme e inculcar en mí que la preparación y trabajo nos permiten trascender como personas; los admiro siempre. Me siento afortunada de que la vida nos permitió compartir juntos este logro.

A mis tíos, tías, primos y primas que han estado presentes en cada paso y me han demostrado su cariño.

A mi eterno grupo de trabajo y estudio, se convirtieron en la familia que la ingeniería me dio, gracias por compartir conmigo y hacer llevadera esta carrera, que la amistad que creamos dure siempre.

A mis amigas y amigos, por estar ahí y hacer de esta etapa una gran experiencia.

Al ingeniero Daniel Mogrovejo por su tiempo, paciencia y guía constante en el desarrollo de este trabajo de titulación.



Este trabajo va dedicado a mis hermanos,
Sammy y Junior por ser la mayor alegría
y razón de seguir adelante; este es un
logro de los tres y para los tres.
Les amo infinitamente.



1 INTRODUCCIÓN

El diseño de pavimentos para aeropuertos se encuentra normado por la Federal Aviation Administration (FAA), entidad estadounidense que reglamenta y sistematiza aspectos de la aviación civil desde 1958, mediante procesos matemáticos que integran variables ambientales, estructurales y de tránsito con el objetivo de permitir que el diseñador establezca el espesor de las distintas capas que conforman la estructura del pavimento [1]. La gestión del transporte aéreo se enfoca en dos ejes fundamentales, que son: infraestructura y logística, que en caso de aprovechar al máximo estas temáticas, permitiremos brindar un servicio de calidad, funcional y seguro [2]. Generalmente los diseños de pavimentos se establecen sin realizar un análisis sobre la variación, influencia y sensibilidad de los parámetros de entrada, por lo que existirá la probabilidad de que la estructura proyectada por el diseñador no sea la más sustentable; por lo tanto en este proyecto de titulación se analizaron estadísticamente diseños obtenidos a partir de la variación de parámetros estructurales (módulos de los materiales) y variación de parámetros de tráfico (cargas, salidas anuales, entre otros) para determinar alternativas eficientes de diseños de pavimentos, en términos de desempeño estructural y económico, permitiendo así canalizar una metodología de gestión en la infraestructura de las pistas de aterrizaje; la eficiencia de las estructuras analizadas se definirá en términos de desempeño estructural y económico.

○ Antecedentes

En la actualidad el transporte de bienes y personas representa una necesidad socioeconómica de vital importancia, que debe ser abastecida de manera funcional y segura; un modo de transporte que ha evolucionado representativamente en los últimos años es el aéreo, debido a su rapidez y comodidad, por lo que éste debe mantenerse en continua actualización para suplir la demanda a lo largo de los años. Las solicitudes actuales de transporte requieren una optimización integral en los distintos modos de traslado, mediante la gestión en el servicio de cada medio de transporte y su combinación con otros, de modo que el usuario pueda recibir asistencia eficiente y sostenible. A pesar de que la mejora en el servicio de transporte aéreo sea una necesidad vigente, en América Latina no se ha podido solventar la misma, debido a la escasez de infraestructura, uso insuficiente de tecnología, falta de seguridad, entre otros. A partir



de esto la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), plantea una propuesta para la región, basada en desarrollar políticas públicas a largo plazo con un enfoque general, abordando temas de calidad de la infraestructura y logística, junto con la regulación eficaz de los servicios. Para esto es necesario aprovechar las ventajas de cada modo de transporte y su vinculación con el sistema integrado de movilidad tanto a nivel nacional como internacional, en este contexto, merece una atención particular el transporte aéreo, principal medio de conectividad local y global, esencial para la integración territorial y de desarrollo socioeconómico de los países [2].

○ **Problemática**

La región andina conformada por cinco países (Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela) ha sido la zona de mayor desarrollo de transporte aéreo a nivel de Latinoamérica y el Caribe, con una tasa de crecimiento anual promedio del 11.4% entre el 2006 y 2015. Uno de los factores principales que permitieron el desarrollo del tráfico aéreo de esta región es el incremento de conectividad por parte de aerolíneas de distintos países. A pesar de que la región andina es la más representativa en temas de crecimiento dentro de Latinoamérica, el Ecuador constituye únicamente el 6% de la evolución del tráfico histórico de la zona entre los años 2006 y 2015, esto se debe a distintos factores locales que afectan directamente al progreso en temas de transporte aéreo, como la discontinuidad y retrasos en los vuelos, cancelación de vuelos debido a las condiciones de la pista de aterrizaje, entre otros [3]. Es fundamental mencionar que en el país desde el año 1910, se percibió la importancia de la aviación para el desarrollo comercial y militar [4]; mientras que en el año de 1941 inició la actividad aérea en la ciudad, convirtiéndose en una alternativa de transporte rápida y segura. Desde esa fecha hasta la actualidad el principal objetivo ha sido el de impulsar el desarrollo regional y del país, brindando un servicio aeroportuario de excelencia [5], por lo que desde hace 64 años el Ecuador es un estado miembro de la Organización de Aviación Civil (OACI), agencia que proporciona normas y métodos recomendados (SARP'S) y procedimientos para los servicios de navegación (PANS) para la armonización de la seguridad operacional y la eficiencia de la aviación mundial. La metodología de diseño y regulación de pavimentos de aeropuertos utilizada en la actualidad en el Ecuador, se rige por la Federal Aviation Administration (FAA), entidad estadounidense que reglamenta y sistematiza aspectos de la aviación civil desde 1958, las metodologías de diseño que proporciona



la FAA consisten en teorías basadas en la caracterización del tráfico y en el daño previsto en el periodo de diseño, mediante procesos matemáticos que integran variables ambientales, estructurales y de tránsito con el objetivo de permitir que el diseñador establezca el espesor de las distintas capas del pavimento [6].

○ **Justificación**

El diseño de pavimentos de aeropuertos requiere la intervención de una gran cantidad de parámetros de entrada, comúnmente no se realiza un análisis integral de la influencia de cada variable y la relación entre las mismas en el diseño final, debido a esta omisión es posible que el diseño obtenido no sea el óptimo económicamente y/o estructuralmente, por lo que el presente estudio plantea realizar un análisis de sensibilidad de variables localizado, donde se evalúa la varianza de las funciones de salida (espesor de las capas del pavimento) con respecto a los parámetros de entrada (caracterización de materiales y tráfico) [7], para definir estructuras tipo que posean un mejor desempeño a lo largo de su vida útil .

○ **Objetivos**

▪ **General**

Determinar que parámetros influyen en mayor medida en el diseño y desempeño de pavimentos de aeropuertos, mediante análisis de sensibilidad.

▪ **Específicos**

- Analizar y definir los parámetros de entrada del método de diseño de la FAA para pavimentos rígidos.
- Investigar y elaborar una base de datos con información sobre el tráfico aéreo en el país.
- Elaborar un análisis de varianza de los diseños obtenidos, para definir los parámetros y rangos de variación más influyentes en el diseño de pavimentos rígidos para aeropuertos.
- Evaluar el desempeño económico y estructural, además del impacto ambiental de los diseños tipo obtenidos.



○ Alcance

En el presente proyecto de titulación se analiza la influencia y sensibilidad de las distintas posibilidades de parámetros de entrada para el diseño de pavimentos rígidos de aeropuertos, basado en la regulación y metodología propuesta por la FAA. Los diseños se obtendrán con software validado por la FAA a partir de la variación de los parámetros de entrada, que están constituidos por variables de tráfico y materiales; obteniendo un total de 120 posibilidades de estructura de pavimento que serán analizadas estadísticamente para definir el nivel de influencia de las variables en el diseño. Posteriormente se definirá un modelo que permita determinar la estructura del pavimento sin necesidad de utilizar el software o la metodologías propuestas por la FAA, por último de los diseños obtenidos se seleccionarán los más representativos para evaluar su desempeño a nivel estructural y económico, para el análisis estructural se utilizará software validado por la FHWA para definir los esfuerzos y deformaciones a los que estarán sujetos los distintos diseños seleccionados, mientras que para la evaluación económica se aplicará un análisis del costo de ciclo de vida, LCCA, por sus siglas en inglés para definir el costo integral del proyecto; ambos análisis tanto estructural como económico nos permitirán definir que diseños son los más convenientes. En cuanto a la evaluación del impacto ambiental se contabilizarán los factores equivalentes de kg de CO_2 de las emisiones de los materiales que intervienen en la obtención de la estructura del pavimento.



2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan la recopilación de información que será necesaria para la realización del trabajo de investigación, este compendio está organizado de la siguiente manera:

- ❖ Diseño de pavimentos rígidos, según la FAA
 - Criterios
 - Metodologías de diseño
 - Diseño de pavimentos con FAARFIELD
- ❖ Análisis estadístico
- ❖ Evaluación del desempeño del pavimento
 - Análisis estructural
 - Análisis económico

○ **Diseño de Pavimentos Rígidos, según la FAA.**

Desde 1958 hasta el 2006 aproximadamente, la FAA ha establecido disposiciones de regulación para aeronaves, donde se sugiere que los aviones deben ser fabricados en función de su máximo peso bruto de despegue y configuración del tren de aterrizaje, con el objeto de redistribuir las cargas equivalentes por rueda, para que éstas no excedan las 350 000 lb [1]. El diseño de pavimentos para aeropuertos es un problema ingenieril de alta complejidad, debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso; las mismas que consideran dos elementos principales: materiales y caracterización del tráfico. Según lo establecido por la FAA, las estructuras de pavimento rígido están conformadas por una capa de Concreto de Cemento Portland (PCC) sobre una capa granular o estabilizada de agregado, soportado en una subrasante compactada, cabe recalcar que para ciertas condiciones de tráfico la subbase estabilizada no es necesaria (cargas menores a 45350 kg o 100000lb); a su vez, el documento informativo AC 150/5320 -6D [8], indica las solicitudes que deben cumplir las distintas capas que conforman la estructura del pavimento.

- ❖ **Capa de rodadura:** La superficie de concreto provee un área antideslizante, previene la infiltración de agua superficial y brinda soporte estructural.

Ítem P-501 Concreto de Cemento Portland, PCC por sus siglas en inglés



- ❖ **Subbase:** El propósito de colocar una subbase bajo un pavimento rígido es el de proveer un soporte estable y uniforme a las losas de pavimento. El espesor mínimo recomendado es de 100 mm (4 pulgadas) [8], para los casos que se presentan a continuación en la Tabla 2-1 la subbase no es requerida, según la clasificación de suelo que haya adquirido la subrasante.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1. Condiciones donde la subbase no es requerida, según la calidad de la subrasante [8].

Clasificación del suelo	Drenaje bueno		Drenaje malo	
	Congelamiento	No congelamiento	Congelamiento	No congelamiento
GW	X	X	X	X
GP	X	X	X	
GM	X			
GC	X			
SW	X			

A continuación se enlistarán los materiales aceptados para conformar la capa subbase del pavimento:

Ítem P -154 Subbase de agregado grueso

Ítem P-208 Base de agregado grueso

Ítem P-209 Base de agregado grueso triturado

Ítem P- 211 Base de agregado grueso y roca limosa

Ítem P- 219 Agregado de concreto reciclado

- ❖ **Subbase estabilizada:** Capas de bases y subbases estabilizadas son necesarias para pavimentos nuevos diseñados para soportar el impacto de aviones de peso igual o mayor a 45 350 kg (100 000 lb), las subbases estabilizadas disponibles son:

Ítem P-301 Suelo estabilizado con cemento

Ítem P-304 Base de agregado tratada con cemento

Ítem P-306 Base de agregado con concreto de baja resistencia

Ítem P-401 Asfalto mezclado en caliente

- ❖ **Subrasante:** Los materiales de la subrasante deben estar debidamente compactados para proveer estabilidad y soporte uniforme a las capas superiores, en la Tabla 2-2 se presenta el detalle de las características que debe poseer la subrasante en función del tipo del suelo.



Tabla 2. Características de la subrasante, según el tipo de suelo [8].

Tipo de suelo	Tipo de sección	Densidad máx. Compactada	Espesor de la parte superior	Observaciones
		%	cm (in)	
Cohesivo	Relleno	90	NN	-----
	De corte	90	150 (6)	-----
No cohesivo	Relleno	100	150 (6)	El resto del relleno deberá poseer densidad máxima del 95%.
	De corte	100	150 (6)	Los 46 cm (18 in) debajo de la capa superior deberá poseer densidad máxima del 95%.

Para el caso de suelos expansivos se requiere realizar consideraciones especiales, debido a su variación significativa de volumen al sufrir diferenciaciones en la humedad. Los pavimentos de aeropuertos construidos en este tipo de suelos son vulnerables a agrietamientos y cambios en la rugosidad de la superficie, como consecuencia de los movimientos diferenciales a los que la estructura se encuentra sometida, por lo que la FAA sugiere métodos de prevención para reducir los efectos de variación de volumen, en el artículo 314 del AC 150/5320-6D [8] se presentan a detalle los tratamientos recomendados.

La FAA recomienda la siguiente fórmula para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante, en función del CBR.

$$k = \left[\frac{1500x CBR}{26} \right]^{0.7788} \quad (pci)$$

Ecuación 2.1

Donde:

CBR: California Bearing Ratio (%)

Por otra parte las consideraciones de tráfico incluyen estudios sobre:

- ❖ **Cargas:** El método de diseño del pavimento se define en función del peso bruto de la aeronave. Para propósitos de diseño, el pavimento debe estar proyectado para el máximo peso de despegue anticipado de la aeronave crítica. El procedimiento de diseño asume que el 95% del peso bruto es soportado por el tren de aterrizaje principal y el 5% restante es soportado por el tren de nariz.



- ❖ **Tipo y geometría del tren de aterrizaje:** Se denomina tren de aterrizaje al conjunto de ruedas, soportes, amortiguadores y otros equipos que integran el sistema que permite a la aeronave aterrizar o maniobrar sobre la pista, además brinda soporte a la aeronave y permite el traslado en tierra. La FAA plantea una clasificación de los trenes de aterrizaje, según su distribución [1].
 - **Single gear aircraft:** Posee un tren de aterrizaje principal con una rueda en cada puntal. En la Figura 2-1 se detalla la configuración de este tren de aterrizaje.

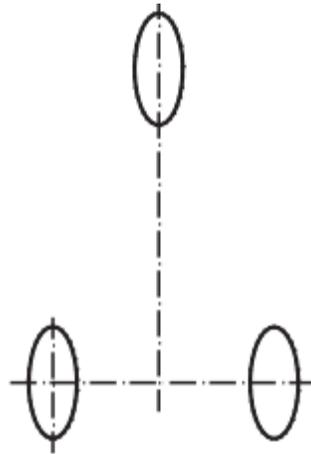


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1. Configuración del tren de aterrizaje tipo single gear aircraft [1].

- **Dual gear aircraft:** Posee un tren de aterrizaje principal con un total de cuatro ruedas, dos en cada puntal. El distanciamiento entre neumáticos se define en función del peso de la aeronave, si este es ligero, se recomienda una separación de 51 cm (20 pulgadas) entre el eje central de los neumáticos; en caso de que sea pesado, se recomienda un espaciamento de 86 cm (34 pulgadas) entre el eje central de los neumáticos. En la Figura 2-2 se detalla la configuración de este tren de aterrizaje.

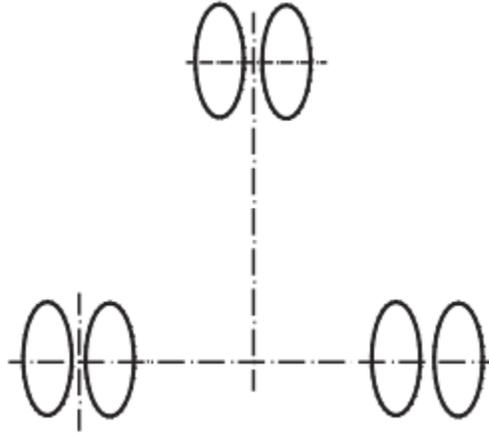


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2. Configuración del tren de aterrizaje tipo dual gear aircraft [1].

- **Dual tándem gear aircraft:** Posee un tren de aterrizaje principal con un total de ocho ruedas, cuatro en cada puntal. El distanciamiento entre neumáticos se define en función del peso de la aeronave, si este es ligero, se recomienda una separación de 51 cm (20 pulgadas) para los neumáticos duales y una separación de 114 cm (45 pulgadas) para el eje tandem; en caso de que sea pesado, se recomienda un espaciamiento de 76 cm (30 pulgadas) para los neumáticos duales y una separación de 140 cm (55 pulgadas) para el eje tándem. En la Figura 2-3 se detalla la configuración de este tren de aterrizaje.

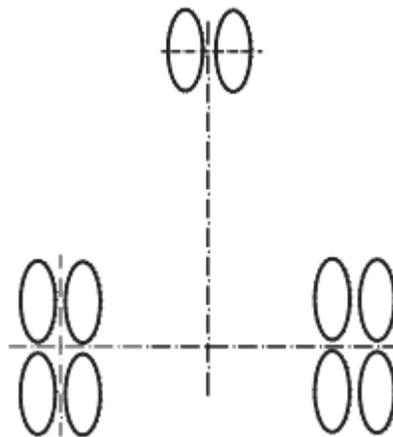


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-3. Configuración del tren de aterrizaje tipo dual tándem gear aircraft [1].

- **Wide body aircraft:** Esta clasificación corresponde a todas las distribuciones de tren de aterrizaje que no se encuentran definidas en las categorías antes mencionadas. En la Figura 2-4 se detallan las posibilidades de configuración de este tren de aterrizaje.

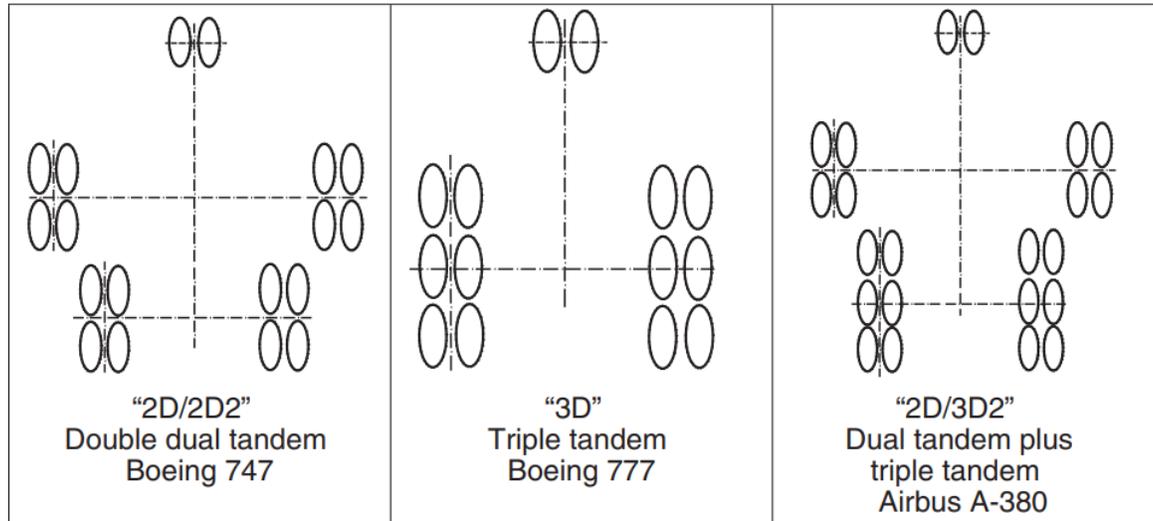


Figura 2-4. Posibilidades de configuración del tren de aterrizaje tipo wide body aircraft [1].

- ❖ **Presión de los neumáticos:** El rango de presiones admisibles para los neumáticos dispuesto por la FAA varía entre 516 a 1 380 KPa (75 a 200 lb/in^2), según la configuración del tren de aterrizaje y el peso bruto de la aeronave. La presión de los neumáticos ejerce menos influencia sobre los esfuerzos de los pavimentos a medida que aumenta el peso bruto [8].
- ❖ **Volumen de tráfico:** Información de la flota (caracterización de la aeronave y su número de salidas anuales) es necesaria para definir el diseño del pavimento.

▪ Método de diseño: Aeroplano Equivalente

La FAA en el año de 1975 consideró la variabilidad del tráfico que frecuenta a un determinado aeródromo para determinar el diseño de la estructura del pavimento, variables como los pesos y configuración del tren de aterrizaje de la flota de aeronaves se integraron en el método, a partir de la inclusión de estos parámetros, se definieron términos como “aeronave de diseño” y “salidas anuales equivalentes” [1]. La aeronave de diseño hace referencia a aquel aeroplano que requiere un mayor espesor del pavimento para soportarlo, que no necesariamente es el más pesado; mientras que las salidas anuales equivalentes hacen referencia a la conversión del número de despegues anuales de todas las aeronaves que no sean las de diseño a un valor



equivalente utilizando factores que se presentan en la Tabla 2-3. El número de salidas equivalentes de la aeronave de diseño se determina con la siguiente ecuación:

$$\log R_1 = \log R_2 x \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{1/2}$$

Ecuación 2.2

Donde:

R_1 : Salidas anuales equivalentes de la aeronave de diseño

R_2 : Número anual de salidas de determinado aeroplano en términos de la configuración del tren de aterrizaje de la aeronave de diseño

W_1 : Carga del neumático del aeroplano de diseño (lb)

W_2 : Carga del neumático del aeroplano convertido (lb)

Tabla 2-3. Factores de conversión para el cálculo del número de salidas equivalentes [1].

Conversión		Factor de Conversión
De	A	
Single Wheel	Dual Wheel	0.80
Single Wheel	Dual tándem	0.50
Dual Wheel	Dual tándem	0.60
Double dual tándem	Dual tándem	1.00
Dual tándem	Single Wheel	2.00
Dual tándem	Dual Wheel	1.70
Dual Wheel	Single Wheel	1.30
Double dual tándem	Dual Wheel	1.70

▪ Método de diseño: Falla por Daño Acumulativo

En la actualidad, en lugar de aplicar el concepto de “aeronave de diseño” se utiliza el criterio de falla por fatiga, expresado en términos de “factor de daño acumulativo” (CDF). Este factor oscila entre 0 y 1 y define la contribución al fallo del pavimento de cada tipo de aeronave que utilice ese pavimento. A este indicador se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CDF = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

Ecuación 2.3

Donde:

n_i : Número esperado de salidas anuales para el aeroplano i .

N_i : Número de salidas del aeroplano i que generarán el fallo del pavimento por cada aeronave i en la flota.



Cuando el CDF llega a 1 o excede este valor, el número acumulativo de operaciones para cada uno de los aviones dará lugar a la falla del sistema estructural, mientras que para valores menores a 1, el CDF representa la fracción de la vida del pavimento que ha sido evidentemente “agotada”, es decir si se obtiene un $CDF = 0.80$, este indicador demuestra que la estructura ha gastado un 80% de su vida útil, y que se cuenta únicamente con el 20% de vida remanente para condiciones especiales de tráfico, donde el volumen del mismo debe ser menor al previsto antes del fallo por fatiga [1].

▪ **Diseño de pavimentos rígidos con software validado por la FAA**

El método de diseño de pavimentos con software de la FAA aplica un modelo mecánico de computadora para estimar el espesor apropiado de las capas del pavimento a partir del valor del módulo de Young de la subrasante (E) y la flota esperada de aeronave, de modo que el CDF alcance el valor de 1 después de haber cumplido 20 años de vida útil. El software aprobado por la FAA, FAARFIELD (Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design) contiene una biblioteca de aeronaves y su caracterización (pesos brutos máximos, configuración del tren de aterrizaje y contribución al CDF). Para el diseño de pavimentos rígidos, similar al método de diseño para pavimentos flexibles, se utilizan nomogramas y tablas de aproximación basadas en teorías propuestas por Westergaard.

• Teoría de Westergaard

Esta metodología plantea analizar los esfuerzos y deformaciones en los pavimentos de hormigón mediante la aplicación de cargas en las losas [8]. Westergaard asumió que la losa de pavimento era una placa delgada en reposo sobre una subrasante que es considerada como elástica únicamente en dirección vertical (Figura 2-5), a partir de esta consideración la reacción resulta proporcional a la deflexión de la subrasante, como:

$$p = kz \quad (in)$$

Ecuación 2.4

Donde:

z: deflexión (in)

k: constante del suelo

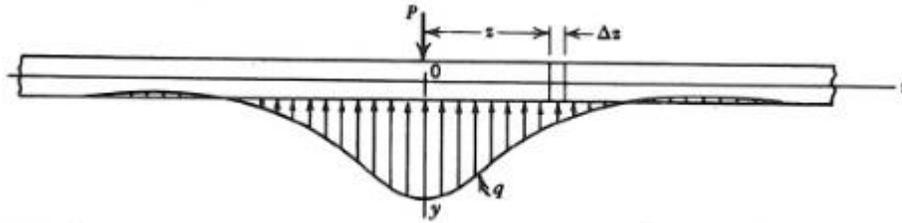
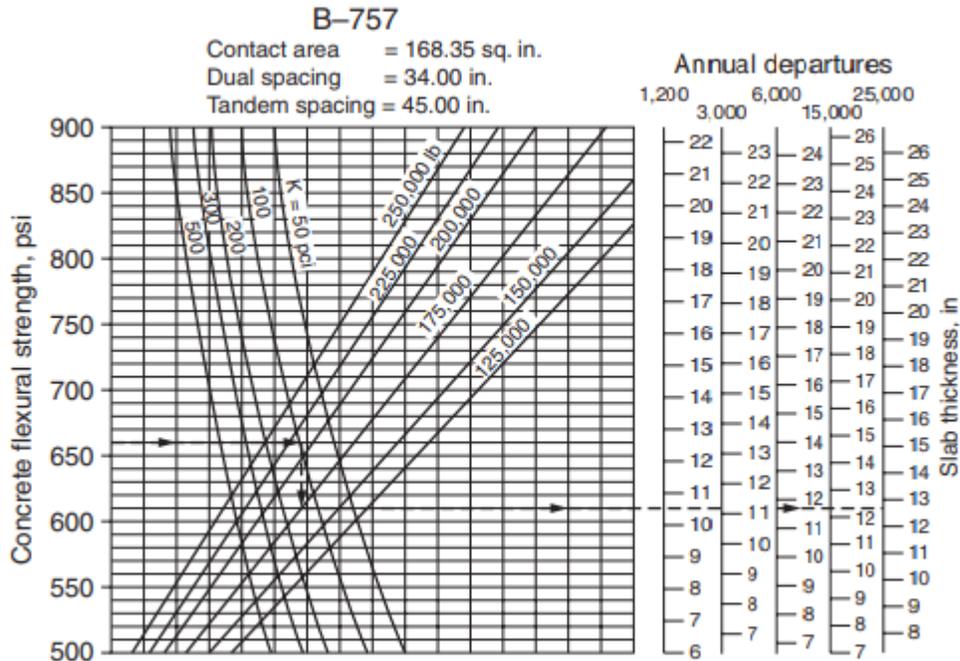


Figura 5. Condiciones de apoyo de una viga sobre una subrasante elástica [9].

Otras suposiciones indican que la losa de hormigón es un sólido elástico isotrópico homogéneo, y además que la carga de la rueda del aeroplano se distribuye de manera elíptica sobre la superficie; todas estas hipótesis permiten determinar los esfuerzos y deformaciones en las losas de la capa de rodadura, tanto en los bordes como en el interior de la misma, en la Figura 2-6 se presenta una curva de diseño tipo para estimar el espesor de la losa del pavimento usando el análisis de Westergaard [8].

Figura 6. Curva de diseño para estimar el espesor del pavimento rígido usando el análisis de Westergaard [1].



- Teoría de Elementos Finitos

Para el diseño de pavimentos, FAARFIELD requiere de información suministrada por el usuario acerca de la flota y el valor E de la subrasante, los procesos computacionales de diseño aplican la teoría de los elementos finitos para estimar el espesor de la superficie de PCC. El análisis tridimensional de elementos finitos, 3D-FE, es similar a la teoría de diseño elástico en capas, debido a que considera el módulo de Young de la subrasante, los materiales usados en las capas rodadura y subbase; además de considerar el factor de daño acumulativo [8].

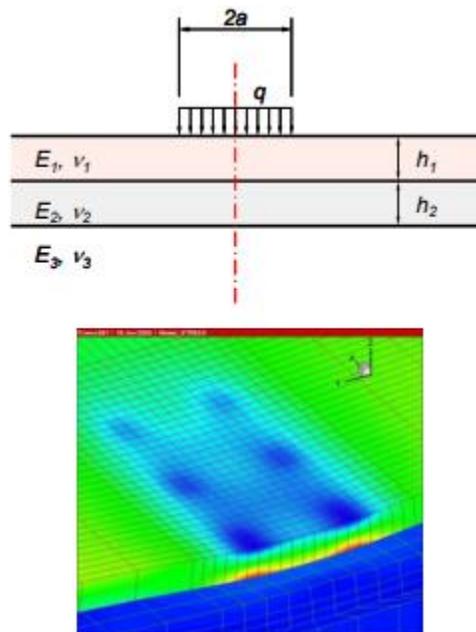


Figura 7. Modelo estructural y distribución de tensiones en las distintas capas del pavimento bajo la carga de un neumático [10].

Para obtener una estimación más precisa de la respuesta de la capa de rodadura ante la tensión transversal se aplica la modelación 3D-FE, que permite considerar a la estructura del pavimento como un sistema discreto en secciones, como se muestra en la Figura 2-7 se obtiene el esfuerzo en la zona crítica de la losa del pavimento que se localiza en los bordes de la misma [8]. Para obtener el esfuerzo de diseño se coloca el tren de aterrizaje tangente y perpendicular al borde de la losa, tomando el mayor de los dos esfuerzos, reduciéndolos en un 25% por la transferencia de carga [11].

- Consideraciones para el diseño

- Periodo de diseño: 20 años, según especificaciones de la FAA.
- Flota: analiza el daño ocasionado por cada avión de la flota con la teoría de CDF.



- Relación pasada-cobertura: Número de veces que debe pasar una aeronave para producir una aplicación de carga máxima, es decir máximo esfuerzo o deformación en un área unitaria del pavimento. Para pavimentos rígidos la cobertura hace referencia al número de repeticiones del máximo esfuerzo en el fondo de la losa de concreto; las coberturas de un avión específico son una función de:
 - Número de pasadas del avión (salidas)
 - Número y distribución de las llantas del tren principal
 - Ancho del área de contacto del neumático

Para la determinación de la relación pasada – cobertura (P/C), FAARFIELD aplica el concepto de ancho efectivo del neumático, en pavimentos rígidos esta relación es igual al ancho nominal del área de contacto de la llanta [11].

- **Determinación del Factor de Daño Acumulado (CDF)**

Aplicando la regla de Miner y a partir de la Ecuación 2.2, se obtiene la siguiente expresión equivalente (Ecuación 2.4) para calcular el CDF [11]:

$$CDF = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

Ecuación 2.3

$$CDF = \sum \frac{(\text{salidas anuales}) \times (\text{vida en años})}{\left(\frac{P}{C}\right) \times (\text{coberturas a la falla})} = \sum \frac{\text{coberturas aplicadas}}{\text{coberturas a la falla}}$$

Ecuación 2.5

- **Análisis estadístico**

- **Análisis de varianza**

Este análisis propone un método para identificar, analizar y probar la significancia estadística de varianzas que provienen de diferentes fuentes de variación; es decir, que una variable dependiente tiene una cantidad total de varianza, parte de la cual es debida al tratamiento experimental, parte al error y parte a otras causas [12]. Por lo que el análisis de varianza permite tratar las fuentes y los tipos de varianzas para datos experimentales y no experimentales, según su inventor Fisher (1950), donde se utiliza la manipulación y aleatoriedad de una variable



independiente. El análisis de varianza, llamado también ANOVA (ANalysis Of VAriance), por sus siglas en inglés, permite evaluar la relación de dependencia entre dos conjuntos variables de carácter cualitativo y cuantitativo, mediante un método de análisis estadístico que permite determinar si existen diferencias significativas de una o varias características observadas [13].

Las variables pueden ser de dos tipos: dependiente e independiente, la variable dependiente se la denomina también como variable explicada, resultado o salida; mientras que a cada una de las variables independientes se las denomina como factores y representan correspondientemente a cada una de las “causas” que explican la heterogeneidad de la variable dependiente. Al conjunto de valores que puede adquirir la variable independiente se les conoce como tratamiento o nivel de factor [13]. Si las variables independientes definen o afectan a la dependiente, la medida de influencia se define como efecto (α_j), y la magnitud del mismo se lo conoce como tamaño del efecto. Cuando se consideran varias variables independientes, cada una de ellas tiene un efecto individual, mas es posible la existencia de efectos adicionales como respuesta de la interacción entre los factores (variables independientes). Los tipos de modelo a analizar se definen según la característica de los efectos, es decir en el caso donde el investigador define o controla los niveles del factor o cuando los niveles del factor vienen dados por características del mismo y se consideran todas las posibilidades de niveles este modelo es de tipo I, de efectos fijos; mientras que para el caso donde los niveles de un factor son adjudicados de manera aleatoria, el modelo es de tipo II de efectos aleatorios [13]. A continuación para mejorar la comprensión de los tipos de modelos se presenta un ejemplo:

- ❖ Modelo I (efectos fijos):
 - Factor: ciudades del Ecuador con población mayor al millón de habitantes.
 - Niveles del factor: todas las ciudades que cumplen con la condición antes mencionada.
- ❖ Modelo II (efectos aleatorios):
 - Factor: veinte ciudades del Ecuador
 - Niveles del factor: selección al azar de ciertas ciudades del Ecuador hasta completar el número de niveles deseado.

Los modelos de un análisis de varianza pretenden ser explicativos, la parte no explicada está constituida por el error (ϵ_j), que a su vez está compuesta por errores de media, efectos aleatorios, variables relevantes no incluidas, etc [13]. Para este caso de estudio se aplicará ANOVA



unifactorial, donde se considera a la variable dependiente cuantitativa (univariable) y una variable independiente cualitativa (unifactorial, de una sola vía) entre sujetos (diseños de muestras independientes). En la Ilustración 2-1 se ejemplifica el funcionamiento de ANOVA unifactorial, donde la variable independiente, módulo efectivo de la subrasante es de tipo cualitativo e influye en el valor que adquirirá la variable dependiente, espesor de la capa de rodadura, que es de tipo cuantitativo [13].

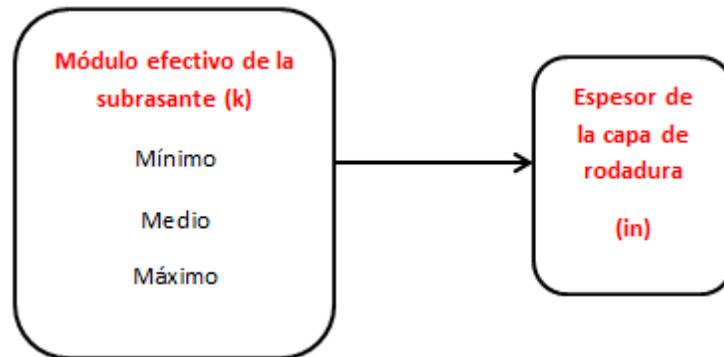


Ilustración 2-1. Funcionamiento de ANOVA unifactorial.

• Principios

El análisis de varianza, a partir de la existencia de T grupos, donde cada grupo posee una media u_1, u_2, \dots, u_t , permite contrastar el planteamiento de dos hipótesis: nula y alternativa.

- ❖ Hipótesis nula (H_0): las medias de los grupos son iguales, es decir $u_1 = u_2 = \dots = u_k$.
- ❖ Hipótesis alternativa (H_a): alguna de las medias es distinta, es decir, $u_i \neq u_j$, para algún "i" y "j".

Donde:

u : media del grupo.

k : número de grupos.

Este contraste es de vital importancia en el análisis de resultados experimentales, donde se necesita comparar los resultados de "k" tratamientos o factores con respecto a la variable dependiente [14].

La metodología ANOVA consiste en la descomposición de la variación total de los datos respecto a la media global (SCT), que en caso de cumplimiento con la hipótesis nula (H_0), es una estimación de σ^2 determinada a partir de la información muestral, en dos partes:

- ❖ Variación dentro de las muestras o intragrupos (SCD): representa la dispersión de los valores de cada muestra con respecto a sus correspondientes medias.



- ❖ Variación entre muestras – intergrupos (SCE): representa la dispersión de las medias de las muestras con respecto a la media global.

- Condiciones

Para que sea posible aplicar el método ANOVA de una vía es necesario el cumplimiento de las siguientes hipótesis:

- ❖ La distribución de la probabilidad de la variable dependiente es normal, esta condición puede estar sujeta a cambios.
- ❖ Las k muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
- ❖ Las poblaciones tienen todas igual varianza (homoscedasticidad).

- Valores estadísticos que intervienen en el ANOVA

Los valores estadísticos que permiten realizar el análisis de varianza están relacionados a la variación intragrupos e intergrupos, éstos son:

- ❖ Media global (\bar{X}): representa la media de todos los datos en un conjunto de datos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{n}$$

Ecuación 2.6

- ❖ Variación total (SCT): representa la suma de cuadrados de todos los datos.

$$SCT = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X})^2$$

Ecuación 2.7

- ❖ Variación Intragrupos (SCD): representa la suma de cuadrados entre muestras.

$$SCD = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

Ecuación 2.8

- ❖ Variación Intergrupos (SCE): representa la suma de cuadrados entre las muestras.



$$SCE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{X}_j - \bar{X})^2 * n_j$$

Ecuación 2.9

Donde:

x_{ij} : es el i-ésimo valor de la muestra j-ésima

n_j : el tamaño de dicha muestra y \bar{X}_j es su muestra

- **Resultados de la prueba ANOVA**

Los indicadores estadísticos que se obtienen al aplicar el ANOVA de una vía son: grados de libertad, el estadístico F y el Pvalue. Los grados de libertad hacen referencia a posibilidad de realizar cambios en los datos sin que el resultado final se modifique, si una variable cuenta con k valores, existen k-1 grados de libertad, por ejemplo: poseemos tres datos, en este caso los números: 1, 2 y 3, a partir de esta información se puede realizar la operación suma $1+2+3 = 6$, al poseer k-1 grados de libertad podremos cambiar dos de los tres datos sin generar cambios en la suma total, así se varía el valor del primer dato, de 1 a 4, y el valor del segundo dato, de 2 a 3, por lo que al tercer dato se le condicionará un valor obligatorio para no alterar la operación suma, por lo que se tiene $1+2+3 = 6 = 4+3-1$, el tercer dato adquirió el valor de -1 para obtener el resultado de 6. Para el caso del análisis de varianza, los grados de libertad se descomponen en total, entre y dentro, es decir, n representa el número total de datos, n_i al número de datos del grupo i, y por último k hace referencia al número de grupos, por lo que se tiene [15]:

$$gl_E = k - 1$$

Ecuación 2.10

$$gl_D = n - k$$

Ecuación 2.11

$$gl_T = n - 1 = gl_D + gl_E$$

Ecuación 2.12

Donde:

gl_E : grados de libertad entre grupos



gl_D : grados de libertad dentro de los grupos

gl_T : grados de libertad totales

Para el caso de los grados de libertad dentro de los grupos, se resta k veces al número total de datos, debido a la suma de los grados de libertad de cada grupo, como existen k grupos el sustraendo será k y no 1 [15].

El estadístico F fue ideado por el matemático Fisher, quien planteó calcular la razón entre las medidas de variación entre grupos e intragrupos, a este indicador se lo simboliza con la letra F y su ecuación es al siguiente:

$$F = \frac{VE}{VD}$$

Ecuación 2.13

Donde:

VE = variación intergrupos

VD = variación intragrupos

Por lo tanto, si existen relación entre las variables analizadas, la variación entre los grupos es mayor que dentro de los mismos, por lo que $F > 1$.

El valor P, también llamado P-value, representa la probabilidad de obtener un resultado estadístico de prueba al menos tan extremo como el realmente observado, asumiendo a la hipótesis nula como cierta. Si el valor determinado de P es menor o igual a un umbral previamente establecido entre 1% a 5%, los datos observados sugieren son inconsistentes respecto a la hipótesis nula, por lo tanto se determina la hipótesis alternativa como cierta [16].

La información que se debe presentar sobre el resultado ANOVA trata de la determinación de diferencias significativas e informar su valor estadístico F, sus grados de libertad (df), su valor y el P-value calculado, como se muestra a continuación en la Ilustración 3-1:

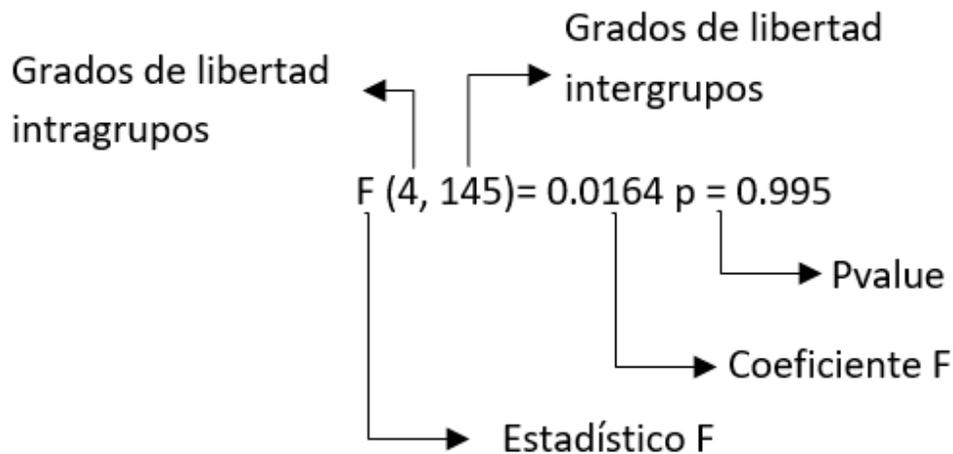


Ilustración ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2.Representación de información de resultados prueba ANOVA.

○ Evaluación del desempeño del pavimento

▪ Análisis estructural

Los pavimentos rígidos debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad tienen a distribuir la carga sobre un área de suelo relativamente grande, por lo que una porción considerable de ese peso es soportado por las losas. En la antigüedad los pavimentos rígidos se construían sobre terracerías sin importar la calidad de las mismas, teniendo como consecuencia un sinnúmero de pavimentos que fallaron por grietas tanto transversales como longitudinales en los bordes de las losas, después de investigaciones realizadas, se determinó que la causa de las fallas se debía al fenómeno denominado “bombeo”, que consiste en el ascenso de materiales finos y húmedos hacia la superficie de rodamiento a través de las juntas, para evitar esta problemática se planteó que la losa debía colocarse sobre un material granular; inicialmente no se daba mayor importancia al espesor de las capas, en especial a la de rodadura, mas posteriormente se determinó que si se utiliza subbase estabilizada con cemento Portland el espesor de la capa de rodadura disminuye notablemente [17].

Los esfuerzos a los que está sometido un pavimento rígido principalmente son los siguientes:

- Esfuerzos por tránsito
- Esfuerzos por cambios de temperatura
- Esfuerzos por cambios de humedad



- Esfuerzos por cambios de volumen en las capas inferiores del pavimento

Para comprender como trabajan los esfuerzos antes mencionados sobre las losas es necesario definir conceptos acerca del comportamiento mecánico de los pavimentos rígidos [17]:

- Curvatura y esfuerzos causados por deflexión

Para representar las condiciones de apoyo, es necesario considerar el caso de una viga apoyada en una cimentación elástica (Figura 2-4), donde la presión de la reacción es proporcional a la deflexión, por lo que la presión está definida por la siguiente ecuación:

$$p = kz \quad (\text{lb/in}^2)$$

Ecuación 2.4

Donde:

z: deflexión (in)

k: constante del suelo (Módulo de reacción de la subrasante) (lb/in³)

El valor de k se considera constante en un rango pequeño de valores, debido a la rigidez lineal del terreno, el mismo depende de la densidad del suelo, humedad, textura y otros factores que afectan a la resistencia.

La ecuación diferencial que representa la deflexión de una viga apoyada en una cimentación elástica es la siguiente:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -ky + q$$

Ecuación 2.14

Donde:

q es la carga externa en libras sobre pulgada.

EI: rigidez de la viga.

- Rigidez relativa de una losa

En una losa de concreto hidráulico como estructura de pavimento la resistencia a la deformación depende de la rigidez del medio que la soporta así como la rigidez propia de la losa, en la Ecuación 2.12 se presentó la ecuación que define la deflexión de una viga apoyada en un medio elástico [17], donde EI es la rigidez de la viga, en el caso de una losa la rigidez D se determina con la siguiente expresión:

$$D = \frac{E h^3}{12 (1 - \mu^2)}$$

Ecuación 2.15



Westergaard definió la rigidez relativa de una losa y el terreno que la soporta, denominándola como radio de rigidez relativa, ésta posee dimensiones lineales y se ve influenciada tanto de la losa como del terreno de cimentación [17].

$$\tau = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12k(1-\mu^2)}} \quad (in) \quad (in)$$

Ecuación 2.16

Donde:

τ : radio de rigidez relativa (in)

E : módulo de elasticidad del pavimento (lb/in²)

h : espesor del pavimento (in)

μ : módulo de Poisson del pavimento

k : módulo de reacción del terreno (lb/in³)

- Esfuerzos por tránsito

Son los que se refieren a los esfuerzos transmitidos por la huella de los neumáticos de los aeroplanos que transitan un pavimento [17]. Las ecuaciones de Westergaard consideran que la huella del neumático tiene la forma de una elipse con semiejes a y b , según tres casos de estudio:

- Carga en la esquina: Cuando la huella del neumático es tangente en forma simultánea en dos orillas (Figura 2-8). En este caso la losa trabaja en voladizo y los esfuerzos principales de tensión se presentan formando un ángulo de 45° con respecto a la orilla, el esfuerzo se determina con la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a_t}{\tau} \right)^{0.6} \right] \quad (psi)$$

Ecuación 2.17

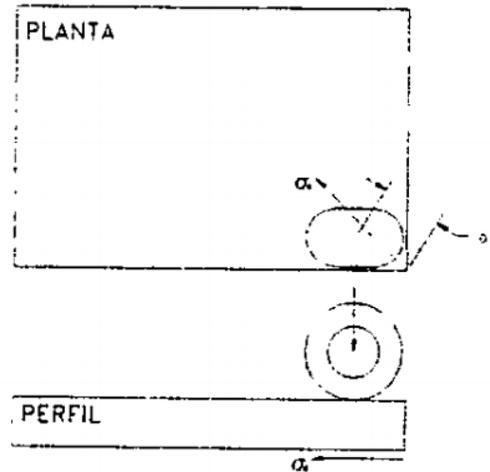


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8. Carga de esquina [17].

- Carga de borde: En este caso la huella del neumático es tangente solo a una orilla de la losa (Figura 2-9). El esfuerzo principal de tensión es paralelo al borde de la losa y se presenta en la parte inferior de la losa, su magnitud se determina con la siguiente expresión:

$$\sigma_e = \frac{0.572 P}{h^2} \left[4 \log_{10} \left(\frac{r}{b} \right) + 0.359 \right] \quad (psi)$$

Ecuación 2.18

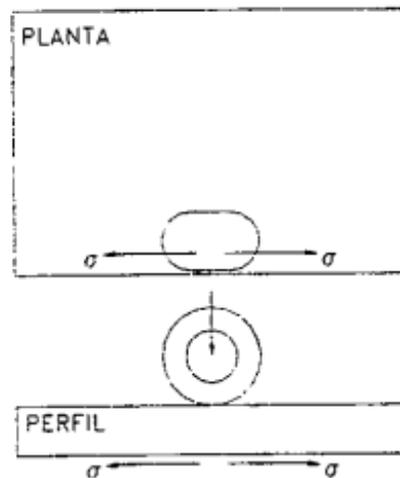


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9. Carga de borde [17].

- Carga interior: En esta caso la huella de la llanta está en el centro de la losa, para esta condición de ubicación los esfuerzos máximos de tensión se desarrollan de forma



radial en el lecho inferior de la losa (Figura 2-10), la magnitud de este esfuerzo se evalúa con la siguiente ecuación:

$$\sigma_i = \frac{0.316 P}{h^2} \left[4 \log_{10} \left(\frac{\tau}{b} \right) + 1.069 \right] \quad (psi)$$

Ecuación 2.19

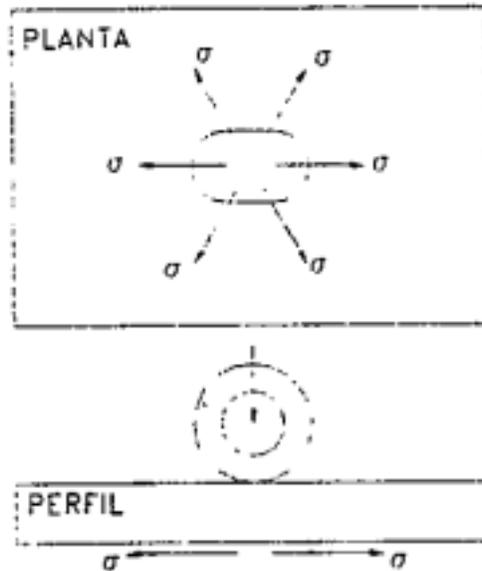


Figura 2-10. Carga interior. [17].

Es importante tener presente que en caso de que el valor de a sea mayor a 1.724 veces h , entonces $b = a$, caso contrario se determina b con la siguiente expresión [17]:

$$b = \sqrt{1.6 a^2 + h^2} - 0.675h \quad (in)$$

Ecuación 2.20

Para las ecuaciones 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20, se tiene que:

- P: carga transmitida a la losa a través del neumático (lb)
- a, b : semiejes de la elipse que representa la huella del neumático (in)
- a_c : distancia del centro del neumático a la esquina de la losa (in)
- h : espesor de la losa (in)
- E: módulo de elasticidad del concreto (lb/in^2)
- μ : relación de Poisson del concreto (0.15)



k: módulo de reacción del terreno (lb/in^3)

t: radio de rigidez relativa (in)

A partir de los estudios realizados por Westergaard, muchos investigadores han creado métodos para la evaluación de esfuerzos a partir del uso de gráficas o programas de cómputo.

▪ **Análisis económico**

• **Análisis del costo del ciclo de vida (LCCA)**

Es un análisis técnico basado en principios económicos, utilizado para evaluar la eficiencia de un proyecto a lo largo de su vida útil. El LCCA es una metodología aplicada para evaluar y comparar el costo para la agencia de alternativas de pavimentación ya sea para pavimentos rígidos o flexibles. La Figura 2-11 presenta la necesidad de un LCCA para determinar que alternativa de pavimentación tiene el menor costo global, esta metodología de análisis sirve también para comparar el valor económico de dos o más alternativas de un mismo tipo de pavimento (rígido o flexible) [18].

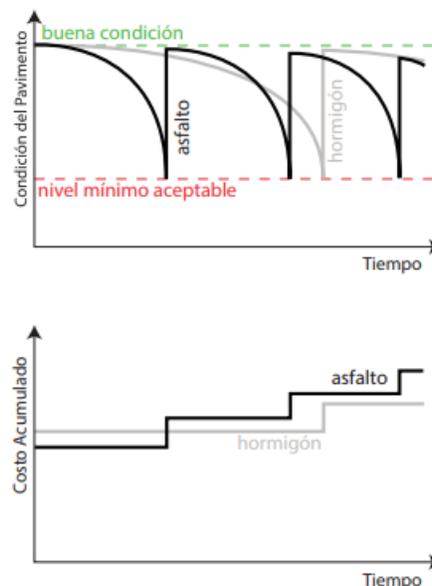


Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11. Condición del pavimento en el tiempo y su costo a través del tiempo [18].

Las etapas que se analizan en un LCCA para alternativas de diseño o rehabilitación son [18]:

- Selección del periodo de análisis: hace referencia al intervalo de tiempo en el que se comparará al proyecto, debe ser suficientemente extenso para estimar de mejor manera



las diferencias en el desempeño de las alternativas a evaluarse, por lo que se recomienda establecer un periodo de análisis que incluya el periodo de desempeño inicial y al menos una actividad de seguimiento o rehabilitación.

- Selección de una tasa de descuento: este valor se usa para representar la tasa de variación en el tiempo del valor verdadero del dinero, considerando las fluctuaciones de las tasas de interés de la inversión y la tasa de inflación. La tasa de descuento real está dada por la siguiente ecuación (Ecuación 2-21) propuesta por Thuesen y Fabrycky en 1984:

$$d = \frac{1 + i_{int}}{1 + i_{inf}} - 1 \quad (\%)$$

Ecuación 2.21

Donde:

d: tasa de descuento real (%)

i_{int} : tasa de interés (%)

i_{inf} : tasa de inflación (%)

Para el caso donde donde la tasa de interés excede a la tasa de inflación, se recomienda utilizar la siguiente aproximación:

$$d \approx i_{int} - i_{inf}$$

Ecuación 2.22

Cuando se obtienen tasas de descuento real altas, éstas tienden a reducir el impacto sobre el valor neto de los gastos altos a futuro, por lo que se puede determinar que las altas tasas de descuento favorecen a las alternativas de costos iniciales bajos y costos futuros altos, mientras que para tasas de descuento bajas las alternativas de costos iniciales altos y costos futuros bajos se ven favorecidas [18].

- Estimación del costo inicial para la agencia (A): está compuesto por todos los costos incluidos en:
 - Diseño inicial y construcción/inspección
 - Conservación/rehabilitación (incluidos costos técnicos y control de tráfico)
 - Mantenimiento y operación (incluida la mano de obra)
 - Demolición/remoción o valor residual de la estructura del pavimento
 - Ahorros directos asociados a los beneficios sostenibles del pavimento



- Estimación del costo para el usuario (B): son todos los costos asociados a la alternativa y contraídos por los usuarios durante el periodo de análisis.
- Estimación de los costos a futuro para la agencia (C): está compuesto de los costos asociados con aspectos de ingeniería, administración y control de tráfico (cierre de pistas, mantenimientos, entre otros)
- Estimación del valor residual: está conformado por: el valor neto que el pavimento tendría en el mercado si es reciclado al final de su periodo de vida útil (valor de salvamento), valor de la vida remanente al final del análisis y el valor del pavimento existente como capa de soporte para una sobrecapa al final del periodo de análisis.
- Comparación de las alternativas: este proceso se debe realizar en función de una medida de valor económico de una inversión, generalmente las alternativas de inversión en proyectos de pavimentación se comparan en base al valor presente neto (VPN) o costo anual equivalente (CAE).

La mayoría de agencias de vialidad de EEUU usan el VPN y el cálculo del mismo se expresa en términos de su valor equivalente [18], por ejemplo, todos los costos iniciales para la agencia se asumen como ocurridos en un tiempo igual a cero y no se descuentan, mientras que todos los costos futuros (mantenimiento, rehabilitación, entre otros) se descuentan de sus valores actuales y se suman al costo inicial.

▪ **Análisis de impacto ambiental**

Para el análisis de impacto ambiental en la fase de diseño de una obra de construcción se determinan los factores de emisión de CO_2 para calcular la huella de carbono, la etapa de análisis corresponde al tiempo durante el cual se concibe el proyecto, excluyendo aspectos del mismo que aún no están especificados, como por ejemplo, el transporte de materiales de la cantera o de la planta de fabricación. Medir la huella de carbono en la primera etapa del proyecto permite canalizar las decisiones en las siguientes fases (construcción, operación y mantenimiento) para reducir el impacto ambiental [19].

Para contabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de una actividad o producto, se emplean factores de emisión éstos permiten convertir los datos de una actividad en emisiones estimadas, mediante la siguiente ecuación:



$$GEI = \text{datos de la actividad} \times \text{factor de emisión}$$

Ecuación 2.23



3 METODOLOGÍA

En la presente sección se indican de manera detallada los criterios y procedimientos empleados en el desarrollo de este proyecto de titulación. Como se describió en el capítulo introductorio el análisis de sensibilidad de variables permite conocer la influencia de ciertos parámetros en el diseño final y desempeño del pavimento, mediante procedimientos estadísticos. La metodología aplicada se ha definido secuencialmente como se muestra a continuación:

- ❖ Obtención de los diseños de pavimento rígido usando el software FAARFIELD
- ❖ Análisis estadístico de los diseños obtenidos con la técnica ANOVA
- ❖ Evaluación del desempeño del pavimento
 - Análisis estructural
 - Análisis económico
 - Análisis de impacto ambiental

○ **Obtención de los diseños de pavimento rígido usando el software validado por la FAA**

▪ **Parámetros de entrada**

- **Materiales**

En el diseño de pavimentos rígidos, el software requiere un mínimo de 3 capas (PCC, Base y Subrasante), permitiendo el ingreso de hasta 5 capas. FAARFIELD solicita la siguiente información acerca de los materiales: espesor inicial, módulo elástico y coeficiente de Poisson. La Tabla 3-1 presenta los materiales disponibles para realizar el diseño de pavimentos rígidos utilizando FAARFIELD.

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4. Capas y tipos de materiales que conforman el pavimento [8].

CAPA	ID
------	----



CAPA DE RODADURA	P-501 / PCC
	P-401 / HMA
	P-403 / HMA
	P-601 / HMA
BASE Y SUBBASE ESTABILIZADA	P-401 / HMA
	P-403 / HMA
	P-306 / Lean Concrete
	P304/ Cement treated base
BASE Y SUBBASE GRANULAR	P-301 / Soil cement
	Variable stabilized rigid
	P-209 / Crushed aggregate
	P-208 / Aggregate
	P-219 / Recycled concrete aggregate
SUBRASANTE	P-211 / Lime Rock
	P-154 / Uncrushed aggregate

- Tráfico

La información necesaria para caracterizar el tráfico que recibe la pista de aterrizaje está conformada por: aeronave, peso de despegue, presión de los neumáticos, salidas anuales, factor de crecimiento anual de salidas y geometría del tren de aterrizaje. Para el análisis se definen dos aeropuertos con volúmenes de tráfico diferentes, el primero es un aeropuerto de cabotaje (Aeropuerto A), es decir que únicamente brinda el servicio de vuelos nacionales; mientras que el segundo (Aeropuerto B) tiene cobertura de vuelos a nivel nacional e internacional, A continuación en la Tabla 3-2 y 3-3 se presenta el detalle de la caracterización del tráfico para los dos aeropuertos mencionados:

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-5. Caracterización de la flota para el aeropuerto A.

Aeropuerto A					
Aeronave	Salidas anuales *	Presión neumáticos	Peso de despegue	Razón de crecimiento anual del tráfico **	Tren de aterrizaje
		MPa (psi)	kg (lb)	%	
Airbus 319	2703	1.38 (200)	75500 (166449)	3	Dual wheel "D"
ATR 42-500	212	0.60 (86)	18600 (41006)	3	Dual wheel "D"
Embraer 190	424	1.01 (147)	47800 (105381)	3	Dual wheel "D"

NOTA *: La información sobre salidas anuales del aeropuerto A se ha levantado de información disponible en la red [20].

NOTA **: La razón de crecimiento anual ha sido impuesta por la autora en función a lo establecido en el Registro Estadístico de Entradas y Salidas Internacionales [21].

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-6. Caracterización de la flota para el aeropuerto B.

Aeropuerto B					
--------------	--	--	--	--	--



Aeronave	Salidas anuales *	Presión neumáticos	Peso de despegue	Razón de crecimiento anual del tráfico **	Tren de aterrizaje
		MPa (psi)	kg (lb)	%	
A 321	371	1.39 (202)	93500 (205700)	3	Dual Whel "D"
Airbus 319	8745	1.38 (200)	68000 (149600)	3	Dual Whel "D"
Airbus 320	1007	1.44 (209)	62500 (137500)	3	Dual Whel "D"
Airbus 320 100/200	1590	1.44 (209)	78000 (171600)	3	Dual Whel "D"
Airbus A330-200	689	1.42 (206)	240000 (528000)	3	Dual tándem "2D"
ATR 42-300	954	0.59 (86)	18600 (40920)	3	Dual Whel "D"
Boeing 737-700	212	1.36 (197)	66000 (145200)	3	Dual Whel "D"
Boeing 737-800	1431	1.41 (204)	79010 (173822)	3	Dual Whel "D"
Boeing 767-300	795	1.25 (182)	179169 (394171.8)	3	Dual tándem "2D"
Boeing 777-200	318	1.5 (218)	247200 (543840)	3	Triple tándem "3D"
Embraer ERJ-190	265	1.01 (147)	47800 (105160)	3	Dual Whel "D"

NOTA *: La información sobre salidas anuales del aeropuerto B se ha levantado de información disponible en la red [22].

NOTA **: La razón de crecimiento anual ha sido impuesta por la autora en función a lo establecido en el Registro Estadístico de Entradas y Salidas Internacionales [21].

▪ Definición de rangos y valores para el análisis

Como se puede observar en la Tabla 3-1, existen 6 posibilidades de base o subbase estabilizada y 5 posibilidades de base y subbase granular, a su vez el módulo de la subrasante puede variar de 6.89 MPa (1000 psi) a 344.73 MPa (50000 psi); de todas las opciones de materiales sugeridas en el Advisory Circular 150/5320 – 6F se seleccionan los materiales que pueden conseguirse en nuestra región para realizar el análisis, en la Tabla 3-4 se presentan las opciones de materiales para nuestra región equivalentes a los propuestos por la FAA.

Tabla 3-4. Materiales seleccionados para el diseño de pavimento rígido.

CAPA	MATERIAL (FAA)	MATERIAL (Región)
------	----------------	-------------------



CAPA DE RODADURA	P-501 / PCC	Pavimento de hormigón de Cemento Portland (Sección 405-8)*
	P-401 o P-403 / HMA	Bases de Hormigón Asfáltico Mezclado en Planta (Sección 404-5)*
BASE Y SUBBASE ESTABILIZADA	P-306 / Lean Concrete	Concreto de baja resistencia**
	P304/ Cement treated base	Base de Agregados Estabilizada con Cemento (Sección 815-2.03)*
	P-301 / Soil cement	Base de Suelo - Cemento (Sección 815-2.02)*
	P-209 / Crushed aggregate	Bases de agregados Clase 1 y 2 (Sección 404-1.02) Sub base de agregados Clase 1 y 2 (Sección 403.1.02)*
	P-208 / Aggregate	Bases de agregados Clase 3 (Sección 404-1.02) Sub base de agregados Clase 3 (Sección 403.1.02)*
BASE Y SUBBASE GRANULAR	P-219 / Recycled concrete aggregate	Agregado de concreto reciclado**
	P-211 / Lime Rock	Subbase con arena o limo**
	P-154 / Uncrushed aggregate	Bases de agregados Clase 3 (Sección 404-1.02) Sub base de agregados Clase 3 (Sección 403.1.02)**
SUBBRASANTE		

NOTA *: Estos materiales constan en las especificaciones para pavimentación de la MOP [23].

NOTA **: Estos materiales no se encuentran especificados por la MOP, mas constan en el trabajo como información para futuras líneas de investigación.

Para el caso de los materiales se establece realizar el diseño para todas las combinaciones de capas disponibles presentadas en la Tabla 3-4, definiendo valores de la subrasante mínimo, promedio y máximo, para determinar la tendencia de variación de este parámetro y su influencia en el desempeño del pavimento, es así como para cada aeropuerto se obtienen un total de 60 diseños que serán analizados estructuralmente y económicamente en secciones posteriores. A continuación se presenta como ejemplo, en la Tabla 3-5, tres combinaciones de estructuras tipo, éstas se obtuvieron al variar el valor del k Value entre el mínimo (20.90 pci), promedio (230.65 pci) y máximo (440.40 pci), manteniendo constantes las capas de rodadura, base/subbase estabilizada y base/subbase granular. En el Anexo 1 se encuentran todas las combinaciones de capas obtenidas para cada aeropuerto.



Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8. Ejemplo de estructuras tipo obtenidas de las combinaciones de capas y variación del kValue de la subrasante.

ESTRUCTURA TIPO		
COMBINACIÓN	CAPA	ID
A	CAPA DE RODADURA	P-501
	BASE Y SUBBASE ESTABILIZADA	P304/ Cement treated base
	BASE Y SUBBASE GRANULAR	P-154 / Uncrushed aggregate
	SUBRASANTE	kValue = 20.90 pci
B	CAPA DE RODADURA	P-501
	BASE Y SUBBASE ESTABILIZADA	P304/ Cement treated base
	BASE Y SUBBASE GRANULAR	P-154 / Uncrushed aggregate
	SUBRASANTE	kValue = 230.65 pci
C	CAPA DE RODADURA	P-501
	BASE Y SUBBASE ESTABILIZADA	P304/ Cement treated base
	BASE Y SUBBASE GRANULAR	P-154 / Uncrushed aggregate
	SUBRASANTE	kValue = 440.40 pci

También se definen dos tipos de aeropuertos con características distintas que cubren las necesidades de transporte aéreo de las principales ciudades del país, para analizar la influencia del tráfico en el diseño y desempeño del pavimento, el detalle de la caracterización de cada aeropuerto está presentado en la sección anterior (Tabla 3-2 y 3-3). La razón de crecimiento anual se definió en función de la información presentada en el registro estadístico de entradas y salidas del país [20], donde para aeropuertos en los que se han integrado planes de gestión el crecimiento de salidas anuales ha alcanzado hasta el 5%, por lo que se determinó el 3% como un valor conservativo para el análisis.

▪ Obtención de los diseños, parámetros de salida software FAARFIELD

FAARFIELD tiene implementado en su codificación, procedimientos de diseño mecánico-empíricos, donde se utilizan capas elásticas y elementos finitos tridimensionales para definir el diseño final del pavimento [8]. Los parámetros de salida son los espesores de las capas que conforman a la estructura del pavimento, en este caso después de haber ingresado todas las



posibles combinaciones de variables detalladas en el Anexo 1, para cada aeropuerto A y B; se obtuvieron 120 diseños en total, los cuales serán analizados estadísticamente en secciones próximas.

- Ambiente de trabajo

FAARFIELD en su ventana de inicio presenta muestras de pavimento previamente configuradas en el software, además de opciones para iniciar un nuevo proyecto. En la Figura 3-1 se presenta el ambiente de trabajo, donde las muestras disponibles se categorizan según el nombre de la sección y el tipo de pavimento correspondiente, por otra parte los botones correspondientes a la etiqueta Organization brindan varias opciones, entre ellas generar un nuevo proyecto en base a las muestras predefinidas y finalmente los botones correspondientes a la etiqueta Data Input; Structure y Notes, permiten registrar los parámetros de entrada del diseño y obtener información de las secciones respectivamente.

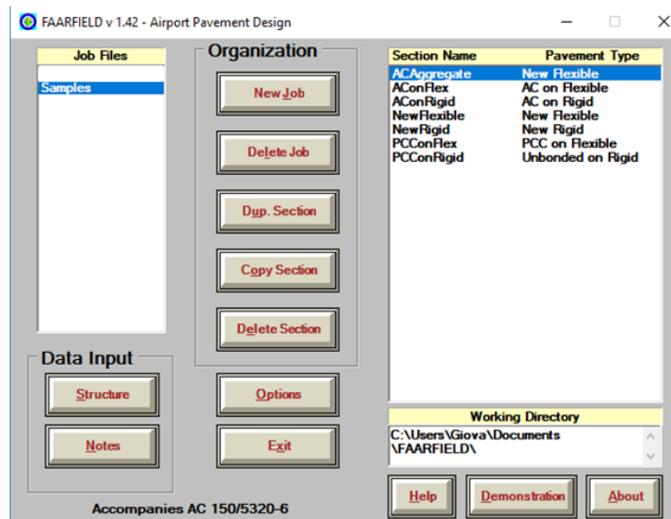


Figura 3-1. Ambiente de trabajo de FAARFIELD.

Para iniciar el registro del nuevo proyecto se elige el botón New Job, como se muestra en la Figura 3-2 (pasos 1 y 2), posteriormente se ingresa el nombre del proyecto, en este caso es “aercue”; este archivo se almacenará en la lista de trabajos, junto con el documento Samples.

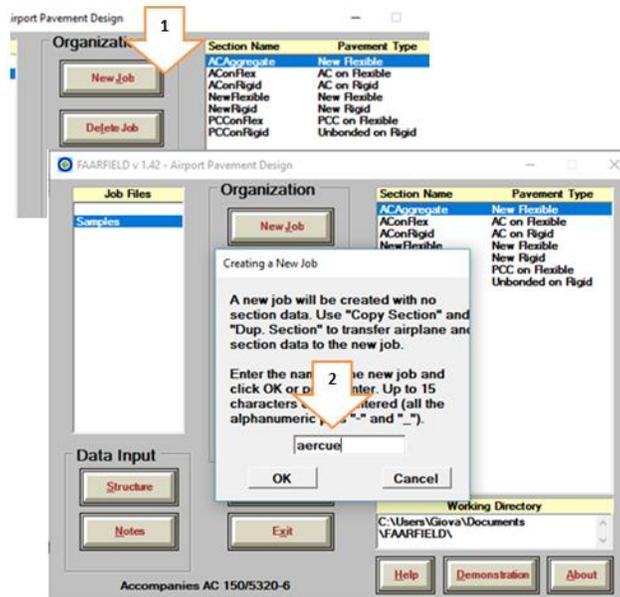


Figura 13. Creación de un nuevo proyecto.

Una vez generado el proyecto se necesita adicionar el tipo de sección de estudio, a partir de las muestras preestablecidas en FAARFIELD, para este caso se analizarán diseños de pavimentos rígidos, por lo que seleccionado el archivo Samples se escoge la opción Copy Section, como se muestra en la Figura 3-3(pasos 3 y 4). Posteriormente entre las secciones disponibles se selecciona la opción New Rigid y de la lista de archivos se define el trabajo “aercue”, el cuadro de diálogo que aparece permite nombrar la sección de pavimento nuevo para el proyecto “aercue”, para este caso se denominó a la sección como “c1c” y se finalizó la copia, el detalle de este procedimiento se presenta en la Figura 3-4 (pasos 5, 6, 7 y 8).



Figura 14. Definición del tipo de pavimento y sección para el proyecto.

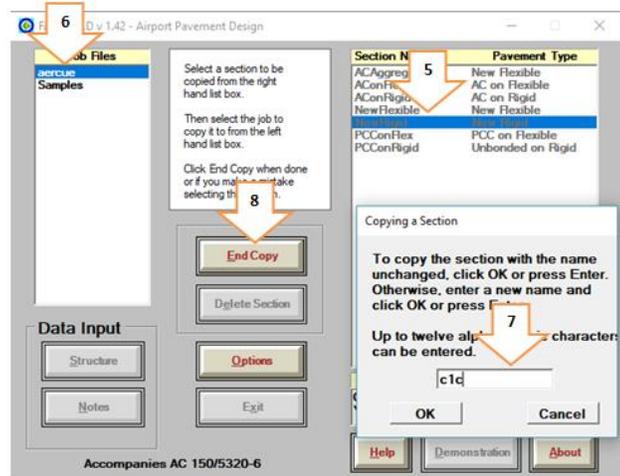


Figura 3-5. Definición del tipo de pavimento y sección para el proyecto.

Una vez definido el trabajo “aercue” y la sección “c1c”, se procede al ingreso de la información, seleccionando el botón Structure de la etiqueta Data Input, para la definición de los parámetros de entrada se presenta una nueva ventana, como se muestra en la Figura 3-5.

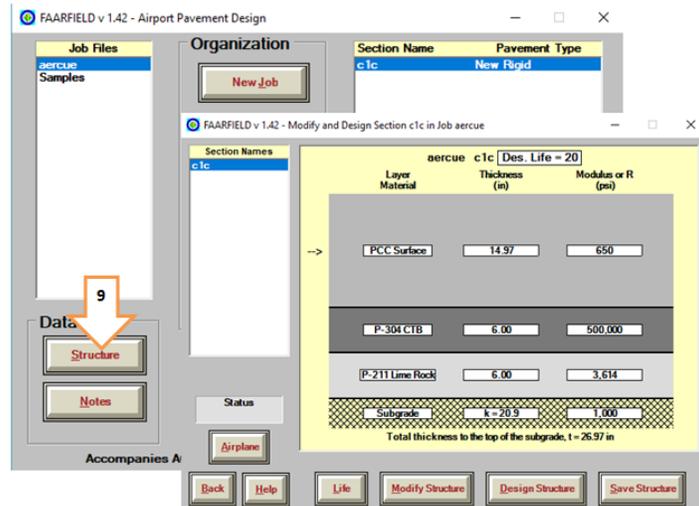


Figura 3-6. Ingreso de parámetros de entrada.

Como se estableció en el capítulo anterior los parámetros de entrada necesarios para el diseño de pavimentos rígidos de aeropuertos se refieren a las propiedades de los materiales y la caracterización del tráfico (Tabla 3-1, 3-2 y 3-3). Para ingresar información de la caracterización del tráfico se escoge el botón Airplane, que despliega una ventana que permite ingresar la información sobre la flota, es decir tipo de avión, número de salidas anuales y el porcentaje anual



de crecimiento, datos acerca del peso de despegue y presión de los neumáticos se definen por defecto según la información disponible en la biblioteca del software, como se presenta en la Figura 3-6.

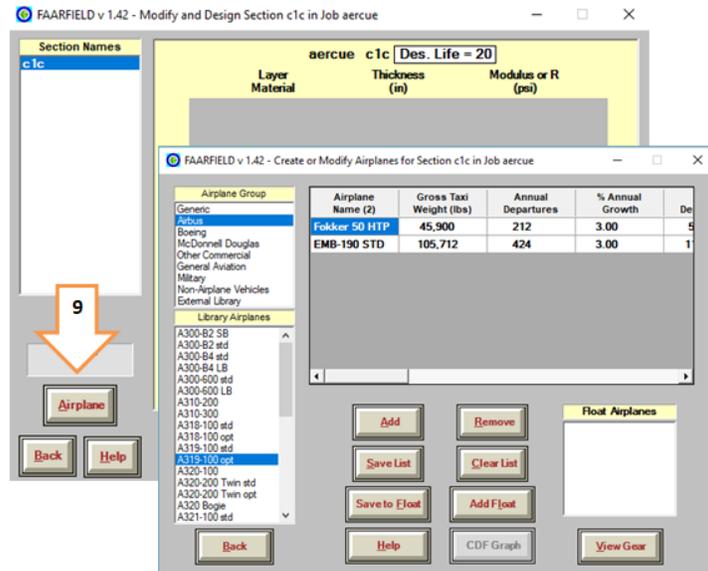


Figura 3-6. Ingreso de datos acerca de la caracterización del tráfico. Como ejemplo, se presenta el ingreso de un aeroplano con las siguientes características:

- ❖ Grupo de avión: Airbus
- ❖ Tipo de avión: Airbus 319
- ❖ Número de salidas anuales: 2703
- ❖ Porcentaje de crecimiento anual: 3%

El procedimiento a seguir es el siguiente y se presenta en las Figuras 3-7 y 3-8:

- Selección del grupo y tipo de avión (paso 10 y 11)
- Adición del avión a la flota (paso 12)
- Ingreso del número de salidas anuales (paso 13)
- Ingreso del porcentaje de crecimiento anual (paso 14)
- Almacenamiento de la información ingresada (paso 15 y 16)
- Retorno a la ventana de edición de parámetros de entrada (paso 17)

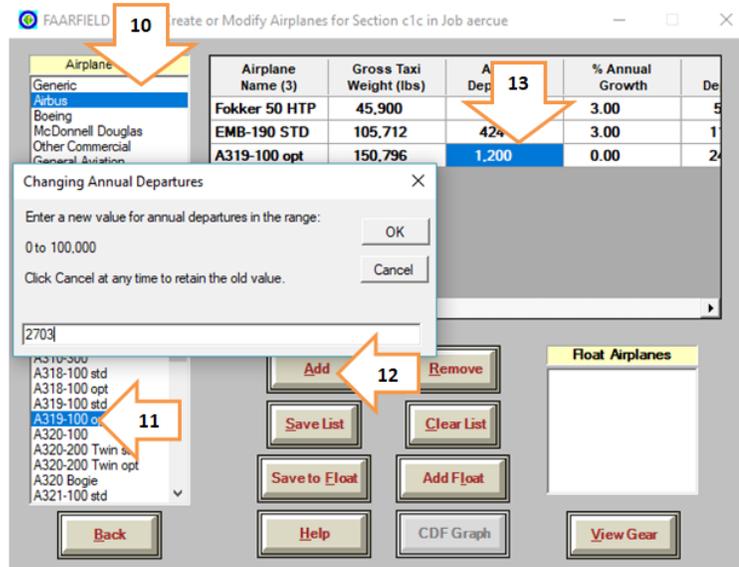


Figura 18. Ingreso de información acerca de la caracterización del tráfico.

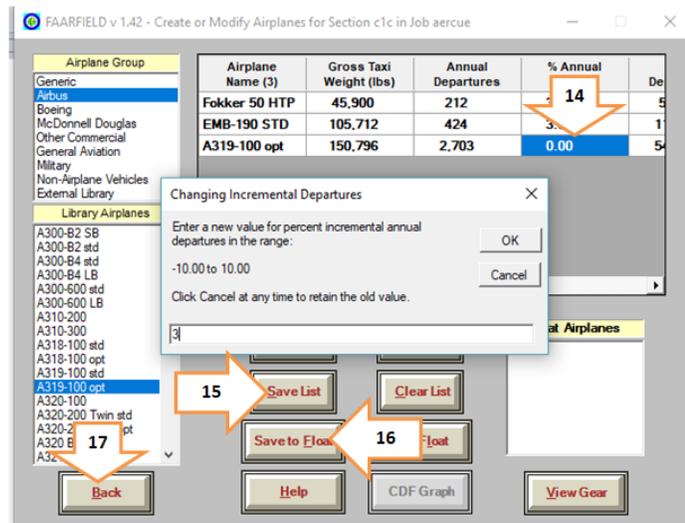


Figura 19. Ingreso de la información acerca de la caracterización del tráfico.

Finalmente el ingreso de la información de materiales se realiza seleccionando el tipo de base o subbase y el tipo de módulo de la capa subrasante que compondrá la estructura del pavimento. A continuación se presentará a detalle el ingreso de los datos de la primera combinación (Anexo 1):

- ❖ Capa de rodadura: P-501 (paso 18 y 19)

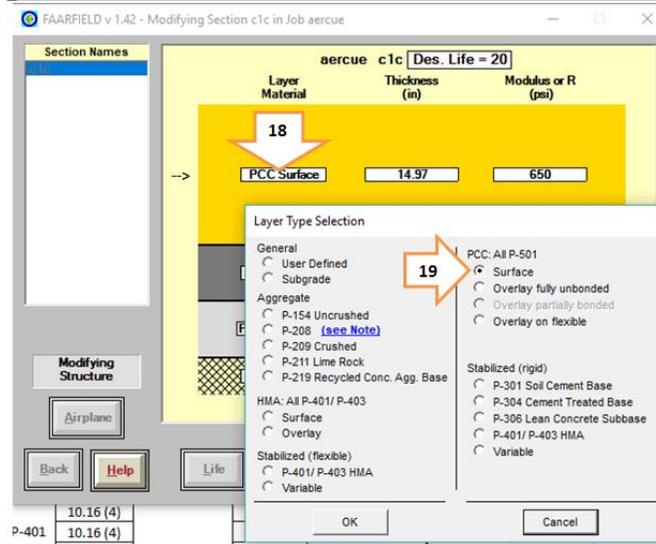


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-20. Ingreso de información acerca de los materiales.

❖ Base o subbase estabilizada: P-401 (paso 20 y 21)

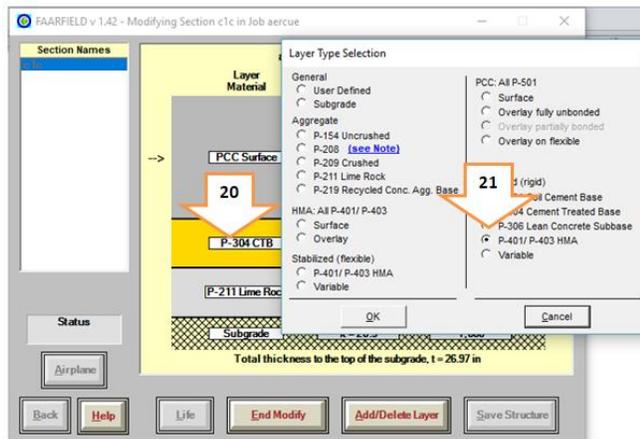


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-21. Ingreso de información acerca de los materiales.

❖ Base o subbase granular: P-209 (paso 22 y 23)

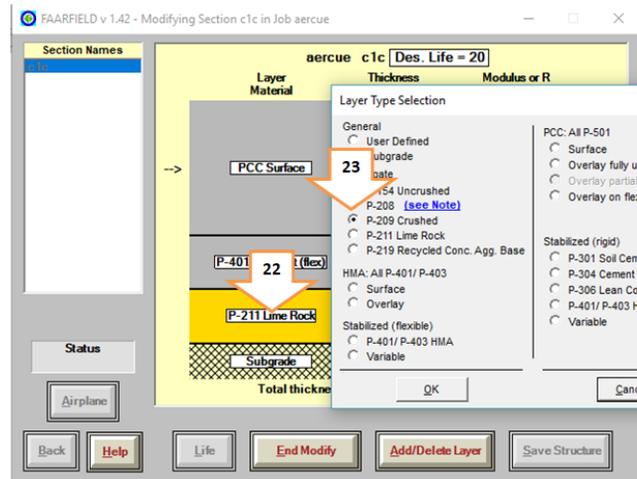


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-22. Ingreso de información acerca de los materiales.

❖ Módulo efectivo de la subrasante (k): 20.9 pci

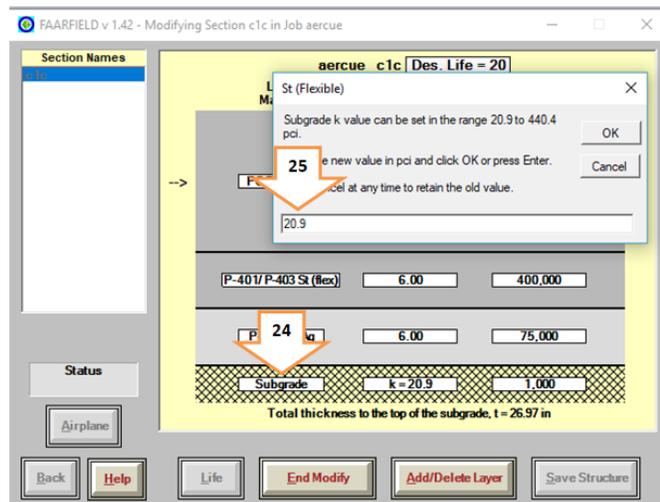


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-23. Ingreso de información acerca de los materiales.

Para obtener el diseño de la estructura del pavimento después de haber ingresado los datos de entrada necesarios, se procede a seleccionar el botón **End Modify** y posteriormente el botón **Design Structure** y los espesores de las distintas capas serán obtenidos.

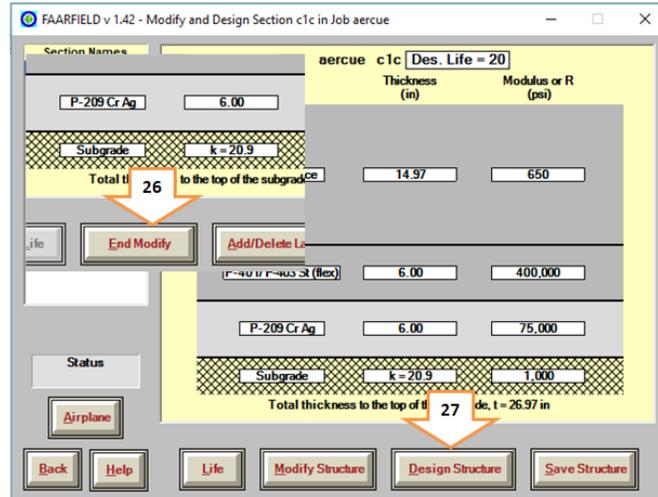


Figura 24. Finalización del ingreso de parámetros.

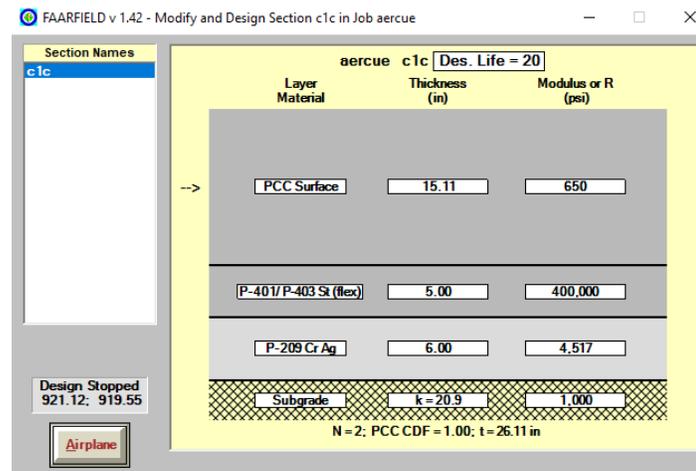


Figura 25. Obtención del diseño del pavimento.

○ Análisis de varianza de los diseños obtenidos, ANOVA de una vía

- Determinación de la significancia de las variables en el diseño del pavimento, utilizando el software SAS (Statistical Analysis Software)

Para determinar el nivel de influencia de las variables en el cálculo del espesor de las capas del pavimento se aplica la técnica ANOVA de una vía para cada uno de los parámetros de



entrada. Con la ayuda del software JMP se define la significancia de las variables en el diseño del pavimento y definición del espesor de las distintas capas, los parámetros de entrada y de salida designados para el análisis se seleccionaron analizando el Anexo 2, según la variabilidad presentada en el proceso de diseño, como se puede observar en este anexo los espesores obtenidos para la CAPA DE BASE/SUBBASE GRANULAR no presentan variación, por lo que se seleccionó para el análisis los parámetros de salida: ESPESOR PCC y CAPA DE BASE/SUBBASE ESTABILIZADA, que presenta un rango de variación de 9.94 in (25.25 cm) y de 2 in (5 cm), respectivamente; por otra parte los parámetros de entrada seleccionados fueron: MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA, MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR, k DE LA SUBRASANTE, CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO.

- Condiciones para aplicar ANOVA de una vía en JMP

- Se permite relacionar dos variables (dependiente – independiente)
- La variable dependiente es cuantitativa, es decir adquiere valores del tipo numérico, ya sea ordinal, nominal, o continuo.
- La variable independiente es cualitativa, es decir adquiere valores categóricos que pueden ser ordinales o nominales.

De acuerdo al condicionamiento presentado anteriormente se redefinieron los valores para los parámetros: MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA, MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR, k DE LA SUBRASANTE, CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO, de la siguiente manera:

- MÓDULO DE LA BASE/SUBBASE ESTABILIZADA: a este parámetro se lo categorizó en 4 grupos, como se aprecia en la Tabla 3-6, los mismos que hacen referencia a los distintos módulos utilizados en el diseño, así para el análisis esta variable será cualitativa de tipo nominal.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9.Categorización del MÓDULO DE LA BASE/SUBBASE ESTABILIZADA.

MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA(psi)	
P-401/P-403	Mezcla de asfalto en caliente
P-306	Base de agregado con concreto de baja resistencia
P-304	Base estabilizada con cemento
P-301	Suelo estabilizado con cemento

- MÓDULO DE LA BASE/SUBBASE GRANULAR: a este parámetro se lo categorizó en 5 grupos, como se aprecia en la Tabla 3-7, los mismos que hacen referencia a los



distintos módulos utilizados en el diseño, así para el análisis esta variable será cualitativa de tipo nominal.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-10. Categorización del MÓDULO DE LA BASE/SUBBASE GRANULAR.

MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR(psi)	
P-209	Base de agregado grueso triturado
P-208	Base de agregado grueso
P-219	Concreto con agregados reciclados
P-211	Base de agregado grueso y roca limosa
P-154	Subbase de agregado grueso

- **MÓDULO EFECTIVO DE LA SUBRASANTE (k de la SUBRASANTE):** a este parámetro se lo categorizó en 3 grupos, como se aprecia en la Tabla 3-8, los mismos que hacen referencia a los distintos módulos efectivos utilizados en el diseño, así para el análisis esta variable será cualitativa de tipo ordinal, ya que los valores para adjudicados van del mínimo al medio y por último al máximo del rango especificado según el AC 150/5320 6D [8].

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11. Categorización del MÓDULO EFECTIVO DE LA SUBRASANTE.

MÓDULO EFECTIVO DE LA SUBRASANTE (k SUBRASANTE) (pci)	
MÍNIMO	20.9
MEDIO	230.65
MÁXIMO	440.4

- **CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO:** a este parámetro se lo categorizó en 2 grupos, como se aprecia en la Tabla 3-9, los mismos que hacen referencia a las características de cada aeropuerto en el diseño (Tabla 3-2 y 3-3), así para el análisis esta variable será cualitativa de tipo nominal.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-12. Categorización del Tráfico.

CARACTERIZACIÓN TRÁFICO	
AEROPUERTO A	
AEROPUERTO B	



- Valores estadísticos que se obtienen del análisis en JMP

Los resultados de la prueba ANOVA de una vía en JMP, se presentan como en la Tabla 3-10, a continuación:

Tabla 3-10. Representación de resultados de la prueba ANOVA de una vía.

ANÁLISIS DE LA VARIANZA: MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA (psi)					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Pvalue
MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA (psi)	4	1.3652	0.3413	0.0164	0.995
Error	145	3020.7656	20.8329		
C. Total	149	3022.1308			

▪ **Obtención de un modelo matemático para determinar el espesor de las capas del pavimento.**

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de varianza, se definirá un modelo que permita calcular con alta proximidad el espesor de las capas del pavimento. El análisis estadístico preliminar permite definir que variables intervienen en mayor proporción en el diseño, aquellas cuyos P-value sean menores a 0.05 (5%). Para definir los modelos se precisó analizar el comportamiento de las variables independientes (MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA, MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR) con respecto a las variables dependientes (ESPESOR PCC Y ESPESOR BASE/SUBBASE ESTABILIZADA) para cada aeropuerto (A y B).

○ **Evaluación del desempeño de los diseños obtenidos**

▪ **Análisis estructural con software**

- Ambiente de trabajo

WESLEA en su ventana de inicio presenta la opción de ingreso de datos (paso1), permitiendo caracterizar la estructura del pavimento en función de la estructura (Structure) y cargas (Loads);



además el programa realiza el análisis a distintas profundidades establecidas por el usuario (Evaluation) (Figura 3-15).

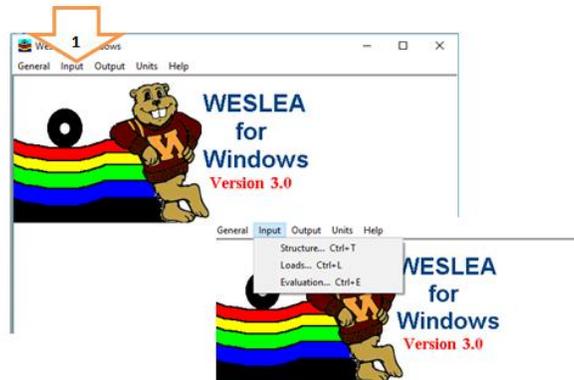


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-26. Página de inicio WESLEA.

Para el ingreso de los parámetros de entrada se selecciona la opción Structure (paso 2), la misma que despliega la siguiente ventana (Figura 3-16):

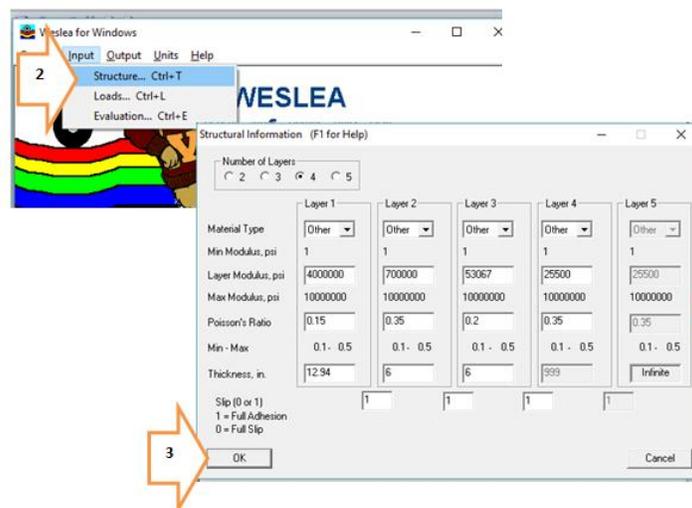


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-27. Ingreso de la caracterización de materiales.

En esta ventana el usuario debe ingresar la información necesaria de la estructura del pavimento, como:

- Número de capas del pavimento
- Caracterización de los materiales (módulo, razón de Poisson y espesor de las capas respectivas)



A manera de ejemplo la Figura 3-16 presenta el ingreso de los parámetros de entrada correspondientes a la combinación 17 (Anexo 1), donde se tienen 4 capas que conforman al pavimento con las siguientes características:

- Layer 1: PCC
Módulo (psi): 4' 000000
Razón de Poisson: 0.15
Espesor (in): 12.94
- Layer 2: Base estabilizada
Módulo (psi): 700000
Razón de Poisson: 0.35
Espesor (in): 6.00
- Layer 3: Base granular
Módulo (psi): 53067
Razón de Poisson: 0.20
Espesor (in): 6.00
- Layer 4: Subrasante
Módulo (psi): 25500
Razón de Poisson: 0.35

Después de haber ingresado los parámetros antes detallados se selecciona el botón OK (paso 3) para guardar los cambios, en seguida se procede a ingresar la información de las cargas, seleccionando la pestaña Input nuevamente (paso 4), se escoge la opción Loads (opción 5), desplegando la ventana que se presenta en la Figura 3-17:

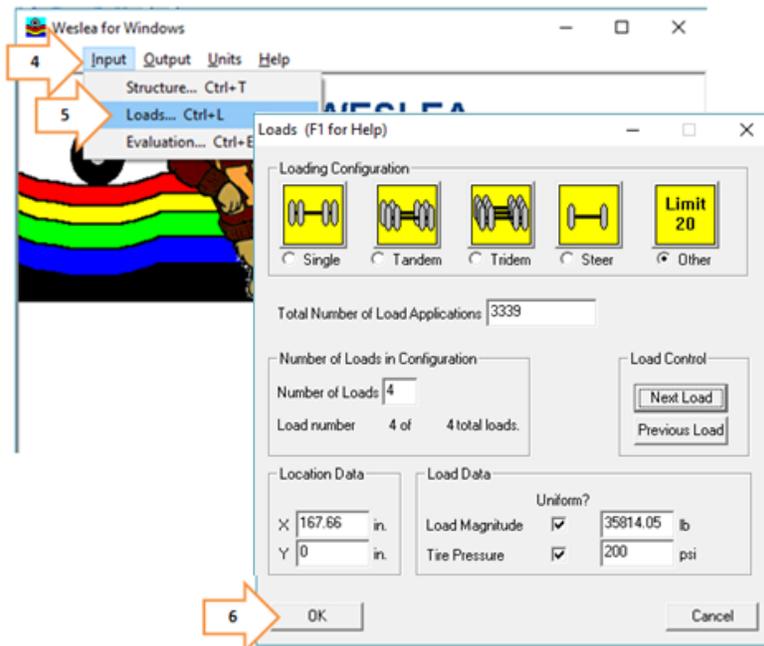


Figura 3-17. Ingreso de la caracterización de tráfico.



En esta ventana el usuario debe ingresar información acerca del tipo y geometría del tren de aterrizaje, número de salidas anuales, presión y cargas soportadas por los neumáticos, a manera de ejemplo la Figura 3-17 presenta el ingreso de los parámetros de entrada correspondientes a la combinación 17, cabe recalcar que la geometría del tren de aterrizaje seleccionada de la flota fue la del aeroplano que mayor colaboración al CDF posee; los parámetros de entrada del aeropuerto A (Tabla 3-2) son:

- Configuración de cargas: Doble, se seleccionó la opción Other para definir el espaciamiento entre los neumáticos.
- Número de salidas anuales: 3339
- Coordenadas de los neumáticos (in):
 - Neumático 1: (-167,7 ; 0)
 - Neumático 2: (-131.16 ; 0)
 - Neumático 3: (131.16 ; 0)
 - Neumático 4: (167.7 ; 0)
- Cargas (por neumático):
 - Carga (lb): 35814.05
 - Presión (in): 200

Luego de haber ingresado los parámetros de entrada de la caracterización del tráfico se selecciona el botón OK (paso 6).

Por último se selecciona la pestaña Input (paso 7) y se selecciona la opción Evaluation (paso 8) para definir los puntos de análisis de la estructura del pavimento (Figura 3-18).

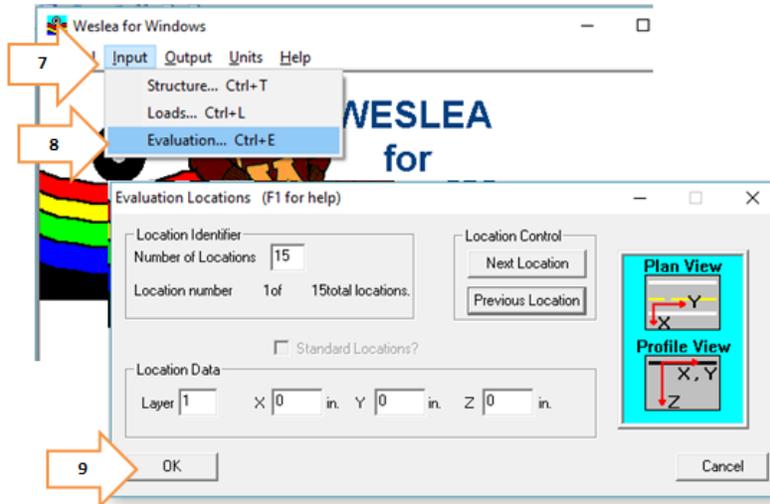


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-29. Ingreso de puntos de análisis.

Los puntos de análisis se establecieron en función del espesor de la estructura obtenida, para la combinación 17 se tienen las siguientes profundidades:

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-14. Profundidades para el análisis estructural.

PUNTO	PROFUNDIDAD (in)
1	0.00
2	-6.47
3	-12.93
4	-12.94
5	-12.95
6	-15.94
7	-18.93
8	-18.94
9	-18.95
10	-21.94
11	-24.93
12	-24.94
13	-44.94
14	-94.94



Para obtener los parámetros de salida se debe seleccionar la pestaña Output (paso 10), junto con la opción View Output (paso 11), se desplegará una ventana con los resultados del análisis estructural, como se muestra en la Figura 3-19.

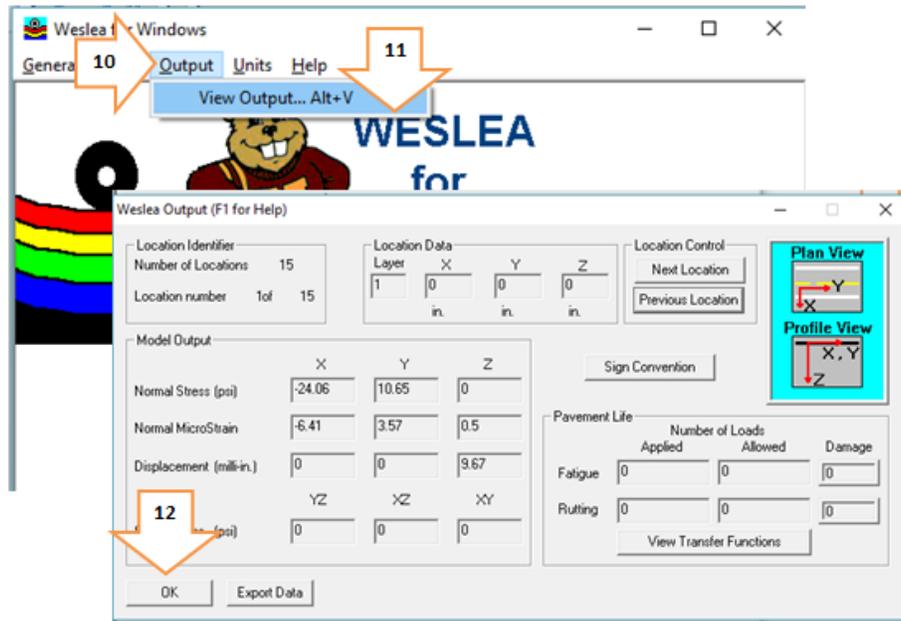


Figura 3-19. Resultados del análisis estructural.

▪ Análisis económico

El análisis económico se realizó mediante un LCCA, a manera de ejemplo se presentará el desarrollo del análisis del costo de ciclo de vida para la combinación 17 del Aeropuerto A. Los costos materiales se determinaron en función a los precios unitarios de los mismos (Tabla 3-12).

• Detalles generales

Método de diseño utilizado: AC 150/5320-6D de la FAA

Clasificación vial: pista de aterrizaje

• Análisis del costo de ciclo de vida

- Selección del periodo de análisis: según lo sugerido por la FAA se escogió un periodo de análisis de 20 años. El periodo de análisis debe ser lo suficientemente largo para abarcar el periodo de desempeño inicial y al menos una de las actividades de mantenimiento o rehabilitación para las estrategias planificadas.
- Selección de la tasa de descuento real: 4%



- Cálculo de los costos iniciales para la agencia: en esta etapa se usaron los precios más altos de la licitación para pavimentos rígidos. La Figura 3-20 presenta el detalle de los costos iniciales para la agencia tanto para la alternativa de diseño en FAARFIELD como para el modelo.
- Cálculos de los costos de usuario: estos costos no fueron determinados.
- Cálculos de los costos futuros para la agencia: en esta etapa se determinaron para todas las posibilidades de diseño 2 rehabilitaciones que consisten en el sellado de grietas, la primera a los 10 años y la segunda a los 19 años. La Figura 3-20 presenta el detalle de los costos futuros para la agencia tanto para la alternativa de diseño en FAARFIELD como para el modelo.
- Cálculo del valor residual: se asumió una vida de diseño de 40 años, por lo que aún quedan 20 años de vida remanente después del periodo de análisis de 20 años. A continuación la Ecuación 3.1 presenta la expresión matemática para determinar el valor residual. La Figura 3-20 presenta el detalle de los valores residuales para la alternativa de diseño en FAARFIELD como para el modelo.

$$Valor\ residual = \frac{costo\ inicial\ de\ agencia\ x\ vida\ remanente}{vida\ de\ diseño}$$

Ecuación 3.1

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-15. Precios unitarios de los materiales [23].

MATERIAL (Región)	Unidad	Precio (\$)
Pavimento de hormigón de Cemento Portland (Sección 405-8)	m3	121.24
Bases de Hormigón Asfáltico Mezclado en Planta (Sección 404-5)	m3	97.79
Concreto de baja resistencia	m3	100.00
Base de Agregados Estabilizada con Cemento (Sección 815-2.03)	m3	14.50
Base de Suelo - Cemento (Sección 815-2.02)	m3	50.00
Bases de agregados Clase 1 y 2 (Sección 404-1.02) Sub base de agregados Clase 1 y 2 (Sección 403.1.02)	m3	8.70
Bases de agregados Clase 3 (Sección 404-1.02) Sub base de agregados Clase 3 (Sección 403.1.02)	m3	8.70



Agregado de concreto reciclado	m3	35.00
Subbase con arena o limo	m3	19.30
Bases de agregados Clase 3 (Sección 404-1.02) Sub base de agregados Clase 3 (Sección 403.1.02)	m3	8.70

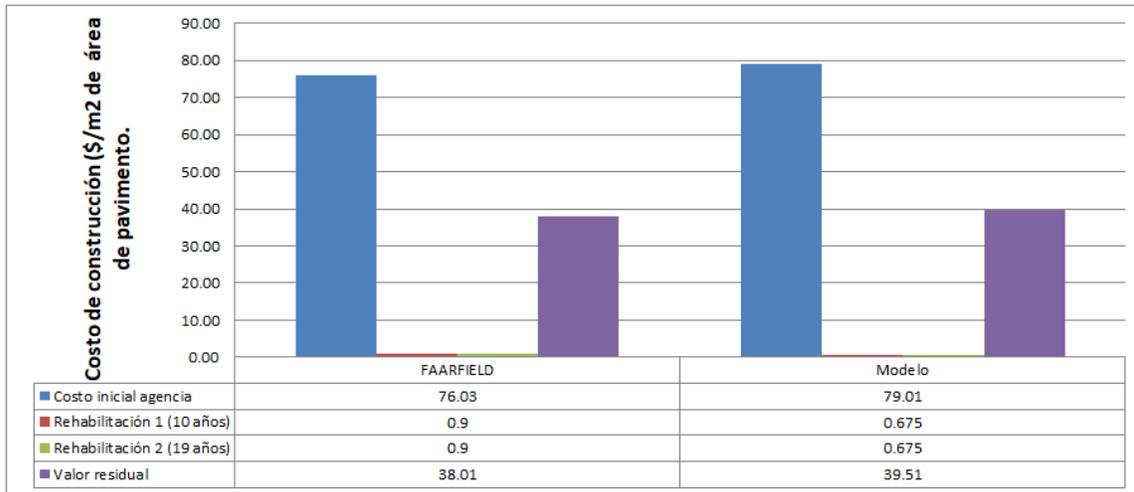


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-31. Análisis del costo de ciclo de vida para las alternativas de diseño.

▪ Comparación de alternativas:

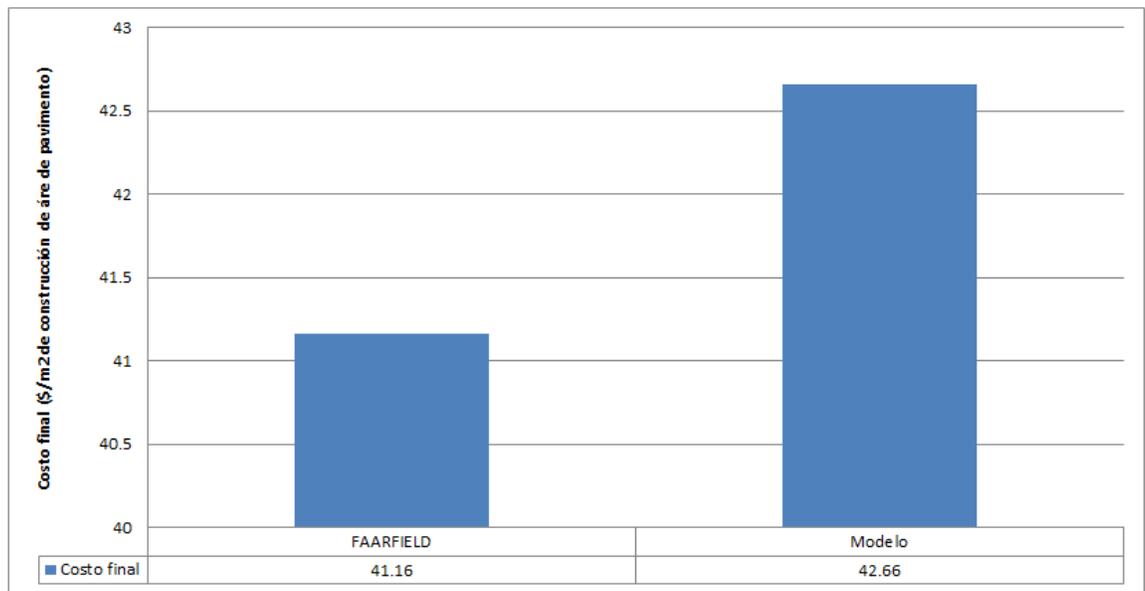


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-32. Costo final de las alternativas.

▪ Análisis de impacto ambiental

A partir de los factores de emisión de los materiales se establece el total de gases de efecto invernadero emitidos en la etapa de construcción según la Ecuación 2.23. La Tabla 3-13 presenta el detalle de los factores para cada uno de los materiales utilizados en los diseños propuestos.

Tabla 3-13. Factores de emisión para los materiales usados en el diseño [19].

Material (FAA)	Unidad	Factor de emisión	Unidades
P-501 / PCC	m3	244.00	kg CO ₂ eq / m3
P-401 o P-403 / Mezcla de asfalto en caliente	t	46,34	kg CO ₂ eq / t
P-306 / Concreto de baja resistencia	m3	244.00	kg CO ₂ eq / m3
P304/ Base estabilizada con cemento	t	31.25	kg CO ₂ eq / m3
P-301 / Suelo cemento	t	26.96	kg CO ₂ eq / m3
P-209 / Agregado triturado	t	3.70	kg CO ₂ eq / m3
P-208 / Agregado	t	3.70	kg CO ₂ eq / m3
P-219 / Agregado de concreto reciclado	m3	234.00	kg CO ₂ eq / m3
P-211 / Roca limosa	t	3.70	kg CO ₂ eq / m3
P-154 / Agregado no triturado	t	3.70	kg CO ₂ eq / m3

A manera de ejemplo en la Figura 3-22 se presentan las emisiones de CO₂ para la combinación de diseño 17 del aeropuerto A.

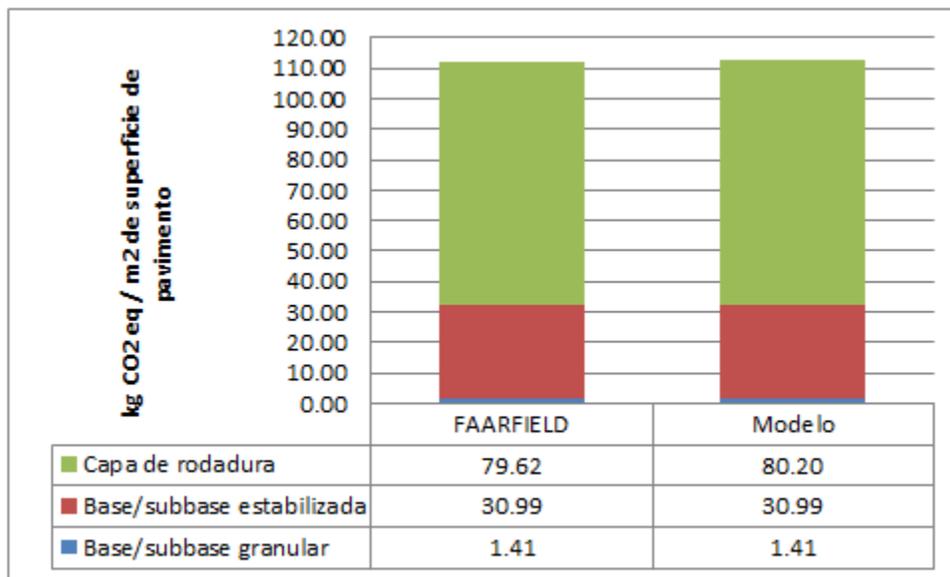


Figura 3-22. Comparación de impacto ambiental combinación de diseño 17.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

○ Obtención de los diseños con FAARFIELD

Como se indicó en la sección anterior los diseños se obtuvieron utilizando el software avalado por la FAA, en total se definieron 120 estructuras posibles de la variación de parámetros, la Tabla 4-1 presenta un resumen de los resultados y el detalle de todos los diseños se presenta en el Anexo 2. El criterio de diseño utilizado en este programa es el de la contribución al daño, CDF, los indicadores obtenidos para el aeropuerto A y B se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-1. Resumen de los diseños obtenidos.

AEROPUERTO A										
CAPAS										
COMB.	CAPA DE RODADURA			BASE/SUBBASE ESTABILIZADA			BASE/SUBBASE GRANULAR			SUBRA_SANTE
	ID	ESPE_SOR	MÓDU_LO	ID	ESPE_SOR	MÓDU_LO	ID	ESPE_SOR	MÓDU_LO	k
		(in)	(psi)		cm (in)	(psi)		cm (in)	(psi)	(pci)
1	P-501	15.11	4,000,000	P-401/P-403	5.00	400,000	P-209	6.00	4,517	20.90
20	P-501	13.13	4,000,000	P-304	6.00	500,000	P-208	6.00	53,067	230.65
40	P-501	14.78	4,000,000	P-306	6.00	700,000	P-211	6.00	3,614	20.9

AEROPUERTO B										
CAPAS										
CO MB.	CAPA DE RODADURA			BASE/SUBBASE ESTABILIZADA			BASE/SUBBASE GRANULAR			SUBRA_SANTE
	ID	ESPE_SOR	MÓDU_LO	ID	ESPE_SOR	MÓDU_LO	ID	ESPE_SOR	MÓDU_LO	k
		cm (in)	(psi)		cm (in)	(psi)		cm (in)	(psi)	(pci)
2	P-501	17.36	4,000,000	P-401/P-403	6.00	400,000	P-209	6.00	53,067	230.65
24	P-501	17.00	4,000,000	P-301	5.00	250,000	P-208	6.00	93,657	440.40
47	P-501	17.49	4,000,000	P-301	6.00	250,000	P-211	6.00	42,453	230.65



Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-18. Contribución al daño por cada flota de aeropuerto

	AERONAVE	CDF
AEROPUERTO A	Airbus 319	1
	ATR 42-500	0
	Embraer 190	0
	A 321	0
AEROPUERTO B	Airbus 319	0
	Airbus 320	0
	Airbus 320 100/200	0
	Airbus A330-200	0
	ATR 42-300	0
	Boeing 737-700	0
	Boeing 737-800	0
	Boeing 767-300	0
	Boeing 777-200	1
	Embraer ERJ-190	0

○ **Análisis estadístico de los diseños obtenidos**

- **Determinación de la significancia de las variables en el diseño del pavimento, utilizando el software JMP.**

Como se expresa en el capítulo anterior, parte de la metodología de trabajo consiste en convertir las variables independientes de tipo cuantitativo a cualitativo, a continuación en la Tabla 4-3 se presenta un resumen de los parámetros utilizados en el análisis, mientras que el Anexo 3 se presenta la matriz total de los distintos valores que adquirirán los parámetros de entrada y salida en el estudio. Del análisis de varianza (ANOVA de una vía) se obtuvieron los siguientes resultados de influencia de las variables independientes que intervienen en el diseño:



Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-19. Resumen de los parámetros utilizados en el análisis de varianza.

PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE VARIANZA				
SALIDA	ENTRADA			
ESPESOR PCC (in)	MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA(psi)	MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR(psi)	k SUBRASANTE (pci)	CARACTERIZACIÓN TRÁFICO
15.11	P-401	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.29	P-401	P-209	MEDIO	AEROPUERTO A
13.58	P-401	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.99	P-306	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.14	P-306	P-209	MEDIO	AEROPUERTO A
13.46	P-306	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO A

- Capa de rodadura:

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-20. Resultados obtenidos del análisis de varianza para el módulo base / subbase estabilizada.

Análisis de la varianza: MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA (psi)					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Prob > F
MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA (psi)	3	1.3647	0.4549	0.0219	0.9956
Error	116	2410.0099	20.7759		
C. Total	119	2411.3746			

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-21. Resultados obtenidos del análisis de varianza para el módulo base / subbase granular.

ANÁLISIS DE LA VARIANZA: MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR (psi)					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Prob > F
MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR (psi)	4	0.7572	0.1893	0.009	0.9998
Error	115	2410.6174	20.9619		
C. Total	119	2411.3746			



Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-22. Resultados obtenidos del análisis de varianza del módulo efectivo (k) de la subrasante.

ANÁLISIS DE LA VARIANZA: k DE LA SUBRASANTE (pci)					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Prob > F
k DE LA SUBRASANTE	2	790.6998	395.35	28.5412	<0.001
Error	117	1620.6748	13.852		
C. Total	119	2411.3746			

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-23. Resultados obtenidos del análisis de varianza de la caracterización del tráfico.

ANÁLISIS DE LA VARIANZA: CARACTERIZACIÓN DE TRÁFICO					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F	Prob > F
CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO	1	1212.407	1212.42	119.3227	<0.001
Error	118	1198.9675	10.16		
C. Total	119	2411.3746			

De los resultados de las Tablas 4-4, 4-5, 4-6 y 4-7 se observa que las variables de menos influencia en la determinación del espesor de la capa de rodadura son los módulos de la base o subbase de la capa estabilizada y granular, con Pvalue = 0.995 y P value = 0.998, respectivamente; mientras que las variables que afectan mayoritariamente el cálculo del espesor de la capa de rodadura son: el módulo efectivo (k) de la subrasante y la caracterización del tráfico, con P-value inferior a 0.001 para ambos parámetros. A continuación en la Tabla 4-8, se presenta el resumen del ajuste de los análisis de varianza realizados para las variables.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-24. Resumen del ajuste del análisis de varianza para la capa de rodadura.

RESUMEN DEL AJUSTE				
	MÓDULO BASE/SUBBASE ESTABILIZADA (psi)	MÓDULO BASE/SUBBASE GRANULAR (psi)	k SUBRASANTE (pci)	CARACTERIZACIÓN TRÁFICO
Rcuadrado	0.00045	0.00027	0.32552	0.50538
Rcuadrado ajust	-0.02712	-0.02731	0.31635	0.50203
Raíz del error cuadrático medio	4.56430	4.56472	3.72376	3.17807
Media de respuesta	17.14800	17.14800	17.14800	17.14800



▪ **Definición y selección de un modelo matemático que permita predecir el espesor de la capa de rodadura**

- Capa de rodadura

La primera aproximación de obtención del modelo se obtuvo de aplicar la regresión lineal en los datos en crudo, el Anexo 4 presenta los parámetros de entrada y salida utilizados, el modelo (Ecuación 4.1) y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$h_{PCC} = (-0.01303933k_{SUBRASANTE}) + (0.00048759 CT) + (15.3498005)$$

Ecuación 4.1

Donde:

$k_{SUBRASANTE}$: Módulo de reacción efectivo de la subrasante (k)

CT : Caracterización del tráfico (número de salidas anuales)

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-25. Resultados obtenidos de la regresión con los datos crudos.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.86657
Coeficiente de determinación R ²	0.75095
R ² ajustado	0.74669
Error típico	2.26559
Observaciones	120

A pesar de que en la primera aproximación se obtuvo un modelo de ajuste aceptable, Se realizaron más regresiones variando los parámetros de entrada mediante el tratamiento matemático de los mismos, en el Anexo 5 se presentan los parámetros de entrada utilizados y los nuevos espesores obtenidos al utilizar la siguiente ecuación (Ecuación 4.2), los datos obtenidos fueron los siguientes:

$$h_{PCC} = (1.33127261k'_{SUBRASANTE}) + (0.00048759 CT) + (21.6690249)$$

Ecuación 4.2

Donde:



$k'_{SUBRASANTE}$: Logaritmo base (1/2) del Módulo de reacción efectivo de la subrasante
 $(k' = \log_{1/2}k)$

$$1000 \text{ pci} \leq k \leq 50000 \text{ pci}$$

CT : Caracterización del tráfico (número de salidas anuales)

$$3339 \leq CT \leq 16377$$

Tabla 4-10. Resultados obtenidos de la regresión con tratamiento de los datos de entrada.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.90465
Coefficiente de determinación R^2	0.81840
R^2 ajustado	0.81529
Error típico	1.93464
Observaciones	120

Este segundo modelo presenta un mejor ajuste, $R^2_{ajustado} = 0.81529$, como se presenta en la Tabla 4.10, por lo que se define a la ecuación obtenida de esta regresión como adecuada para definir los espesores de la capa de rodadura, los resultados obtenidos para todas las combinaciones se presentan en el Anexo 6. El detalle del ajuste realizado se presenta en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Detalle del ajuste.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	21.66902	0.72823	29.75588	2.0943E-56	20.22681	23.11124
$\log(1/2)k_{SUBRASANTE}$ (pci)	1.33127	0.09336	14.25967	2.3675E-27	1.14638	1.51617
CARACTERIZACIÓN TRÁFICO	0.00049	2.7091E-05	17.998028	6	1.6822E-35	0.00043
					0.00043	0.00054

○ Evaluación del desempeño de los diseños

▪ Análisis estructural

Como se indicó en el capítulo anterior el análisis estructural se realizará mediante la determinación de esfuerzos normales y deformaciones del pavimento a distintas profundidades del mismo, determinando 14 puntos de interés que se presentarán en la figura a continuación (Figura 4-1), ubicados en: puntos medios del espesor de cada capa y en las interfaces de las capas del pavimento.

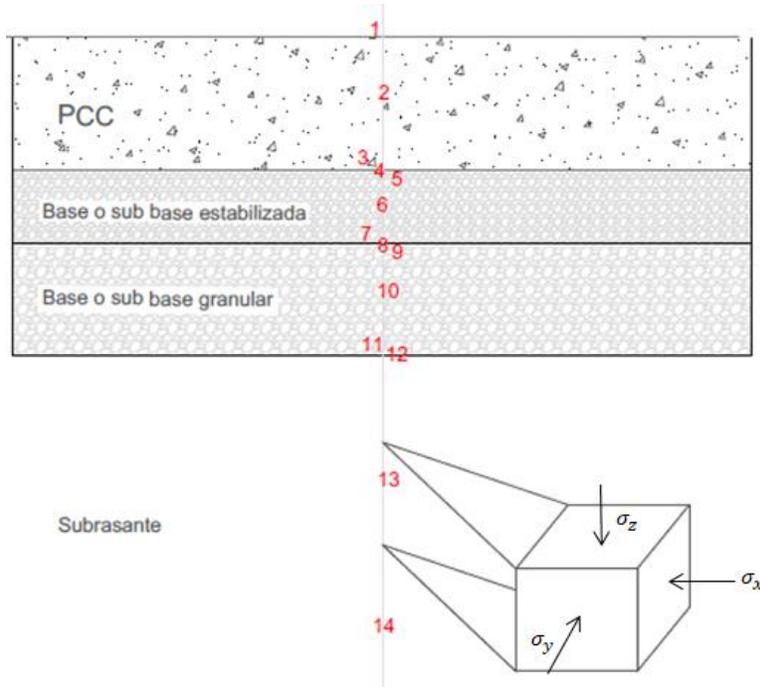


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-34. Representación de los esfuerzos normales y profundidades para el análisis estructural.

- Análisis individual de los diseños

Las estructuras analizadas para el aeropuerto A corresponden a los diseños: 22, 28, 43, 51, 57, 59, 8, 9 y 17, mientras que para el aeropuerto B los diseños seleccionados fueron: 25, 52, 10, 38, 54 y 18; el análisis se realizó tanto para los resultados obtenidos en FAARFIELD como para el modelo, el detalle de los parámetros utilizados para el análisis estructural (espesores, módulos, relación de Poisson) se presenta en el Anexo 7. A manera de ejemplo, con el fin de detallar y explicar resultados se presentan las gráficas de distribución de esfuerzos normales y deformación vertical para la combinación de diseño 28, obtenida con FAARFIELD, el detalle de los parámetros de entrada para el análisis estructural se presenta en la Tabla 4-12.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-28. Estructura de pavimento combinación 28.

AEROPUERTO A										
CAPAS										
COMB.	CAPA DE RODADURA			BASE/SUBBASE ESTABILIZADA			BASE/SUBBASE GRANULAR			SUBRASANTE
	ID	ESPE_ SOR	MÓDU_ LO	ID	ESPE_ SOR	MÓDU_ LO	ID	ESPE_ SOR	MÓDU_ LO	k VALUE
		(in)	(psi)		cm (in)	(psi)		cm (in)	(psi)	(pci)
28	P-501	14.78	4,000,000	P-306	6	700,000	P-219	6	4,517	20.9



○ Esfuerzo normal en X e Y

A continuación se presentan las gráficas de esfuerzo horizontal, obtenidas para la combinación de diseño 28, la Tabla 4-13 presenta el detalle de los datos necesarios para obtener las Figuras 4-2 y 4-3.

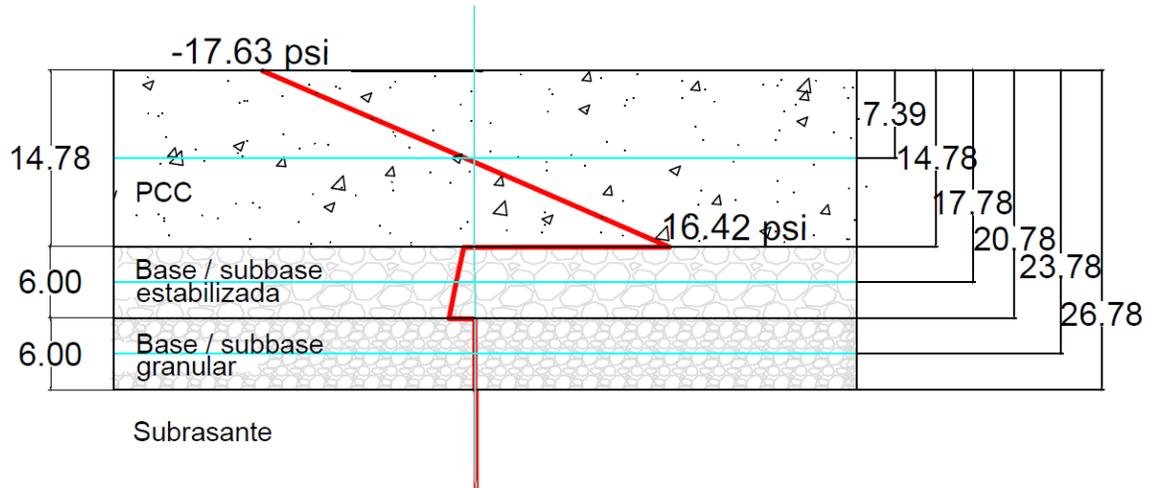


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-35. Gráfica del esfuerzo normal en X para la combinación 28.
NOTA: las dimensiones de profundidad se encuentran en pulgadas.

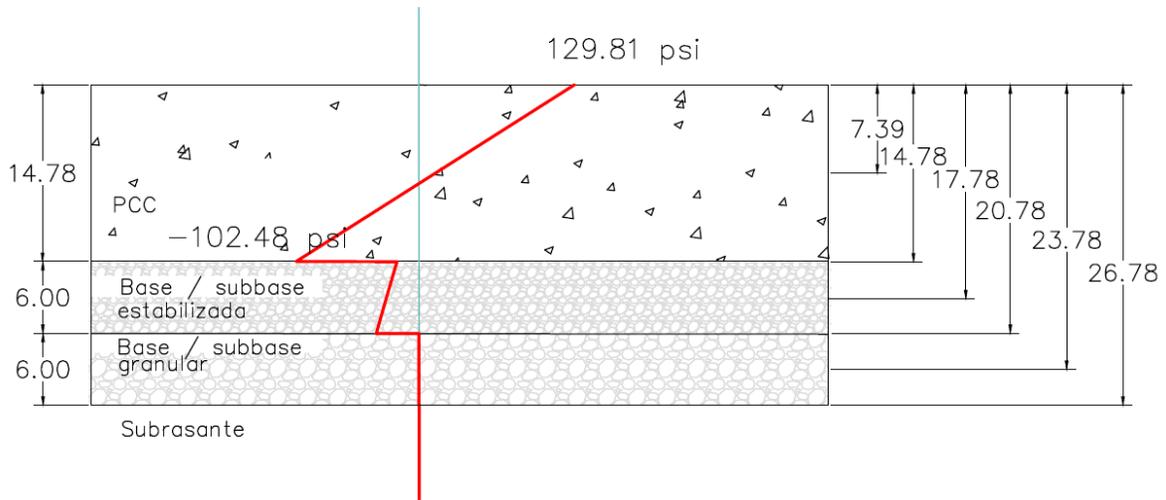


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-36. Gráfica del esfuerzo normal en Y para la combinación 28.
NOTA: las dimensiones de profundidad se encuentran en pulgadas.



Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-29. Esfuerzos horizontales - combinación 28.

COMBINACIÓN	PROFUNDIDAD	ESFUERZO NORMAL	
	(in)	(psi)	
		X	Y
28.00	0.00	-17.63	129.81
	-7.39	-0.49	13.54
	-14.77	16.42	-102.48
	-14.78	-0.77	-18.53
	-14.79	-0.78	-18.55
	-17.78	-1.44	-27.13
	-20.77	-2.04	-35.73
	-20.78	0.14	-0.10
	-20.79	0.14	-0.10
	-23.79	0.14	-0.15
	-26.77	0.14	-0.20
	-26.78	0.24	0.17
	-46.78	0.22	0.14
	-96.78	0.15	0.07

○ Esfuerzo normal en Z

A continuación se presenta la gráfica de esfuerzo vertical, obtenida para la combinación de diseño 28, la Tabla 4-14 presenta el detalle de los datos necesarios para obtener la Figuras 4-4.

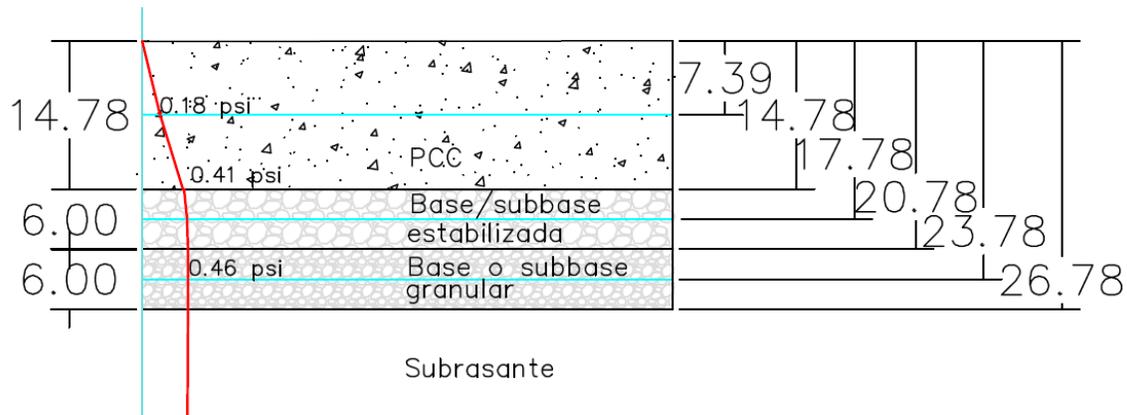


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-37. Gráfica del esfuerzo normal en Z para la combinación 28. NOTA: las dimensiones de profundidad se encuentran en pulgadas.



Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-30. Esfuerzos verticales - combinación 28.

COMBINACIÓN	PROFUNDIDAD	ESFUERZO
	(in)	NORMAL (psi) Z
28.00	0.00	0.00
	-7.39	0.18
	-14.77	0.41
	-14.78	0.42
	-14.79	0.42
	-17.78	0.45
	-20.77	0.46
	-20.78	0.46
	-20.79	0.46
	-23.79	0.46
	-26.77	0.46
	-26.78	0.46
	-46.78	0.45
	-96.78	0.42

o Deformación vertical

A continuación se presenta la gráfica de deformación vertical, obtenida para la combinación de diseño 28, la Tabla 4-15 presenta el detalle de los datos necesarios para obtener la Figuras 4-5.

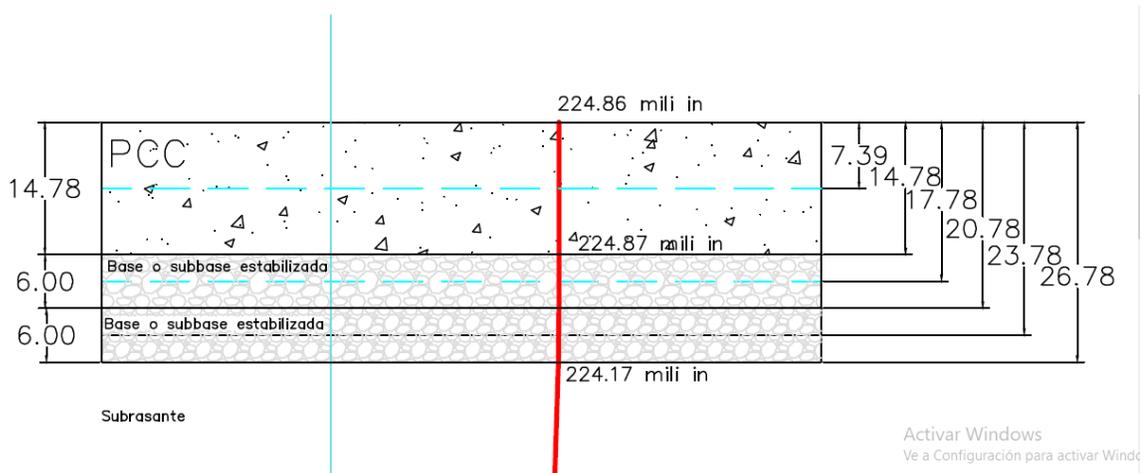


Figura ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-38. Deformación vertical del pavimento para la combinación 28. NOTA: las dimensiones de profundidad se encuentran en pulgadas.

Tabla ;Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-31. Deformación vertical - combinación 28.

COMBINACIÓN	PROFUNDIDAD	DEFORMACIÓN
	(mili in)	(mili in)



	(in)	Z
28.00	0.00	224.86
	-7.39	224.88
	-14.77	224.87
	-14.78	224.87
	-14.79	224.87
	-17.78	224.83
	-20.77	224.78
	-20.78	224.78
	-20.79	224.78
	-23.79	224.48
	-26.77	224.17
	-26.78	224.17
	-46.78	217.77
	-96.78	201.02

- Comparación del análisis estructural de los diseños obtenidos con FAARFIELD vs. Modelo

A continuación se comparará el desempeño estructural de los diseños obtenidos en FAARFIELD con los obtenidos con el modelo, a manera de ejemplo se presentará la comparación de la combinación de diseño 28.

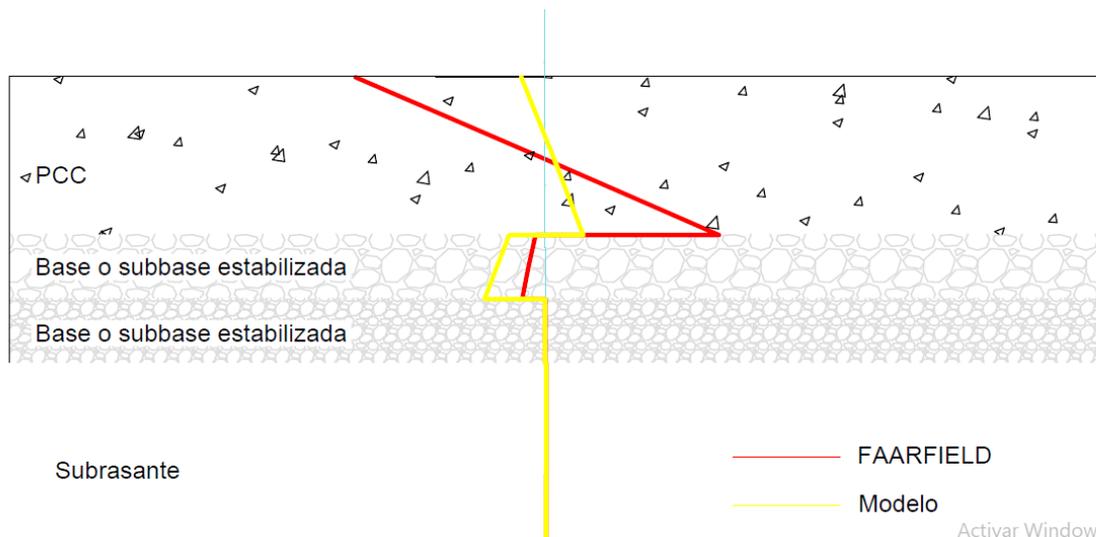


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-39. Comparación de esfuerzos normales en X – combinación 28.

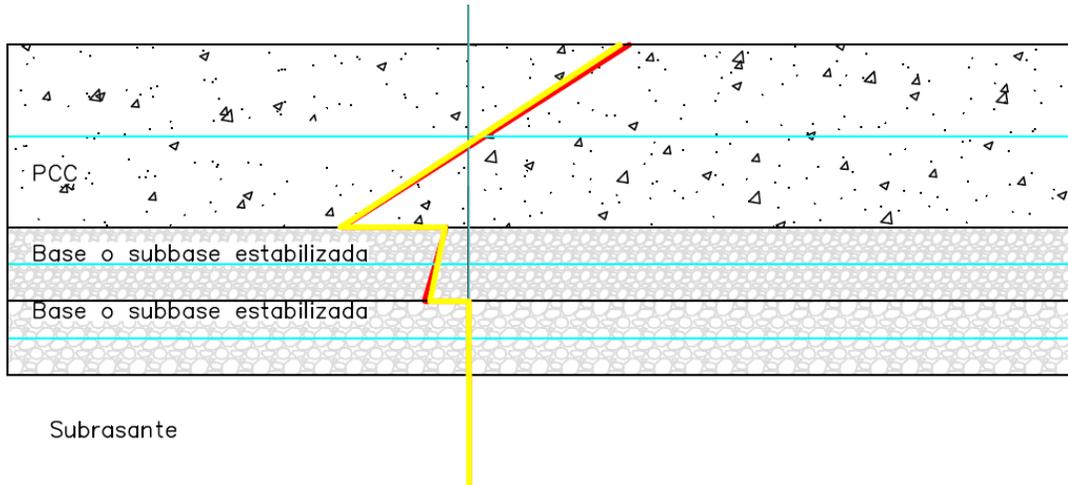


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-40. Comparación de esfuerzos en Y – combinación 28.

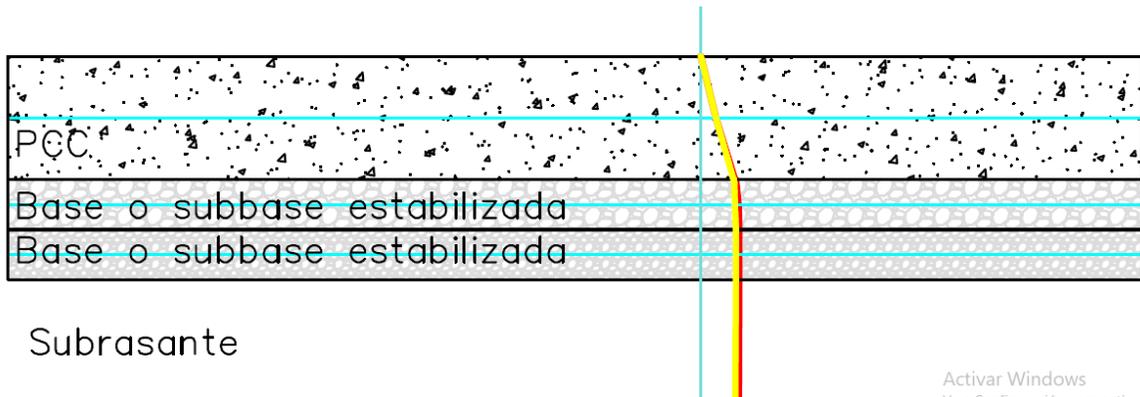


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-41. Comparación de esfuerzos en Z – combinación 28.

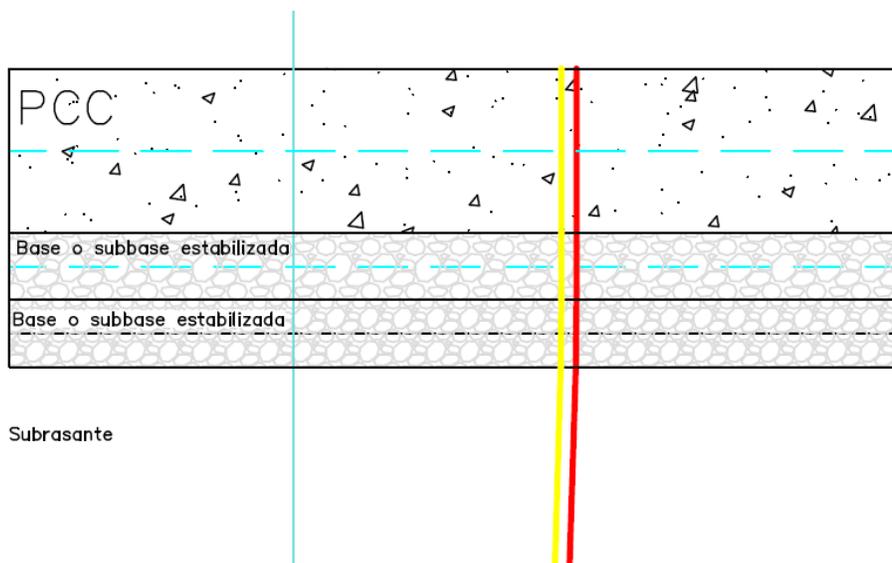


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-42. Comparación de deformaciones - combinación 28.



Las Figuras 4-6, 4-7, 4-8 y 4-9 presentan los esfuerzos horizontales en el eje X, Y y Z, además de las deformaciones de la estructura del pavimento, la gráfica de color rojo representa los resultados obtenidos del diseño en FAARFIELD, mientras que la gráfica amarilla representa los resultados obtenidos con el modelo, el detalle de los mismos se presenta en la Tabla 4-16 y 4-17, para FAARFIELD y el modelo respectivamente. El Anexo 8 presenta las gráficas de comparación de todos los diseños establecidos para el análisis y el Anexo 9 presenta los datos de esfuerzos y deformaciones a las distintas profundidades de análisis para las combinaciones de diseño seleccionadas.

La Figura 4-6 y 4-7 corresponden a los esfuerzos horizontales en los ejes X e Y, respectivamente; como se puede observar en las gráficas el valor de estos esfuerzos es alto en el rango de profundidades correspondiente a la capa de rodadura, a medida que incrementa la profundidad y el análisis se realiza en las capas inferiores los esfuerzos tienden a cero. Estos esfuerzos deben analizarse y limitarse especialmente en la parte inferior de la losa, debido a que son los responsables de la aparición de grietas en la superficie, debido a esto se analizarán estos esfuerzos para la combinación 28. De la Tabla 4-16 y 4-17 se tiene:

Diseño obtenido con FAARFIELD

- $\sigma_{x(h=-14.78)} = -0.77 \text{ psi}$
- $\sigma_{y(h=-14.78)} = -18.53 \text{ psi}$

Diseño obtenido del modelo

- $\sigma_{x(h=-17.46)} = -3.25 \text{ psi}$
- $\sigma_{y(h=-17.46)} = -19.33 \text{ psi}$

Tanto para los esfuerzos horizontales en X e Y el diseño obtenido del modelo posee los mayores esfuerzos en la parte inferior de la losa, por lo que habrá una gran probabilidad de que para este diseño propuesto exista mayor cantidad de grietas en la superficie que para el diseño obtenido con FAARFIELD.

Como se aprecia en la Figura 4-8 los esfuerzos verticales (Z) para el diseño con FAARFIELD son mayores esto se evidencia al analizar la Figura 4-9 donde las deformaciones obtenidas para este diseño también son mayores. Cabe recalcar que ambos diseños poseen respuestas estructurales semejantes, mas se recomendaría en cuenta los siguientes criterios para seleccionar uno de los dos:



- Esfuerzos horizontales en la parte inferior de la losa: el diseño de FAARFIELD para este caso, presentará una mejor respuesta en cuanto a los esfuerzos horizontales, para el caso de los esfuerzos en el eje x.
- Deformación: la deformación de las capas del pavimento para la combinación de diseño 28 son menores para el diseño obtenido del modelo, éstas son del orden de mili pulgadas.

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-32. Análisis estructural - combinación 28 FAARFIELD.

FAARFIELD					
COMBINACIÓN	PROFUNDIDAD (in)	ESFUERZO NORMAL (psi)			DEFORMACIÓN (mili.in)
		X	Y	Z	Z
28.00	0.00	-17.63	129.81	0.00	224.86
	-7.39	-0.49	13.54	0.18	224.88
	-14.77	16.42	-102.48	0.41	224.87
	-14.78	-0.77	-18.53	0.42	224.87
	-14.79	-0.78	-18.55	0.42	224.87
	-17.78	-1.44	-27.13	0.45	224.83
	-20.77	-2.04	-35.73	0.46	224.78
	-20.78	0.14	-0.10	0.46	224.78
	-20.79	0.14	-0.10	0.46	224.78
	-23.79	0.14	-0.15	0.46	224.48
	-26.77	0.14	-0.20	0.46	224.17
	-26.78	0.24	0.17	0.46	224.17
	-46.78	0.22	0.14	0.45	217.77
	-96.78	0.15	0.07	0.42	201.02



Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-33. Análisis estructural - combinación 28 Modelo.

MODELO					
COMBINACIÓN	PROFUNDIDAD (in)	ESFUERZO NORMAL (psi)			DEFORMACIÓN (mili.in)
		X	Y	Z	Z
28.00	0.00	-2.11	121.91	0.00	211.19
	-8.73	0.86	8.92	0.18	211.22
	-17.45	3.68	-103.86	0.39	211.20
	-17.46	-3.25	-19.30	0.40	211.20
	-17.47	-3.25	-19.33	0.40	211.20
	-19.96	-4.42	-25.36	0.41	211.17
	-22.45	-5.55	-31.41	0.42	211.12
	-22.46	0.10	-0.08	0.42	211.12
	-22.47	0.10	-0.08	0.42	211.12
	-25.46	0.10	-0.12	0.42	210.84
	-28.45	0.09	-0.16	0.42	210.56
	-28.46	0.21	0.16	0.42	210.56
	-48.46	0.19	0.13	0.41	204.74
	-98.46	0.13	0.07	0.38	189.63

El resumen del análisis para las estructuras propuestas (Aeropuerto A: 22, 28, 43, 51, 57, 59, 8, 9 y 47 – Aeropuerto B: 25, 52, 10, 38, 54 y 18) se presenta a continuación, donde se evaluarán: esfuerzos en la parte inferior de la losa (Tabla 4-18) y deformación en la superficie y puntos de interface (Tabla 4-19). Para el análisis de esfuerzos se determinó el menor para los ejes X e Y, y se definió como el esfuerzo de diseño al mayor de éstos dos; el porcentaje de reducción de esfuerzos hace referencia a cuanto disminuye un esfuerzo con respecto al otro.



Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-34. Análisis de esfuerzos horizontales en la parte inferior de la losa.

Combi nación	Profundidad		Esfuerzo normal X			Esfuerzo normal Y			Esfuerzo de diseño	
	(in)		(psi)			(psi)			(psi)	
	FAARFIELD	Modelo	FAARFIELD	Modelo	Alternativa esfuerzo mín	FAARFIELD	Modelo	Alternativa esfuerzo mín		
22- Aeropuerto A	-15.16	-17.46	0.25	-0.81	FAARFIELD 69.14% reducción de esfuerzos	-7.58	-7.57	Modelo 0.13% reducción de esfuerzos	-7.57	Modelo
28 - Aeropuerto A	-14.78	-17.46	-0.77	-3.25	FAARFIELD 76.31% reducción de esfuerzos	-18.53	-19.30	FAARFIELD 3.99% reducción de esfuerzos	-19.30	FAARFIELD
43 - Aeropuerto A	-14.97	-17.46	-0.25	-2.11	FAARFIELD 88.15% reducción de esfuerzos	-14.12	-14.43	FAARFIELD 2.15% reducción de esfuerzos	-14.12	FAARFIELD
51 - Aeropuerto A	-13.76	-11.60	1.26	0.97	Modelo 23.02% reducción de esfuerzos	0.14	0.17	FAARFIELD 17.65% reducción de esfuerzos	0.97	Modelo
57 - Aeropuerto A	-14.12	-11.60	1.61	1.22	Modelo 24.22% reducción de esfuerzos	0.16	0.22	FAARFIELD 27.27% reducción de esfuerzos	1.22	Modelo
59 - Aeropuerto A	-13.70	-12.85	1.53	1.47	Modelo 3.92% reducción de esfuerzos	0.00	0.05	FAARFIELD 100% reducción de esfuerzos	1.47	Modelo
8 - Aeropuerto A	-13.30	-12.85	2.73	2.66	Modelo 2.56% reducción de esfuerzos	0.00	0.06	FAARFIELD 100% reducción de esfuerzos	2.66	Modelo
9 - Aeropuerto A	-13.61	-12.85	1.43	1.32	Modelo 7.69% reducción de esfuerzos	0.17	0.19	FAARFIELD 10.53% reducción de esfuerzos	1.32	Modelo
17 - Aeropuerto A	-12.93	-11.60	18.80	17.53	Modelo 6.76% reducción de esfuerzos	-4.01	-2.71	Modelo 32.42% reducción de esfuerzos	17.53	Modelo
25 - Aeropuerto A	-26.50	-23.81	-50.71	-30.02	Modelo 40.8% reducción de esfuerzos	-204.22	-212.33	FAARFIELD 3.82% reducción de esfuerzos	-204.22	FAARFIELD



10 - Aeropuerto A	-26.69	-23.81	-51.15	-28.35	Modelo 44.57% reducción de esfuerzos	-208.70	-216.66	FAARFIELD 3.67% reducción de esfuerzos	-208.70	FAARFIELD
38 - Aeropuerto A	-17.51	-19.20	36.55	39.04	FAARFIELD 6.38% reducción de esfuerzos	0.00	3.05	FAARFIELD 100% reducción de esfuerzos	36.55	FAARFIELD
54 - Aeropuerto A	-17.28	-19.20	17.23	19.28	FAARFIELD 10.63% reducción de esfuerzos	3.81	3.46	Modelo 9.19% reducción de esfuerzos	17.23	FAARFIELD
18 - Aeropuerto A	-16.84	-17.96	15.98	17.59	FAARFIELD 9.15% reducción de esfuerzos	3.76	3.65	Modelo 2.93% reducción de esfuerzos	15.98	FAARFIELD

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-35. Deformaciones en la superficie e interface de la estructura de pavimento.

Aeropuerto A				
Combinación	Profundidad		Deformación	
	(in)		(mili in)	
	FAARFIELD	Modelo	FAARFIELD	Modelo
22 - Aeropuerto A	0	0	229.61	216.46
	-15.16	-17.46	229.61	216.46
	-21.16	-22.46	229.51	216.37
	-27.16	-28.46	228.88	215.79
28 - Aeropuerto A	0	0	224.86	211.19
	-14.78	-17.46	224.87	211.2
	-20.78	-22.46	224.78	211.12
	-26.78	-28.46	224.17	210.56
43 - Aeropuerto A	0	0	226.82	213.55
	-14.97	-17.46	226.82	213.56
	-20.97	-22.46	226.73	213.47
	-26.97	-28.46	225.97	212.78
51 - Aeropuerto A	0	0	4.76	4.66
	-13.76	-11.6	4.76	4.66
	-19.76	-16.6	4.77	4.67
	-25.76	-22.6	4.77	4.68
57 - Aeropuerto A	0	0	4.79	4.66
	-14.12	-11.6	4.79	4.67
	-20.12	-16.6	4.8	4.67
	-26.12	-22.6	4.8	4.68
59 - Aeropuerto A	0	0	9.62	9.49
	-13.7	-12.85	9.62	9.49
	-19.7	-17.85	9.63	9.5
	-25.7	-23.85	9.62	9.5
8 - Aeropuerto A	0	0	9.61	9.33
	-13.3	-12.85	9.61	9.56
	-18.3	-17.85	9.63	9.57
	-24.3	-23.85	9.63	9.58
9 - Aeropuerto A	0	0	4.76	4.73
	-13.61	-12.85	4.76	4.73
	-18.61	-17.85	4.77	4.74
	-24.61	-23.85	4.77	4.75
17 - Aeropuerto A	0	0	9.67	9.47
	-12.94	-11.6	9.67	9.47
	-18.94	-16.6	9.68	9.48
	-24.94	-22.6	9.68	9.48

Tabla ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-36. Deformaciones en la superficie e interface de la estructura de pavimento.

Aeropuerto B				
Combinación	Profundidad		Deformación	
	(in)		(mili in)	
	FAARFIELD	Modelo	FAARFIELD	Modelo
25 - Aeropuerto B	0	0	588.73	623.71



	-26.5	-23.81	588.76	623.73
	-32.5	-28.81	588.67	623.33
	-38.5	-34.81	587.81	622.75
52 - Aeropuerto B	0	0	585.19	689.89
	-26.31	-17.96	585.22	689.92
	-32.31	-22.96	585.14	689.87
	-38.31	-28.96	583.85	688.39
10 - Aeropuerto B	0	0	589.79	626.51
	-26.69	-23.81	589.81	626.53
	-32.69	-28.81	589.72	626.45
	-38.69	-34.81	588.85	625.54
38 - Aeropuerto B	0	0	25.77	26.22
	-17.51	-19.2	25.77	26.22
	-21.51	-24.2	25.78	26.23
	-27.51	-30.2	25.82	26.26
54 - Aeropuerto B	0	0	12.84	13.01
	-17.28	-19.2	12.85	13.02
	-22.28	-24.2	12.85	13.02
	-28.28	-30.2	12.88	13.05
18 - Aeropuerto B	0	0	12.86	12.93
	-16.84	-17.96	12.87	12.93
	-21.84	-22.96	12.88	12.94
	-27.94	-28.96	12.89	12.96

▪ Análisis económico

La Figura 4-10 y 4 -11 presentan los costos correspondientes a los diseños obtenidos con FAARFIELD y el modelo, para el aeropuerto A y B correspondientemente; como se puede observar los precios de construcción por metro cuadrado de pavimento no presentan una variación mayor a \$6.75 en la combinación 51 para el aeropuerto A; mientras que la mayor variación de precios para los diseños del aeropuerto B es de \$7.57 en la combinación 18.

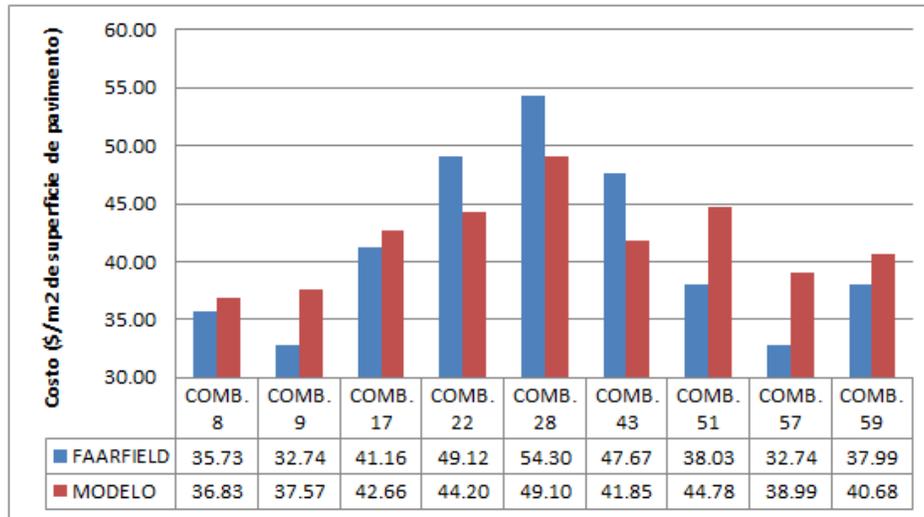


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-43. Análisis del costo de ciclo de vida para los diseños seleccionados del aeropuerto A.

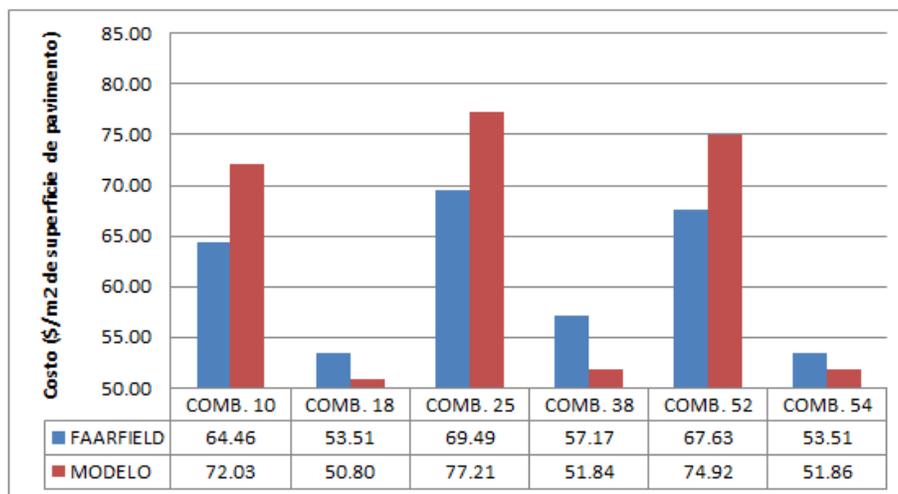


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-44. Análisis del costo de ciclo de vida para los diseños seleccionados del aeropuerto B.

▪ Análisis de impacto ambiental

La Figura 4-12 y 4 -13 presentan las emisiones correspondientes a los diseños obtenidos con FAARFIELD y el modelo, para el aeropuerto A y B correspondientemente; para el aeropuerto A se tiene una variación máxima en la combinación 43 de 24.17 kg CO2 eq / m2 de superficie de pavimento, mientras que para el aeropuerto B la variación máxima entre los diseños es de 17.81 kg CO2 eq / m2 de superficie de pavimento.

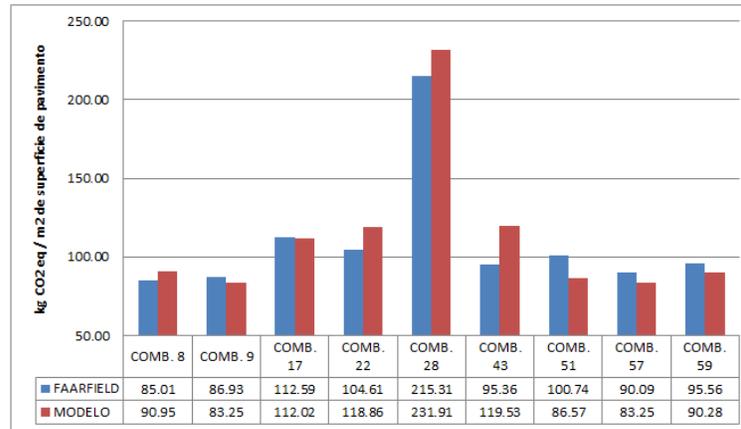


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-45 Análisis de impacto ambiental para los diseños seleccionados del aeropuerto A.

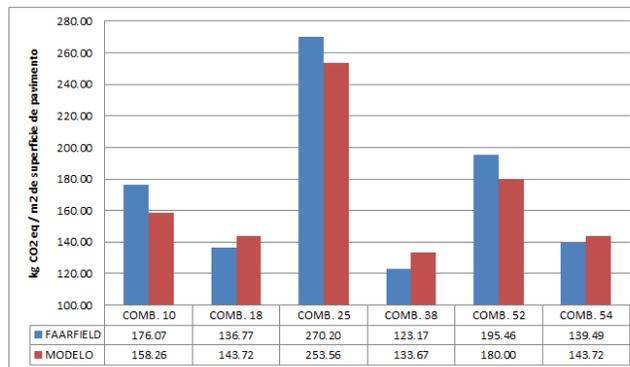


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-46 Análisis de impacto ambiental para los diseños seleccionados del aeropuerto B.



5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo en base al estudio realizado se realiza una síntesis y análisis de los resultados obtenidos de la investigación, además de la experiencia adquirida en el desarrollo de este proyecto de titulación se plantean ciertas recomendaciones, por último se sugieren o proponen futuras líneas de investigación con el fin de ampliar la información y conocimiento acerca de la investigación realizada. Los subcapítulos que conforman esta sección son:

- Conclusiones
- Recomendaciones
- Futuras líneas de investigación

○ Conclusiones

En este proyecto de titulación se planteó definir los parámetros que influyen en mayor medida en el diseño y desempeño de pavimentos de aeropuertos, para lo que se establecieron 120 posibilidades de diseño con la ayuda del software FAARFIELD, mediante la variación y combinación de los datos de entrada: número de salidas anuales, crecimiento del tráfico, geometría del tren de aterrizaje, presión de los neumáticos, carga de tráfico, tipo de base o subbase, calidad de la subrasante; para determinar el nivel de influencia de estas variables se aplicó la metodología del análisis de varianza, misma que permite definir en función de valores estadísticos que tan vulnerables son los parámetros de salida según la variación de los parámetros de entrada.

Para obtener los 120 diseños se definieron variaciones en los parámetros de entrada, para que los resultados de las combinaciones propuestas sean significantes se realizó una selección de las variables de materiales sugeridas por la FAA, escogiendo aquellos materiales que se encuentran y usan en el país o que están en proceso de investigación (Tabla 3-4). Por otra parte se logró construir la base de datos acerca del tráfico aéreo del país debido a la escasa información integral y la dificultad de acceder a la misma, por lo que se creó una matriz con vuelos para dos aeropuertos de distinta cobertura del país, el resumen del levantamiento de esta



información se presenta en la Tabla 3-2 y 3-3. Por lo expresado anteriormente se puede decir que los resultados que se han obtenido de este estudio son aplicables a la realidad actual de nuestro medio.

De la utilización del software FAARFIELD se puede indicar que éste programa utiliza aproximaciones en base a la teoría de elementos finitos para determinar el espesor de la capa de rodadura. En el desarrollo de esta parte de la investigación se determinó que para el caso del aeropuerto A cuando mejoraba la calidad de la subrasante el espesor de la capa de rodadura incrementaba en lugar de disminuir como se esperaría comúnmente, debido a esto se realizaron pruebas de regresión para verificar el defecto en el software para esas condiciones de parámetros de entrada, mas este no fue solucionado y la razón por la cual se puede explicar esta inconsistencia es que el programa propuesto por la Federal Aviation Administration brinda en ocasiones resultados conservativos. A pesar de esto se continuó utilizando el software debido a que la inconsistencia no era representativa en magnitud, como se puede apreciar por ejemplo en el Anexo 2 se esperaría que la tercera combinación posea un espesor menor que la segunda debido a que la calidad de la subrasante incremento al doble, mas esta diferencia de los espesores no llega ni a la pulgada en esta y el resto de combinaciones analizadas; mientras que para el caso del aeropuerto B los resultados de espesor de la capa de rodadura son consistentes en función del cambio de la calidad de la subrasante, es decir la profundidad de esta capa disminuye según la calidad de la subrasante mejore, se puede apreciar de igual manera en el Anexo 2 que esta disminución no alcanza la pulgada; por lo que se pudo concluir que a partir de que el módulo de reacción de la subrasante alcance el valor medio del rango establecido por la FAA ya no representa mayor influencia en el espesor de la capa de rodadura. A continuación se presenta en la Figuras 5-1, gráficas de módulo de reacción de subrasante vs. espesor de la capa de rodadura para corroborar lo expresado anteriormente, donde se aprecia que a partir de que el módulo de la subrasante alcanza el valor medio los espesores ya no alcanzan variaciones significativas en magnitud.

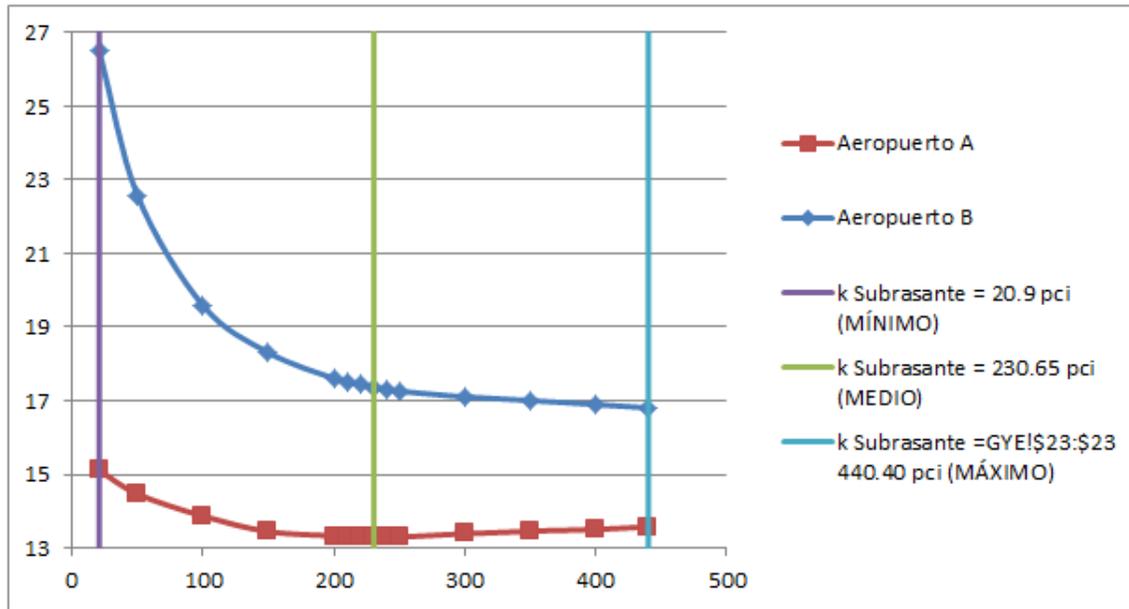


Figura 47. Módulo de reacción de la subrasante vs. espesor capa de rodadura.

Del análisis de varianza, ANOVA de una vía se logró establecer que las variables que influyen mayoritariamente en la determinación del espesor de la capa de rodadura para pavimentos de aeropuertos son el módulo de reacción de la subrasante y la caracterización del tráfico. Para el caso del módulo de reacción de la subrasante la influencia de este parámetro permite determinar que incrementando el valor del mismo del mínimo (20.9 pci) al medio (230.65 pci) se logra una disminución de 2.32 in para el aeropuerto A, mientras que para el aeropuerto B se logra una disminución de hasta 9.85 in, esto permitirá al diseñador optar por rangos del módulo de reacción de la subrasante en donde conoce que las variaciones del espesor serán significativas para controlar ya sea el desempeño estructural y económico. Por otra parte para el caso de la caracterización de tráfico se tiene que para el aeropuerto A con un número de salidas anuales igual a 3339 el espesor máximo obtenido fue de 15.16 in y el espesor mínimo de 12.84, mientras que para el aeropuerto B con un número de salidas anuales igual 16377 el espesor máximo obtenido fue de 26.60 in y el espesor mínimo de 16.84 in, lo que demuestra el volumen de tráfico esperado afecta directa y mayoritariamente a la capa de rodadura con relación a las otras capas. Las variables de menor influencia son: módulo de la base o subbase estabilizada y módulo de la base o subbase granular, esto guarda relación con la teoría general de diseño de pavimentos, ya que las capas inferiores permiten transmitir las cargas de tráfico que soporta directamente la capa de rodadura hacia la subrasante o terreno de fundación.



El modelo obtenido para la determinación del espesor de la capa de rodadura se definió en función de las variables de mayor influencia (módulo de reacción de la subrasante – caracterización del tráfico), obteniendo una ecuación con una precisión mayor al 80%; los espesores obtenidos de ésta ecuación se aproximan a los definidos por FAARFIELD, debido a las variaciones presentadas se realizó la evaluación del desempeño estructural y económico de los diseños propuestos. Este modelo permitirá al diseñador definir varias alternativas de estructura conociendo únicamente el volumen de tráfico esperado y la calidad del terreno de fundación, estas podrán servir como diseños tentativos para ser evaluados según las necesidades del proyecto y en caso de requerir mayor precisión realizar el diseño propuesto por FAARFIELD únicamente para las alternativas seleccionadas como factibles o viables. Por otra parte el modelo permitirá variar parámetros y obtener resultados de manera simple, para análisis de necesidades a futuro de la pista de aterrizajes, por ejemplo, un aeropuerto a construir que no tenga un estudio del tráfico esperado, podrá basarse en volúmenes de aeropuertos semejantes y obtener alternativas de diseño de manera inmediata.

La evaluación del desempeño del pavimento en los ámbitos estructurales, económicos y ambientales, permiten definir la validez del modelo obtenido. Para el caso del análisis estructural se definió que no existe variación representativa entre las estructuras obtenidas con FAARFIELD y las calculadas con el modelo, por lo que utilizar este último como metodología de diseño no provocaría alteraciones en la resistencia de las capas del pavimento, garantizando la seguridad de la estructura. Por otra parte el análisis de costos presenta de igual manera variaciones entre los diseños de FAARFIELD y el modelo que no exceden los \$7.57 por metro cuadrado de superficie de pavimento, mientras que del análisis de impacto ambiental presenta que la variación de las emisiones de gases de efecto invernadero de los materiales en la etapa de construcción no excede los 24.17 kg CO₂ eq / m² de superficie de pavimento por lo que en el ámbito económico y ambiental en ocasiones el modelo puede no resultar sustentable como con los diseños de FAARFIELD.

Debido a la inversión que representa un proyecto de construcción de infraestructura para aeropuertos, proponer una herramienta que permita manipular rangos y tipos de variables en el diseño de pavimentos rígidos puede economizar costos a lo largo de su vida útil, tomando en cuenta el desempeño estructural, por lo que se podrían obtener posibilidades de diseño integrales donde aspectos económicos de seguridad y funcionalidad sean explotados al máximo para obtener estructuras óptimas y sostenibles.



○ **Recomendaciones**

En caso de que el software FAARFIELD presente inconsistencias en los resultados, realizar pruebas de regresión, analizar para que parámetros se están presentando problemas y definir la magnitud de la inconsistencia, en caso de que ésta sea representativa validar los resultados con otros programas que igualmente son validados por la FAA como AirPave 11, COMFAA, COMPSYS, todos estos son de acceso libre y su funcionamiento es amigable con el usuario.

Al realizar el análisis de varianza determinar la naturaleza de las variables al convertirlas de cuantitativas a cualitativas, para evitar errores en los procesos estadísticos, es decir para el caso del módulo de la base o subbase granular existían 5 posibilidades de materiales con sus respectivos valores de módulo, los mismos que se adjudicaban según la característica del material, esta variable es de tipo nominal, mientras que para el caso del módulo de reacción de la subrasante se tenía establecido valores que iban de 20.9 pci a 440.4 pci, por lo que al convertir esta variable al tipo cualitativo se la definió como ordinal porque adquiere valores según un rango establecido por la FAA.

En el caso de establecer un modelo como el presentado en este estudio, presentar el rango de valores para los cuales se obtuvo, como por ejemplo en la expresión para definir el espesor de la capa de rodadura (Ecuación 4-2) se utilizaron rangos de salidas anuales entre 3339 y 16377, para estos límites se puede asegurar el nivel de aproximación del modelo, mas no se podrá garantizar en caso de que los valores usados sean menores o mayores, por lo que se sugiere utilizar otros volúmenes de tráfico y validar o proponer una ecuación que se ajuste de mejor manera a esas solicitudes.

○ **Futuras líneas de estudio**

En la actualidad la ingeniería está obligada a proponer soluciones rápidas y eficientes a problemáticas de distinta índole, una de las herramientas que solventa esta necesidad es la investigación, culminado este trabajo de titulación se plantea varias posibilidades de investigación en el campo de la ingeniería de pavimentos de aeropuertos, se sugiere realizar el mismo estudio para el caso de pavimentos flexibles, así se podrá definir que parámetros influyen mayoritariamente en el diseño los mismos, de esta manera no solo se compararán alternativas de pavimento rígido sino también podremos analizar las ventajas y desventajas entre tipos de pavimentos. También al realizar este estudio para pavimentos flexibles se podrá optimizar y simplificar el



proceso de diseño, mediante la obtención de un modelo como el obtenido para pavimentos rígidos. Por otra parte al variar volúmenes de tráfico se podrán generar cartas de diseño donde según los parámetros de entrada se puedan ir seleccionando espesores sin necesidad de utilizar software o procesos matemáticos.



ANEXOS

Anexo 1: combinaciones posibles de diseño para cada aeropuerto

Combinación	Capas			
	Capa de rodadura	Base/subbase estabilizada	Base/subbase granular	Subrasante
	ID	ID	ID	k VALUE (pci)
1	P-501			20.90
2	P-501	P-401/P-403		230.65
3	P-501			440.40
4	P-501			20.90
5	P-501	P-306		230.65
6	P-501		P-209	440.40
7	P-501			20.90
8	P-501	P-304		230.65
9	P-501			440.40
10	P-501			20.90
11	P-501	P-301		230.65
12	P-501			440.40
13	P-501			20.90
14	P-501	P-401/P-403		230.65
15	P-501			440.40
16	P-501			20.90
17	P-501	P-306		230.65
18	P-501		P-208	440.40
19	P-501			20.90
20	P-501	P-304		230.65
21	P-501			440.40
22	P-501			20.90
23	P-501	P-301		230.65
24	P-501			440.40
25	P-501			20.90
26	P-501	P-401/P-403		230.65
27	P-501			440.40
28	P-501			20.90
29	P-501	P-306		230.65
30	P-501		P-219	440.40



31	P-501			20.90
32	P-501	P-304		230.65
33	P-501			440.40
34	P-501			20.90
35	P-501	P-301		230.65
36	P-501			440.40
37	P-501			20.90
38	P-501	P-401/P-403		230.65
39	P-501			440.40
40	P-501			20.90
41	P-501	P-306		230.65
42	P-501		P-211	440.40
43	P-501			20.90
44	P-501	P-304		230.65
45	P-501			440.40
46	P-501			20.90
47	P-501	P-301		230.65
48	P-501			440.40
49	P-501			20.90
50	P-501	P-401/P-403		230.65
51	P-501			440.40
52	P-501			20.90
53	P-501	P-306		230.65
54	P-501		P-154	440.40
55	P-501			20.90
56	P-501	P-304		230.65
57	P-501			440.40
58	P-501			20.90
59	P-501	P-301		230.65
60	P-501			440.40



Anexo 2: diseños obtenidos con FAARFIELD

Aeropuerto A

Comb.	Capas									
	Capa de rodadura			Base/subbase estabilizada			Base/subbase granular			Subrasante
	ID	Espe_sor (in)	Módu_lo (psi)	ID	Espe_sor cm (in)	Módu_lo (psi)	ID	Espesor cm (in)	Módu_Lo (psi)	k VALUE (pci)
1	P-501	15.11	4,000,000	P-401/P-403	5.00	400,000	P-209	6.00	4,517	20.90
2	P-501	13.29	4,000,000		5.00	400,000		6.00	53,067	230.65
3	P-501	13.58	4,000,000		5.00	400,000		6.00	93,657	440.4
4	P-501	14.99	4,000,000	P-306	5.00	700,000	P-209	6.00	4,517	20.90
5	P-501	13.14	4,000,000		5.00	700,000		6.00	53,067	230.65
6	P-501	13.46	4,000,000		5.00	700,000		6.00	93,657	440.4
7	P-501	15.08	4,000,000	P-304	5.00	500,000	P-209	6.00	4,517	20.90
8	P-501	13.30	4,000,000		5.00	500,000		6.00	53,067	230.65
9	P-501	13.61	4,000,000		5.00	500,000		6.00	93,657	440.4
10	P-501	15.16	4,000,000	P-301	5.00	250,000	P-209	6.00	4,517	20.90
11	P-501	13.42	4,000,000		6.00	250,000		6.00	53,067	230.65
12	P-501	13.84	4,000,000		6.00	250,000		6.00	93,657	440.4
13	P-501	15.12	4,000,000	P-401/P-403	6.00	400,000	P-208	6.00	4,517	20.90
14	P-501	13.13	4,000,000		6.00	400,000		6.00	53,067	230.65
15	P-501	13.46	4,000,000		6.00	400,000		6.00	93,657	440.4
16	P-501	14.78	4,000,000	P-306	6.00	700,000	P-208	6.00	4,517	20.90
17	P-501	12.94	4,000,000		6.00	700,000		6.00	53,067	230.65
18	P-501	13.24	4,000,000		6.00	700,000		6.00	93,657	440.4
19	P-501	14.97	4,000,000	P-304	6.00	500,000	P-208	6.00	4,517	20.90
20	P-501	13.13	4,000,000		6.00	500,000		6.00	53,067	230.65
21	P-501	13.47	4,000,000		6.00	500,000		6.00	93,657	440.4
22	P-501	15.16	4,000,000	P-301	6.00	250,000	P-208	6.00	4,517	20.90
23	P-501	13.42	4,000,000		6.00	250,000		6.00	53,067	230.65
24	P-501	13.84	4,000,000		6.00	250,000		6.00	93,657	440.4
25	P-501	15.08	4,000,000	P-401/P-403	6.00	400,000	P-208	6.00	4,517	20.90
26	P-501	13.13	4,000,000		6.00	400,000		6.00	53,067	230.65
27	P-501	13.46	4,000,000		6.00	400,000		6.00	93,657	440.4
28	P-501	14.78	4,000,000	P-306	6.00	700,000	P-208	6.00	4,517	20.90
29	P-501	12.95	4,000,000		6.00	700,000		6.00	53,067	230.65
30	P-501	13.24	4,000,000		6.00	700,000		6.00	93,657	440.4
31	P-501	14.97	4,000,000	P-304	6.00	500,000	P-219	6.00	4,517	20.90
32	P-501	13.13	4,000,000		6.00	500,000		6.00	53,067	230.65



33	P-501	13.47	4,000,000		6.00	500,000		6.00	93,657	440.4
34	P-501	15.16	4,000,000		6.00	250,000		6.00	4,517	20.90
35	P-501	13.42	4,000,000	P-301	6.00	250,000		6.00	53,067	230.65
36	P-501	13.84	4,000,000		6.00	250,000		6.00	93,657	440.4
37	P-501	15.08	4,000,000		6.00	400,000		6.00	3,614	20.90
38	P-501	13.13	4,000,000	P-401/P-403	6.00	400,000		6.00	42,453	230.65
39	P-501	13.46	4,000,000		6.00	400,000		6.00	74,925	440.4
40	P-501	14.78	4,000,000		6.00	700,000		6.00	3,614	20.90
41	P-501	12.95	4,000,000	P-306	6.00	700,000		6.00	42,453	230.65
42	P-501	13.24	4,000,000		6.00	700,000	P-211	6.00	74,925	440.4
43	P-501	14.97	4,000,000		6.00	500,000		6.00	3,614	20.90
44	P-501	13.13	4,000,000	P-304	6.00	500,000		6.00	42,453	230.65
45	P-501	13.47	4,000,000		6.00	500,000		6.00	74,925	440.4
46	P-501	15.16	4,000,000		6.00	250,000		6.00	3,614	20.90
47	P-501	13.42	4,000,000	P-301	6.00	250,000		6.00	42,453	230.65
48	P-501	13.84	4,000,000		6.00	250,000		6.00	74,925	440.4
49	P-501	15.06	4,000,000		6.00	400,000		6.00	2,712	20.90
50	P-501	13.47	4,000,000	P-401/P-403	6.00	400,000		6.00	23,700	230.65
51	P-501	13.76	4,000,000		6.00	400,000		6.00	32,476	440.4
52	P-501	14.79	4,000,000		6.00	700,000		6.00	2,712	20.90
53	P-501	13.29	4,000,000	P-306	6.00	700,000		6.00	23,700	230.65
54	P-501	13.94	4,000,000		6.00	700,000		6.00	32,476	440.4
55	P-501	15.00	4,000,000		6.00	500,000		6.00	2,712	20.90
56	P-501	13.46	4,000,000	P-304	6.00	500,000	P-154	6.00	23,700	230.65
57	P-501	14.12	4,000,000		6.00	500,000		6.00	32,476	440.4
58	P-501	15.16	4,000,000		6.00	250,000		6.00	2,712	20.90
59	P-501	13.70	4,000,000	P-301	6.00	250,000		6.00	23,700	230.65
60	P-501	14.44	4,000,000		6.00	250,000		6.00	32,476	440.4

Aeropuerto B

CAPAS

Comb.	Capa de rodadura			Base/subbase estabilizada			Base/subbase granular			Subrasante
	ID	Espe_sor	Módu_lo	ID	Espe_sor	Módu_lo	ID	Espe_sor	Módu_lo	k VALUE
		cm (in)	(psi)		cm (in)	(psi)		cm (in)	(psi)	(pci)
1	P-501	26.50	4,000,000		6.00	400,000		6.00	4,517	20.90
2	P-501	17.36	4,000,000	P-401/P-403	6.00	400,000		6.00	53,067	230.65
3	P-501	16.89	4,000,000		5.00	400,000		6.00	93,657	440.40
4	P-501	26.31	4,000,000		5.00	700,000		6.00	4,517	20.90



5	P-501	17.39	4,000,000		5.00	700,000		6.00	53,067	230.65
6	P-501	16.84	4,000,000	P-306	5.00	700,000		6.00	93,657	440.40
7	P-501	25.56	4,000,000		5.00	500,000	P-209	6.00	4,517	20.90
8	P-501	17.44	4,000,000	P-304	5.00	500,000		6.00	53,067	230.65
9	P-501	16.91	4,000,000		5.00	500,000		6.00	93,657	440.40
10	P-501	26.69	4,000,000		6.00	250,000		6.00	4,517	20.90
11	P-501	17.49	4,000,000	P-301	6.00	250,000		6.00	53,067	230.65
12	P-501	17.00	4,000,000		6.00	250,000		6.00	93,657	440.40
13	P-501	26.50	4,000,000		4.00	400,000		6.00	4,517	20.90
14	P-501	17.51	4,000,000	P-401/P-403	4.00	400,000		6.00	53,067	230.65
15	P-501	16.97	4,000,000		4.00	400,000		6.00	93,657	440.40
16	P-501	26.31	4,000,000		5.00	700,000		6.00	4,517	20.90
17	P-501	17.39	4,000,000	P-306	5.00	700,000	P-208	6.00	53,067	230.65
18	P-501	16.84	4,000,000		5.00	700,000		6.00	93,657	440.40
19	P-501	26.56	4,000,000		5.00	500,000		6.00	4,517	20.90
20	P-501	17.44	4,000,000	P-304	5.00	500,000		6.00	53,067	230.65
21	P-501	16.91	4,000,000		5.00	500,000		6.00	93,657	440.40
22	P-501	26.69	4,000,000		5.00	250,000		6.00	4,517	20.90
23	P-501	17.49	4,000,000	P-301	5.00	250,000		6.00	53,067	230.65
24	P-501	17.00	4,000,000		5.00	250,000		6.00	93,657	440.40
25	P-501	26.50	4,000,000		6.00	400,000		6.00	4,517	20.90
26	P-501	17.51	4,000,000	P-401/P-403	4.00	400,000		6.00	53,067	230.65
27	P-501	16.97	4,000,000		4.00	400,000		6.00	93,657	440.40
28	P-501	26.52	4,000,000		5.00	700,000		6.00	4,517	20.90
29	P-501	17.68	4,000,000	P-306	5.00	700,000		6.00	53,067	230.65
30	P-501	16.84	4,000,000		5.00	700,000	P-219	6.00	93,657	440.40
31	P-501	26.56	4,000,000		5.00	500,000		6.00	4,517	20.90
32	P-501	17.44	4,000,000	P-304	5.00	500,000		6.00	53,067	230.65
33	P-501	16.91	4,000,000		5.00	500,000		6.00	93,657	440.40
34	P-501	26.69	4,000,000		6.00	250,000		6.00	4,517	20.90
35	P-501	17.49	4,000,000	P-301	6.00	250,000		6.00	53,067	230.65
36	P-501	17.00	4,000,000		6.00	250,000		6.00	93,657	440.40
37	P-501	26.50	4,000,000		4.00	400,000		6.00	3,614	20.90
38	P-501	17.51	4,000,000	P-401/P-403	4.00	400,000		6.00	42,453	230.65
39	P-501	16.97	4,000,000		4.00	400,000		6.00	74,925	440.40
40	P-501	26.31	4,000,000		5.00	700,000		6.00	3,614	20.90
41	P-501	17.00	4,000,000	P-306	5.00	700,000		6.00	42,453	230.65
42	P-501	16.84	4,000,000		5.00	700,000		6.00	74,925	440.40
43	P-501	26.56	4,000,000		5.00	500,000	P-211	6.00	3,614	20.90



44	P-501	17.44	4,000,000		5.00	500,000	6.00	42,453	230.65	
45	P-501	16.91	4,000,000	P-304	5.00	500,000	6.00	74,925	440.40	
46	P-501	26.69	4,000,000		6.00	250,000	6.00	3,614	20.90	
47	P-501	17.49	4,000,000	P-301	6.00	250,000	6.00	42,453	230.65	
48	P-501	17.00	4,000,000		6.00	250,000	6.00	74,925	440.40	
49	P-501	26.51	4,000,000		6.00	400,000	6.00	2,712	20.90	
50	P-501	17.68	4,000,000	P-401/P-403	4.00	400,000	6.00	23,700	230.65	
51	P-501	17.38	4,000,000		4.00	400,000	6.00	32,476	440.40	
52	P-501	26.31	4,000,000		6.00	700,000	6.00	2,712	20.90	
53	P-501	17.57	4,000,000	P-306	6.00	700,000	6.00	23,700	230.65	
54	P-501	17.28	4,000,000		5.00	700,000	P-154	6.00	32,476	440.40
55	P-501	26.56	4,000,000		6.00	500,000	6.00	2,712	20.90	
56	P-501	17.44	4,000,000	P-304	6.00	500,000	6.00	23,700	230.65	
57	P-501	16.91	4,000,000		6.00	500,000	6.00	32,476	440.40	
58	P-501	26.69	4,000,000		6.00	250,000	6.00	2,712	20.90	
59	P-501	17.49	4,000,000	P-301	6.00	250,000	6.00	23,700	230.65	
60	P-501	17.00	4,000,000		6.00	250,000	6.00	32,476	440.40	



Anexo 3: Parámetros de entrada y salida para el análisis de varianza

Parámetros para el análisis de varianza					
Salida		Entrada			
Espesor PCC (in)	Espesor base estabilizada (in)	Módulo base/subbase estabilizada (psi)	Módulo base/subbase Se granular (psi)	K subrasante (pci)	Caracterización tráfico
15.11	5.00	P-401	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.29	5.00	P-401	P-209	MEDIO	AEROPUERTO A
13.58	5.00	P-401	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.99	5.00	P-306	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.14	5.00	P-306	P-209	MEDIO	AEROPUERTO A
13.46	5.00	P-306	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.08	5.00	P-304	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.30	5.00	P-304	P-209	MEDIO	AEROPUERTO A
13.61	5.00	P-304	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.16	5.00	P-301	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.42	6.00	P-301	P-209	MEDIO	AEROPUERTO A
13.84	6.00	P-301	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.12	6.00	P-401	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.13	6.00	P-401	P-208	MEDIO	AEROPUERTO A
13.46	6.00	P-401	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.78	6.00	P-306	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO A
12.94	6.00	P-306	P-208	MEDIO	AEROPUERTO A
13.24	6.00	P-306	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.97	6.00	P-304	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.13	6.00	P-304	P-208	MEDIO	AEROPUERTO A
13.47	6.00	P-304	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.16	6.00	P-301	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.42	6.00	P-301	P-208	MEDIO	AEROPUERTO A
13.84	6.00	P-301	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.08	6.00	P-401	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.13	6.00	P-401	P-219	MEDIO	AEROPUERTO A
13.46	6.00	P-401	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.78	6.00	P-306	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO A
12.95	6.00	P-306	P-219	MEDIO	AEROPUERTO A
13.24	6.00	P-306	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.97	6.00	P-304	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.13	6.00	P-304	P-219	MEDIO	AEROPUERTO A



13.47	6.00	P-304	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.16	6.00	P-301	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.42	6.00	P-301	P-219	MEDIO	AEROPUERTO A
13.84	6.00	P-301	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.08	6.00	P-401	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.13	6.00	P-401	P-211	MEDIO	AEROPUERTO A
13.46	6.00	P-401	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.78	6.00	P-306	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO A
12.95	6.00	P-306	P-211	MEDIO	AEROPUERTO A
13.24	6.00	P-306	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.97	6.00	P-304	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.13	6.00	P-304	P-211	MEDIO	AEROPUERTO A
13.47	6.00	P-304	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.16	6.00	P-301	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.42	6.00	P-301	P-211	MEDIO	AEROPUERTO A
13.84	6.00	P-301	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.06	6.00	P-401	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.47	6.00	P-401	P-154	MEDIO	AEROPUERTO A
13.89	6.00	P-401	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO A
14.79	6.00	P-306	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.29	6.00	P-306	P-154	MEDIO	AEROPUERTO A
13.94	6.00	P-306	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.00	6.00	P-304	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.46	6.00	P-304	P-154	MEDIO	AEROPUERTO A
14.12	6.00	P-304	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO A
15.16	6.00	P-301	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO A
13.70	6.00	P-301	P-154	MEDIO	AEROPUERTO A
14.44	6.00	P-301	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO A
26.50	6.00	P-401	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.51	6.00	P-401	P-209	MEDIO	AEROPUERTO B
16.97	5.00	P-401	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.31	5.00	P-306	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.39	5.00	P-306	P-209	MEDIO	AEROPUERTO B
16.84	5.00	P-306	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.56	5.00	P-304	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.44	5.00	P-304	P-209	MEDIO	AEROPUERTO B
16.91	5.00	P-304	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.69	6.00	P-301	P-209	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.49	6.00	P-301	P-209	MEDIO	AEROPUERTO B



17.00	6.00	P-301	P-209	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.50	4.00	P-401	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.51	4.00	P-401	P-208	MEDIO	AEROPUERTO B
16.97	4.00	P-401	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.31	5.00	P-306	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.39	5.00	P-306	P-208	MEDIO	AEROPUERTO B
16.84	5.00	P-306	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.56	5.00	P-304	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.44	5.00	P-304	P-208	MEDIO	AEROPUERTO B
16.91	5.00	P-304	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.69	5.00	P-301	P-208	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.49	5.00	P-301	P-208	MEDIO	AEROPUERTO B
17.00	5.00	P-301	P-208	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.50	6.00	P-401	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.51	4.00	P-401	P-219	MEDIO	AEROPUERTO B
16.97	4.00	P-401	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.52	5.00	P-306	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.68	5.00	P-306	P-219	MEDIO	AEROPUERTO B
16.84	5.00	P-306	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.56	5.00	P-304	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.44	5.00	P-304	P-219	MEDIO	AEROPUERTO B
16.91	5.00	P-304	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.69	6.00	P-301	P-219	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.49	6.00	P-301	P-219	MEDIO	AEROPUERTO B
17.00	6.00	P-301	P-219	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.50	4.00	P-401	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.51	4.00	P-401	P-211	MEDIO	AEROPUERTO B
16.97	4.00	P-401	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.31	5.00	P-306	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.00	5.00	P-306	P-211	MEDIO	AEROPUERTO B
16.84	5.00	P-306	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.56	5.00	P-304	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.44	5.00	P-304	P-211	MEDIO	AEROPUERTO B
16.91	5.00	P-304	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.69	6.00	P-301	P-211	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.49	6.00	P-301	P-211	MEDIO	AEROPUERTO B
17.00	6.00	P-301	P-211	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.51	6.00	P-401	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.68	4.00	P-401	P-154	MEDIO	AEROPUERTO B



17.38	4.00	P-401	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.31	6.00	P-306	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.57	6.00	P-306	P-154	MEDIO	AEROPUERTO B
17.28	5.00	P-306	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.56	6.00	P-304	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.44	6.00	P-304	P-154	MEDIO	AEROPUERTO B
16.91	6.00	P-304	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO B
26.69	6.00	P-301	P-154	MÍNIMO	AEROPUERTO B
17.49	6.00	P-301	P-154	MEDIO	AEROPUERTO B
17.00	6.00	P-301	P-154	MÁXIMO	AEROPUERTO B



Anexo 4: Parámetros de entrada utilizados en la primera aproximación del modelo (espesor PCC)

Modelo 1			
Combinación	Espesor PCC (in)	K subrasante (pci)	Caracterización tráfico
1	15.11	20.90	3339
2	13.29	230.65	3339
3	13.58	440.40	3339
4	14.99	20.90	3339
5	13.14	230.65	3339
6	13.46	440.40	3339
7	15.08	20.90	3339
8	13.30	230.65	3339
9	13.61	440.40	3339
10	15.16	20.90	3339
11	13.42	230.65	3339
12	13.84	440.40	3339
13	15.12	20.90	3339
14	13.13	230.65	3339
15	13.46	440.40	3339
16	14.78	20.90	3339
17	12.94	230.65	3339
18	13.24	440.40	3339
19	14.97	20.90	3339
20	13.13	230.65	3339
21	13.47	440.40	3339
22	15.16	20.90	3339
23	13.42	230.65	3339
24	13.84	440.40	3339
25	15.08	20.90	3339
26	13.13	230.65	3339
27	13.46	440.40	3339
28	14.78	20.90	3339
29	12.95	230.65	3339
30	13.24	440.40	3339
31	14.97	20.90	3339
32	13.13	230.65	3339
33	13.47	440.40	3339



34	15.16	20.90	3339
35	13.42	230.65	3339
36	13.84	440.40	3339
37	15.08	20.90	3339
38	13.13	230.65	3339
39	13.46	440.40	3339
40	14.78	20.90	3339
41	12.95	230.65	3339
42	13.24	440.40	3339
43	14.97	20.90	3339
44	13.13	230.65	3339
45	13.47	440.40	3339
46	15.16	20.90	3339
47	13.42	230.65	3339
48	13.84	440.40	3339
49	15.06	20.90	3339
50	13.47	230.65	3339
51	13.89	440.40	3339
52	14.79	20.90	3339
53	13.29	230.65	3339
54	13.94	440.40	3339
55	15.00	20.90	3339
56	13.46	230.65	3339
57	14.12	440.40	3339
58	15.16	20.90	3339
59	13.70	230.65	3339
60	14.44	440.40	3339
61	26.78	20.90	16377
62	17.51	230.65	16377
63	16.97	440.40	16377
64	26.31	20.90	16377
65	17.39	230.65	16377
66	16.84	440.40	16377
67	26.56	20.90	16377
68	17.44	230.65	16377
69	16.91	440.40	16377
70	26.69	20.90	16377



71	17.49	230.65	16377
72	17.00	440.40	16377
73	26.50	20.90	16377
74	17.51	230.65	16377
75	16.97	440.40	16377
76	26.31	20.90	16377
77	17.39	230.65	16377
78	16.84	440.40	16377
79	26.56	20.90	16377
80	17.44	230.65	16377
81	16.91	440.40	16377
82	26.69	20.90	16377
83	17.49	230.65	16377
84	17.00	440.40	16377
85	26.50	20.90	16377
86	17.51	230.65	16377
87	16.97	440.40	16377
88	26.52	20.90	16377
89	17.68	230.65	16377
90	16.84	440.40	16377
91	26.56	20.90	16377
92	17.44	230.65	16377
93	16.91	440.40	16377
94	26.69	20.90	16377
95	17.49	230.65	16377
96	17.00	440.40	16377
97	26.50	20.90	16377
98	17.51	230.65	16377
99	16.97	440.40	16377
100	26.31	20.90	16377
101	17.00	230.65	16377
102	16.84	440.40	16377
103	26.56	20.90	16377
104	17.44	230.65	16377
105	16.91	440.40	16377
106	26.69	20.90	16377
107	17.49	230.65	16377



108	17.00	440.40	16377
109	26.51	20.90	16377
110	17.68	230.65	16377
111	17.38	440.40	16377
112	26.31	20.90	16377
113	17.57	230.65	16377
114	17.28	440.40	16377
115	26.56	20.90	16377
116	17.44	230.65	16377
117	16.91	440.40	16377
118	26.69	20.90	16377
119	17.49	230.65	16377
120	17.00	440.40	16377



Anexo 5: Parámetros de entrada utilizados y espesores obtenidos del modelo final.

Modelo 1				
Combinación	Espesor PCC (in)	log (1/2)k subrasante (pci)	Caracterización tráfico	Espesor' PCC*
1	15.11	-4.39	3339	17.46
2	13.29	-7.85	3339	12.85
3	13.58	-8.78	3339	11.60
4	14.99	-4.39	3339	17.46
5	13.14	-7.85	3339	12.85
6	13.46	-8.78	3339	11.60
7	15.08	-4.39	3339	17.46
8	13.30	-7.85	3339	12.85
9	13.61	-8.78	3339	11.60
10	15.16	-4.39	3339	17.46
11	13.42	-7.85	3339	12.85
12	13.84	-8.78	3339	11.60
13	15.12	-4.39	3339	17.46
14	13.13	-7.85	3339	12.85
15	13.46	-8.78	3339	11.60
16	14.78	-4.39	3339	17.46
17	12.94	-7.85	3339	12.85
18	13.24	-8.78	3339	11.60
19	14.97	-4.39	3339	17.46
20	13.13	-7.85	3339	12.85
21	13.47	-8.78	3339	11.60
22	15.16	-4.39	3339	17.46
23	13.42	-7.85	3339	12.85
24	13.84	-8.78	3339	11.60
25	15.08	-4.39	3339	17.46
26	13.13	-7.85	3339	12.85
27	13.46	-8.78	3339	11.60
28	14.78	-4.39	3339	17.46
29	12.95	-7.85	3339	12.85
30	13.24	-8.78	3339	11.60
31	14.97	-4.39	3339	17.46
32	13.13	-7.85	3339	12.85



33	13.47	-8.78	3339	11.60
34	15.16	-4.39	3339	17.46
35	13.42	-7.85	3339	12.85
36	13.84	-8.78	3339	11.60
37	15.08	-4.39	3339	17.46
38	13.13	-7.85	3339	12.85
39	13.46	-8.78	3339	11.60
40	14.78	-4.39	3339	17.46
41	12.95	-7.85	3339	12.85
42	13.24	-8.78	3339	11.60
43	14.97	-4.39	3339	17.46
44	13.13	-7.85	3339	12.85
45	13.47	-8.78	3339	11.60
46	15.16	-4.39	3339	17.46
47	13.42	-7.85	3339	12.85
48	13.84	-8.78	3339	11.60
49	15.06	-4.39	3339	17.46
50	13.47	-7.85	3339	12.85
51	13.89	-8.78	3339	11.60
52	14.79	-4.39	3339	17.46
53	13.29	-7.85	3339	12.85
54	13.94	-8.78	3339	11.60
55	15.00	-4.39	3339	17.46
56	13.46	-7.85	3339	12.85
57	14.12	-8.78	3339	11.60
58	15.16	-4.39	3339	17.46
59	13.70	-7.85	3339	12.85
60	14.44	-8.78	3339	11.60
61	26.78	-4.39	16377	23.82
62	17.51	-7.85	16377	19.20
63	16.97	-8.78	16377	17.96
64	26.31	-4.39	16377	23.82
65	17.39	-7.85	16377	19.20
66	16.84	-8.78	16377	17.96
67	26.56	-4.39	16377	23.82
68	17.44	-7.85	16377	19.20
69	16.91	-8.78	16377	17.96



70	26.69	-4.39	16377	23.82
71	17.49	-7.85	16377	19.20
72	17.00	-8.78	16377	17.96
73	26.50	-4.39	16377	23.82
74	17.51	-7.85	16377	19.20
75	16.97	-8.78	16377	17.96
76	26.31	-4.39	16377	23.82
77	17.39	-7.85	16377	19.20
78	16.84	-8.78	16377	17.96
79	26.56	-4.39	16377	23.82
80	17.44	-7.85	16377	19.20
81	16.91	-8.78	16377	17.96
82	26.69	-4.39	16377	23.82
83	17.49	-7.85	16377	19.20
84	17.00	-8.78	16377	17.96
85	26.50	-4.39	16377	23.82
86	17.51	-7.85	16377	19.20
87	16.97	-8.78	16377	17.96
88	26.52	-4.39	16377	23.82
89	17.68	-7.85	16377	19.20
90	16.84	-8.78	16377	17.96
91	26.56	-4.39	16377	23.82
92	17.44	-7.85	16377	19.20
93	16.91	-8.78	16377	17.96
94	26.69	-4.39	16377	23.82
95	17.49	-7.85	16377	19.20
96	17.00	-8.78	16377	17.96
97	26.50	-4.39	16377	23.82
98	17.51	-7.85	16377	19.20
99	16.97	-8.78	16377	17.96
100	26.31	-4.39	16377	23.82
101	17.00	-7.85	16377	19.20
102	16.84	-8.78	16377	17.96
103	26.56	-4.39	16377	23.82
104	17.44	-7.85	16377	19.20
105	16.91	-8.78	16377	17.96
106	26.69	-4.39	16377	23.82



107	17.49	-7.85	16377	19.20
108	17.00	-8.78	16377	17.96
109	26.51	-4.39	16377	23.82
110	17.68	-7.85	16377	19.20
111	17.38	-8.78	16377	17.96
112	26.31	-4.39	16377	23.82
113	17.57	-7.85	16377	19.20
114	17.28	-8.78	16377	17.96
115	26.56	-4.39	16377	23.82
116	17.44	-7.85	16377	19.20
117	16.91	-8.78	16377	17.96
118	26.69	-4.39	16377	23.82
119	17.49	-7.85	16377	19.20
120	17.00	-8.78	16377	17.96

NOTA*: la columna ESPESOR' hace referencia a los espesores obtenidos con el modelo determinado con la regresión lineal.



Anexo 6: Detalle de la estructura de pavimento obtenida en FAARFIELD y con el Modelo

Combinación	FAARFIELD			MODELO		
	Esesor PCC (in)	Esesor BE (in)	Esesor BG (in)	Esesor PCC (in)	Esesor BE (in)	Esesor BG (in)
1	15.11	5.00	6.00	17.46	5.00	6.00
2	13.29	5.00	6.00	12.85	5.00	6.00
3	13.58	5.00	6.00	11.60	5.00	6.00
4	14.99	5.00	6.00	17.46	5.00	6.00
5	13.14	5.00	6.00	12.85	5.00	6.00
6	13.46	5.00	6.00	11.60	5.00	6.00
7	15.08	5.00	6.00	17.46	5.00	6.00
8	13.30	5.00	6.00	12.85	5.00	6.00
9	13.61	5.00	6.00	11.60	5.00	6.00
10	15.16	5.00	6.00	17.46	5.00	6.00
11	13.42	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
12	13.84	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
13	15.12	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
14	13.13	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
15	13.46	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
16	14.78	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
17	12.94	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
18	13.24	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
19	14.97	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
20	13.13	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
21	13.47	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
22	15.16	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
23	13.42	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
24	13.84	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
25	15.08	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
26	13.13	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
27	13.46	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
28	14.78	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
29	12.95	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
30	13.24	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
31	14.97	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
32	13.13	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
33	13.47	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
34	15.16	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00



35	13.42	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
36	13.84	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
37	15.08	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
38	13.13	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
39	13.46	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
40	14.78	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
41	12.95	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
42	13.24	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
43	14.97	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
44	13.13	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
45	13.47	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
46	15.16	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
47	13.42	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
48	13.84	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
49	15.06	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
50	13.47	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
51	13.89	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
52	14.79	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
53	13.29	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
54	13.94	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
55	15.00	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
56	13.46	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
57	14.12	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
58	15.16	6.00	6.00	17.46	5.00	6.00
59	13.70	6.00	6.00	12.85	5.00	6.00
60	14.44	6.00	6.00	11.60	5.00	6.00
61	26.78	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
62	17.51	6.00	6.00	19.20	5.00	6.00
63	16.97	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
64	26.31	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
65	17.39	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
66	16.84	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
67	26.56	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
68	17.44	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
69	16.91	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
70	26.69	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
71	17.49	6.00	6.00	19.20	5.00	6.00
72	17.00	6.00	6.00	17.96	5.00	6.00
73	26.50	4.00	6.00	23.82	5.00	6.00



74	17.51	4.00	6.00	19.20	5.00	6.00
75	16.97	4.00	6.00	17.96	5.00	6.00
76	26.31	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
77	17.39	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
78	16.84	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
79	26.56	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
80	17.44	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
81	16.91	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
82	26.69	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
83	17.49	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
84	17.00	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
85	26.50	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
86	17.51	4.00	6.00	19.20	5.00	6.00
87	16.97	4.00	6.00	17.96	5.00	6.00
88	26.52	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
89	17.68	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
90	16.84	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
91	26.56	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
92	17.44	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
93	16.91	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
94	26.69	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
95	17.49	6.00	6.00	19.20	5.00	6.00
96	17.00	6.00	6.00	17.96	5.00	6.00
97	26.50	4.00	6.00	23.82	5.00	6.00
98	17.51	4.00	6.00	19.20	5.00	6.00
99	16.97	4.00	6.00	17.96	5.00	6.00
100	26.31	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
101	17.00	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
102	16.84	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
103	26.56	5.00	6.00	23.82	5.00	6.00
104	17.44	5.00	6.00	19.20	5.00	6.00
105	16.91	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
106	26.69	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
107	17.49	6.00	6.00	19.20	5.00	6.00
108	17.00	6.00	6.00	17.96	5.00	6.00
109	26.51	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
110	17.68	4.00	6.00	19.20	5.00	6.00
111	17.38	4.00	6.00	17.96	5.00	6.00
112	26.31	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00



113	17.57	6.00	6.00	19.20	5.00	6.00
114	17.28	5.00	6.00	17.96	5.00	6.00
115	26.56	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
116	17.44	6.00	6.00	19.20	5.00	6.00
117	16.91	6.00	6.00	17.96	5.00	6.00
118	26.69	6.00	6.00	23.82	5.00	6.00
119	17.49	6.00	6.00	19.20	5.00	6.00
120	17.00	6.00	6.00	17.96	5.00	6.00

Anexo 7: Detalle de los diseños que se evalúan estructuralmente

Aeropuerto A											
Capas											
Comb.	Capa de rodadura			Base/subbase estabilizada			Base/subbase granular			Subra_sante	
	ID	ESPE_SOR	MÓ_DULO	ID	ESPE_SOR	MÓ_DULO	ID	ESPE_SOR	MÓ_DULO	k VALUE	
		(in)	(psi)		(in)	(psi)		(in)	(psi)	(pci)	
FAARFIELD	22	P-501	15.16	4,000,000	P-301	5	250,000	P-208	6	4,517	20.9
	28	P-501	14.78	4,000,000	P-306	5	700,000	P-219	6	4,517	20.9
	43	P-501	14.97	4,000,000	P-304	5	500,000	P-211	6	3,614	20.9
	51	P-501	13.76	4,000,000	P-401/P-405	5	400,000	P-154	6	32,476	440.4
	57	P-501	14.12	4,000,000	P-306	5	500,000	P-154	6	32,476	440.4
	59	P-501	13.7	4,000,000	P-302	5	250,000	P-154	6	23,700	230.65
	8	P-501	13.3	4,000,000	P-305	5	500,000	P-216	6	53,067	230.65
	9	P-501	13.61	4,000,000	P-306	5	500,000	P-217	6	93,657	440.4
	17	P-501	12.94	4,000,000	P-307	5	700,000	P-212	6	53,067	230.65
Modelo	22	P-501	17.46	4,000,000	P-301	5	250,000	P-208	6	4,517	20.9
	28	P-501	17.46	4,000,000	P-306	5	700,000	P-219	6	4,517	20.9
	43	P-501	17.46	4,000,000	P-304	5	500,000	P-211	6	3,614	20.9
	51	P-501	11.6	4,000,000	P-401/P-405	5	400,000	P-154	6	32,476	440.4
	57	P-501	11.6	4,000,000	P-306	5	500,000	P-154	6	32,476	440.4
	59	P-501	12.85	4,000,000	P-302	5	250,000	P-154	6	23,700	230.65
	8	P-501	12.85	4,000,000	P-305	5	500,000	P-216	6	53,067	230.65
	9	P-501	12.85	4,000,000	P-306	5	500,000	P-217	6	93,657	440.4
	17	P-501	11.6	4,000,000	P-307	5	700,000	P-212	6	53,067	230.65



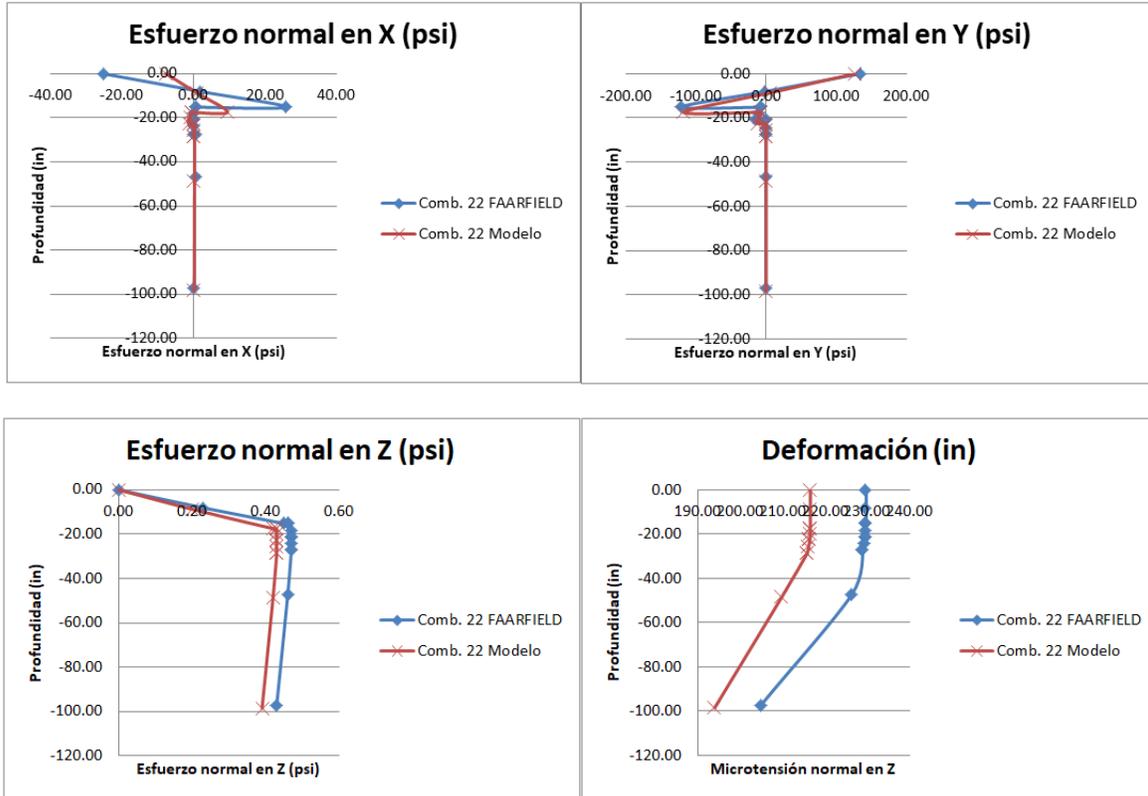
Aeropuerto B											
Capas											
Comb.	Capa de rodadura			Base/subbase estabilizada			Base/subbase granular			Subra_sante	
	ID	Espe_sor	Mó_dulo	ID	Espe_sor	Mó_dulo	ID	Espe_sor	Mó_dulo	k VALUE	
		(in)	(psi)		cm (in)	(psi)		cm (in)	(psi)	(pci)	
FAARFIELD	25	P-501	26.50	4,000,000	P-401/P-403	6	400,000	P-219	6	4,517	20.9
	52	P-501	26.31	4,000,000	P-306	6	700,000	P-154	6	2,712	20.9
	10	P-501	26.69	4,000,000	P-301	6	250,000	P-209	6	4,517	20.9
	38	P-501	17.51	4,000,000	P-401/P-403	4	400,000	P-211	6	42,453	230.65
	54	P-501	17.28	4,000,000	P-306	5	700,000	P-154	6	32,476	440.4
	18	P-501	16.84	4,000,000	P-306	5	700,000	P-208	6	93,657	440.4
Modelo	25	P-501	23.81	4,000,000	P-401/P-403	5	400,000	P-219	6	4,517	20.9
	52	P-501	23.81	4,000,000	P-306	5	700,000	P.154	6	2,712	20.9
	10	P-501	23.81	4,000,000	P-301	5	250,000	P-209	6	4,517	20.9
	38	P-501	19.20	4,000,000	P-401/P-403	4	400,000	P-211	6	42,453	230.65
	54	P-501	17.96	4,000,000	P-306	5	700,000	P-154	6	32,476	440.4
	18	P-501	17.96	4,000,000	P-306	5	700,000	P-208	6	93,657	440.4



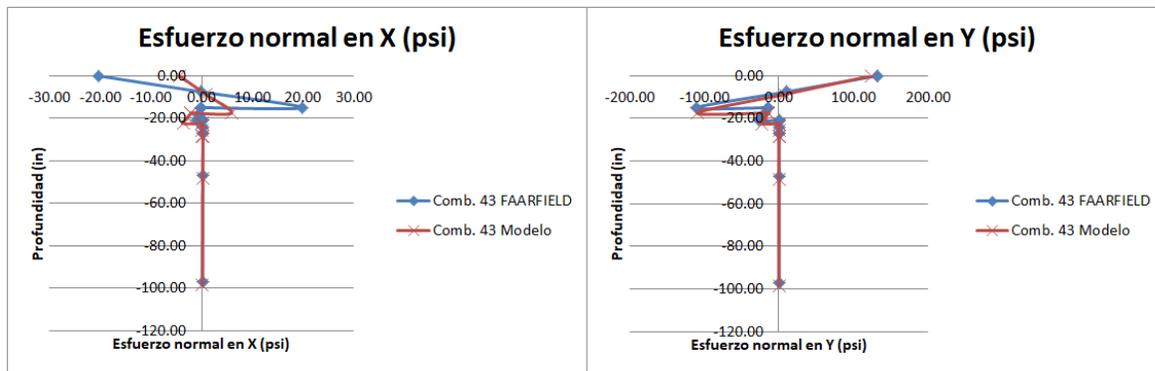
Anexo 8: Comparación del desempeño de los diseños (FAARFIELD vs. Modelo)

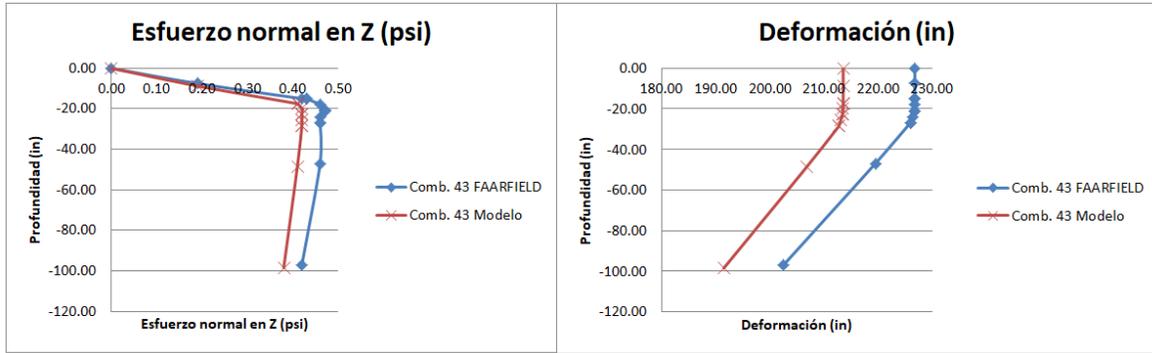
Aeropuerto A.

Combinación 22.

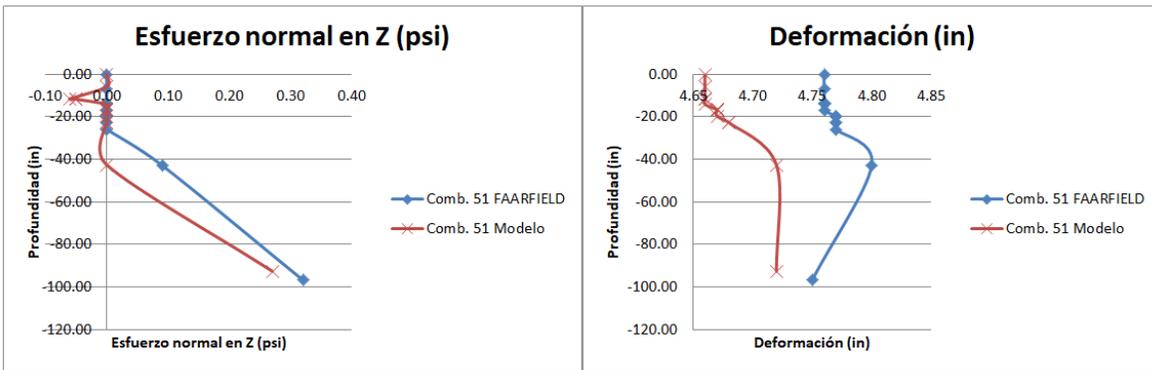
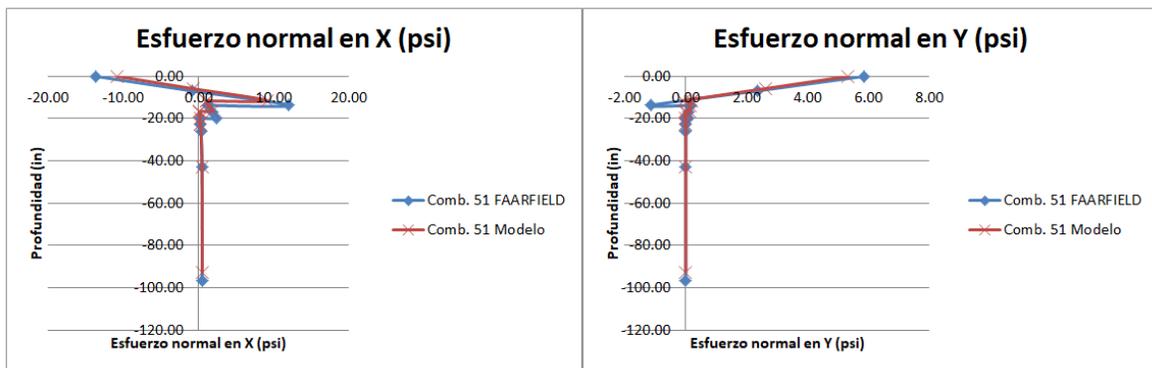


Combinación 43



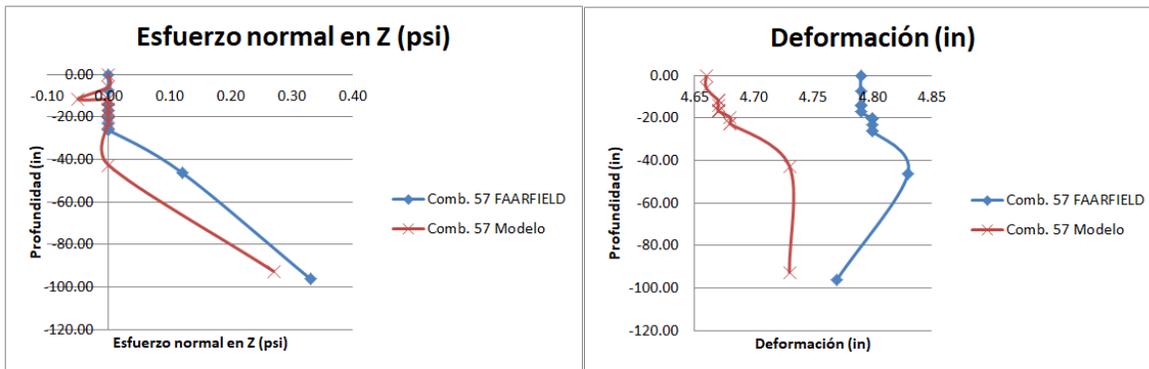
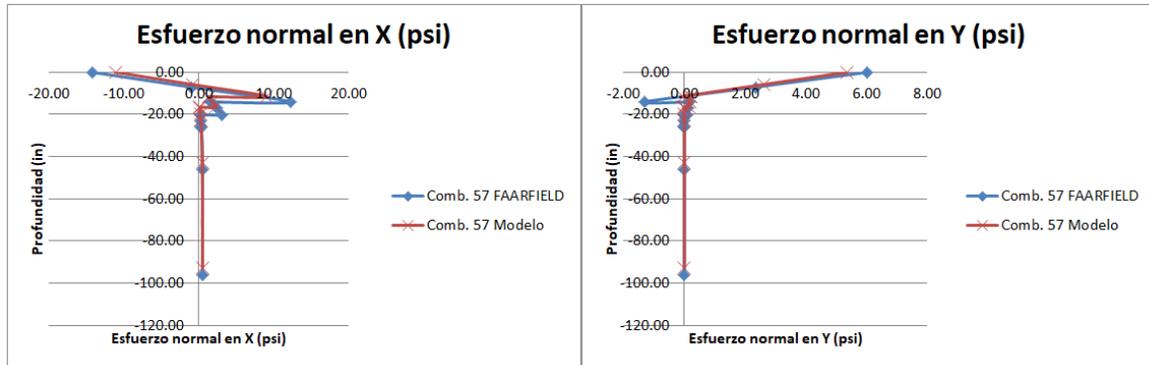


Combinación 51

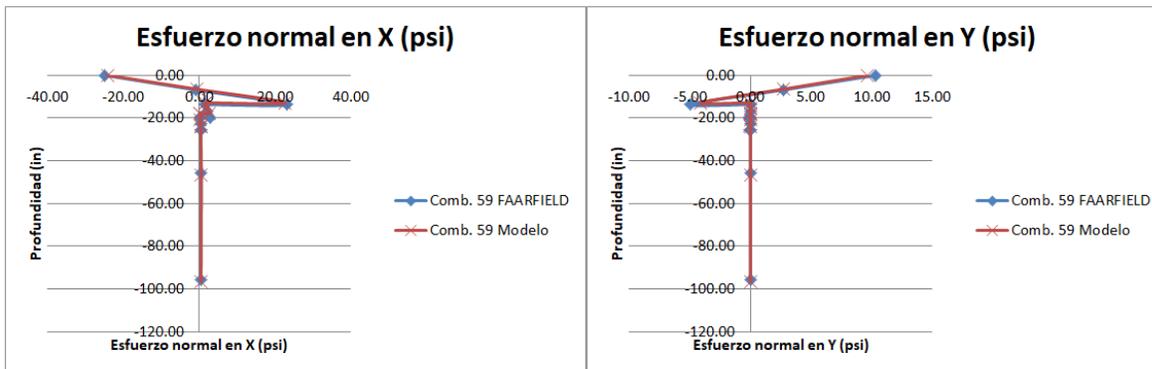


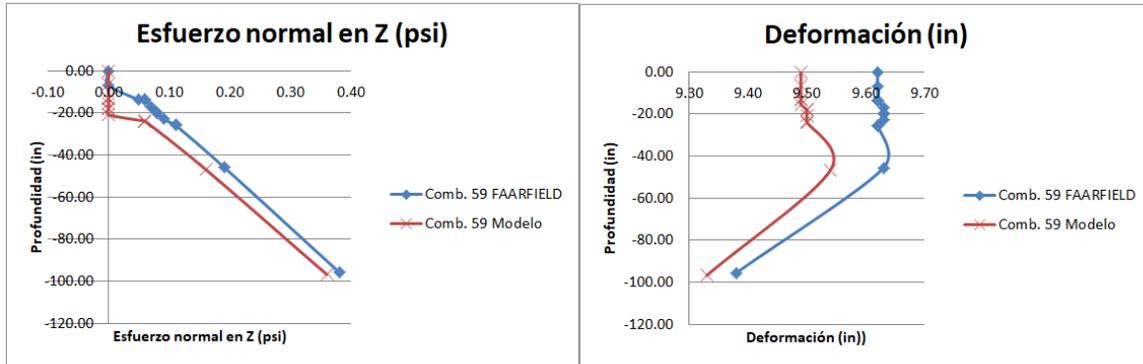


Combinación 57

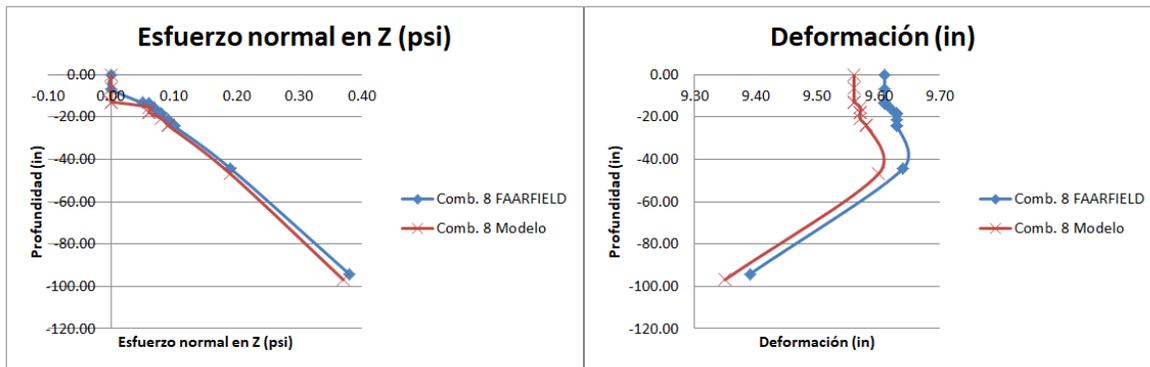
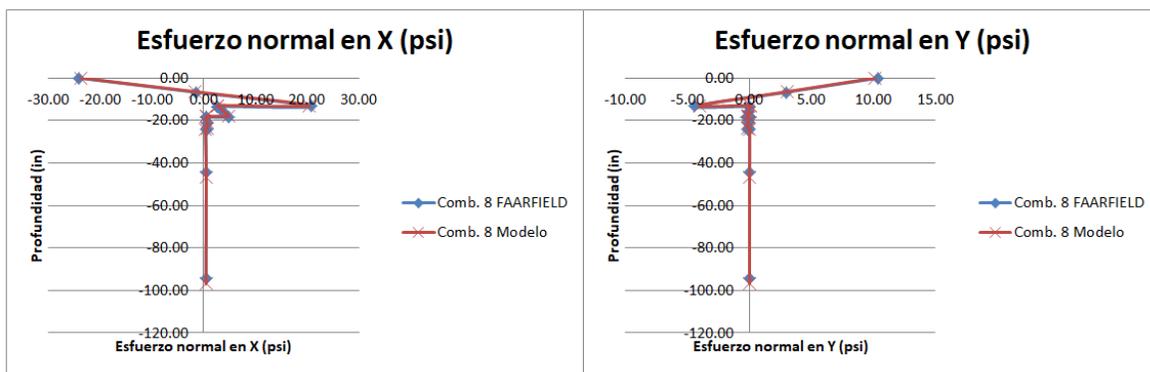


Combinación 59

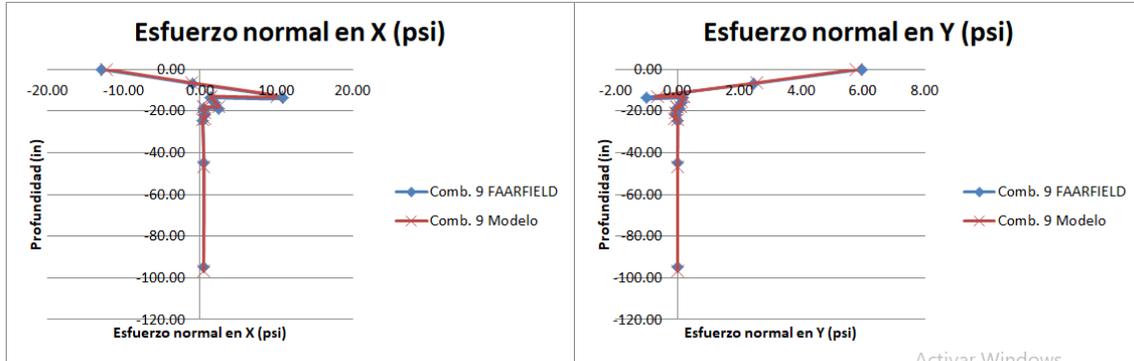




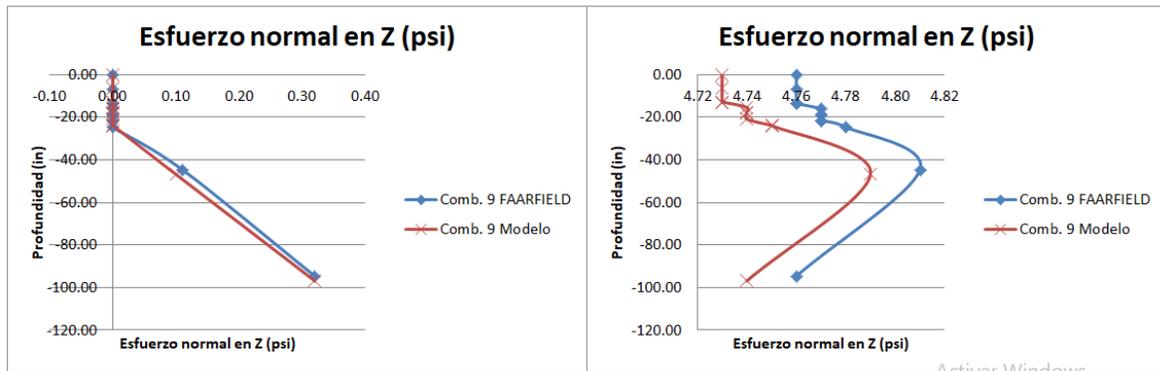
Combinación 8



Combinación 9

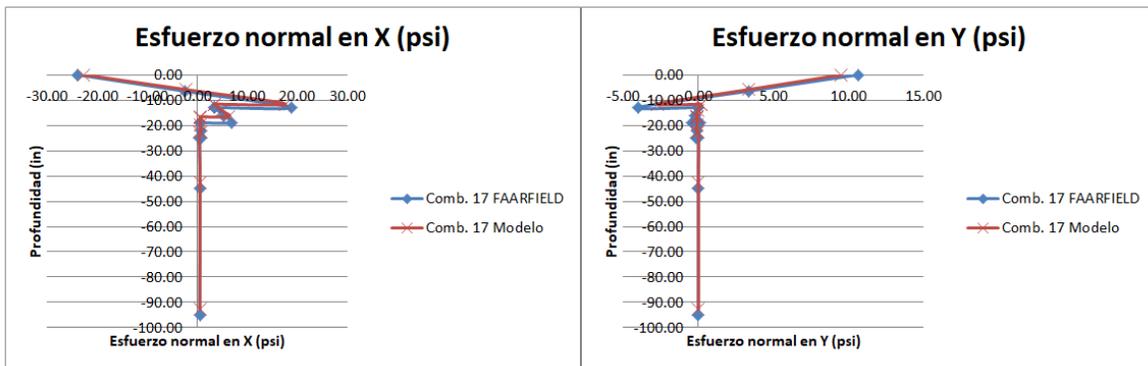


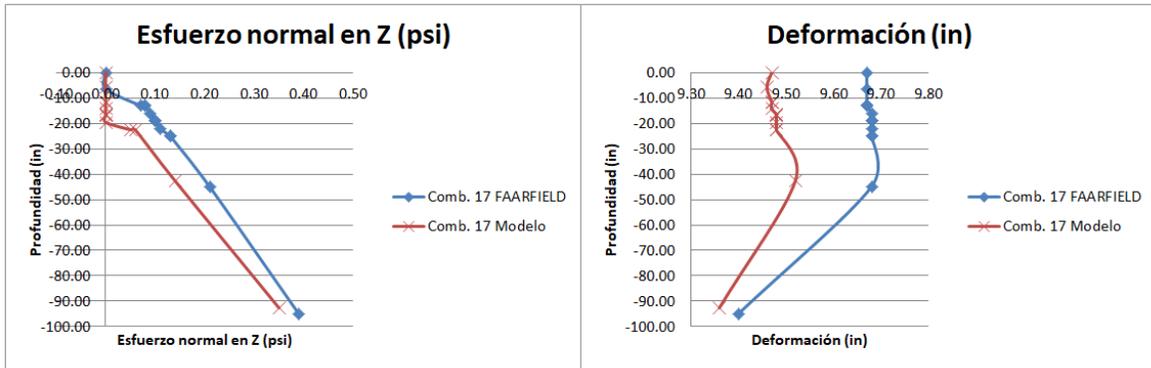
Activar Windows



Activar Windows

Combinación 17

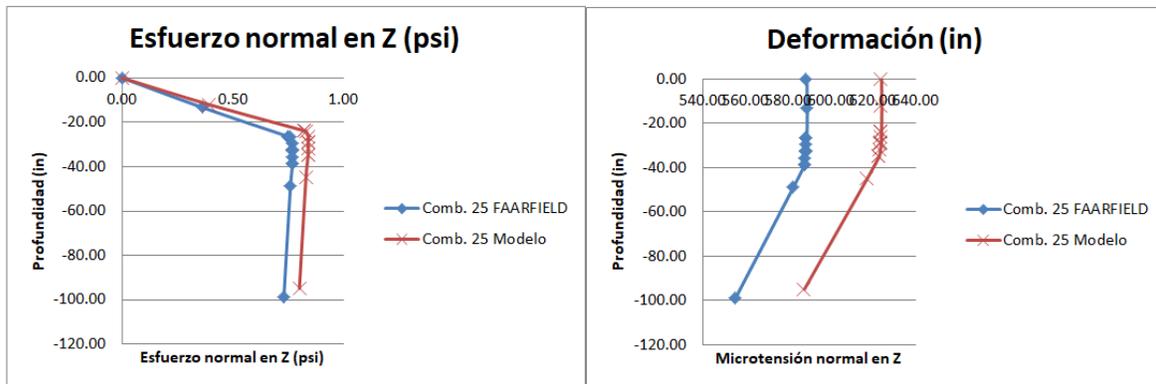
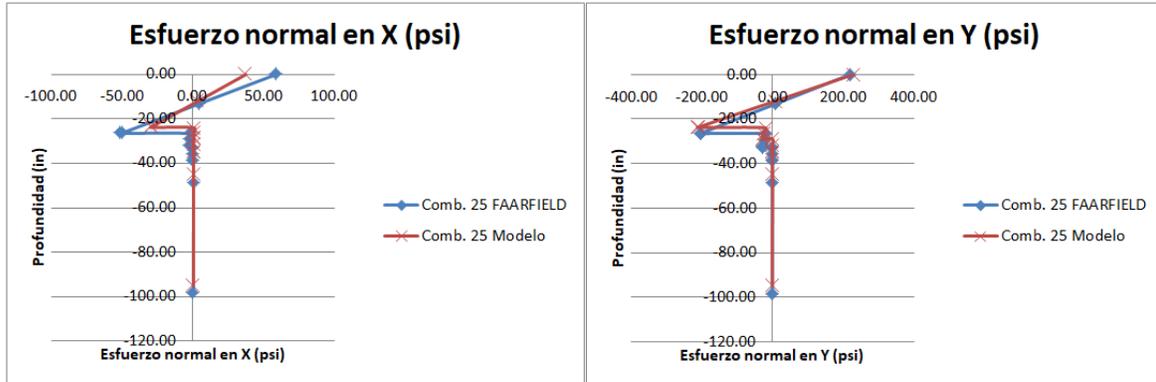




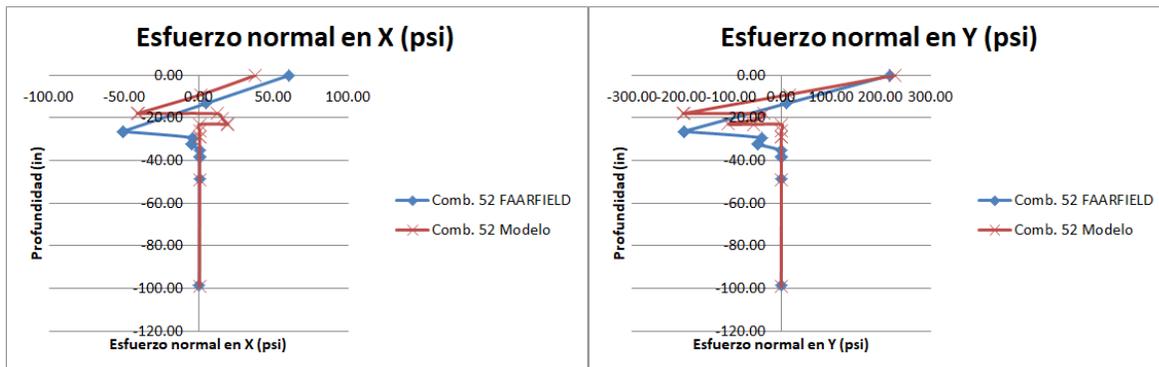


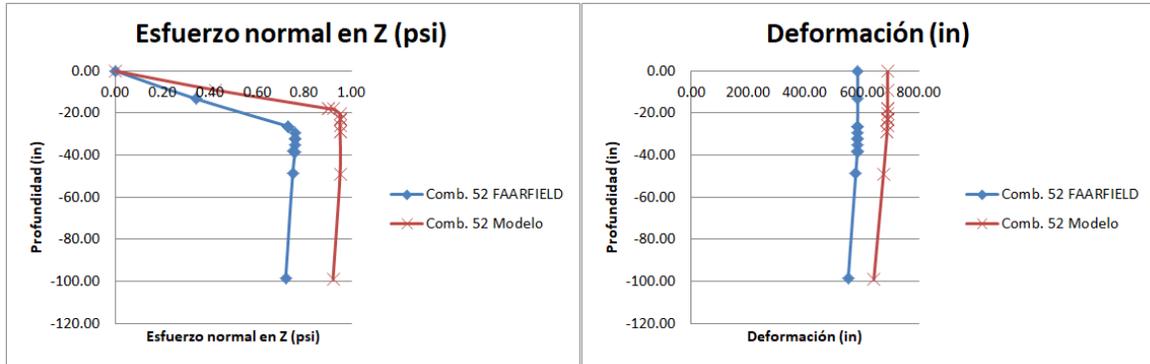
Aeropuerto B

Combinación 25

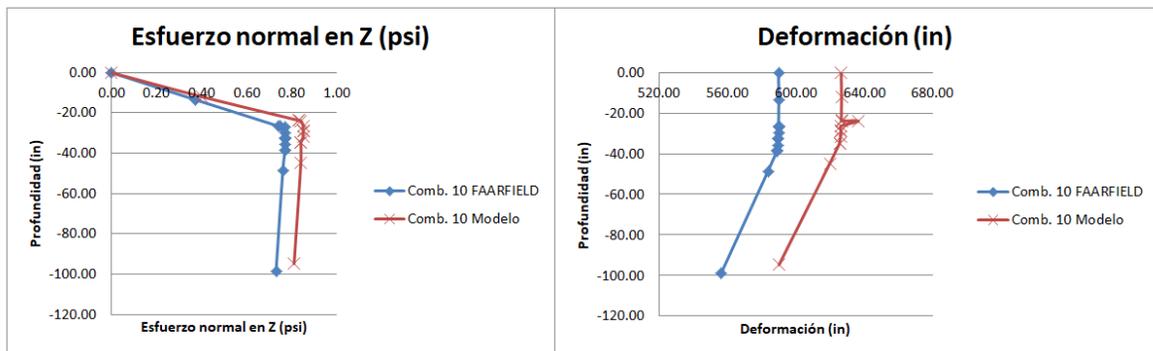
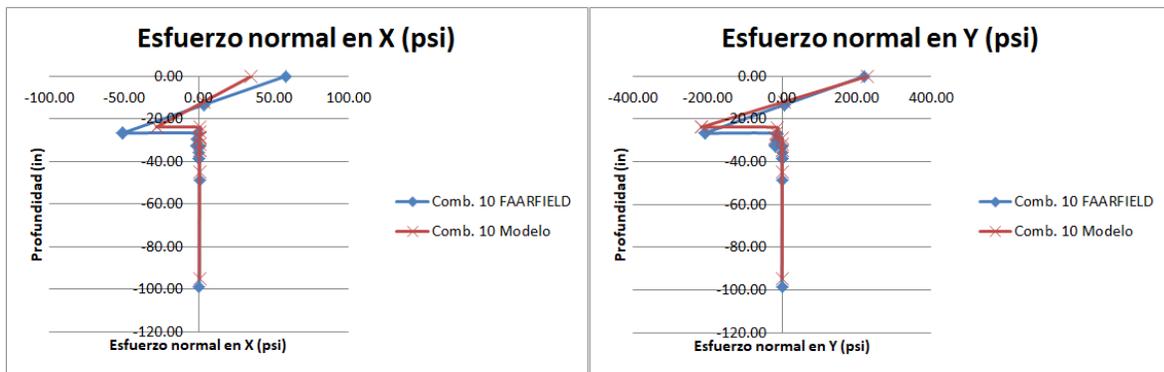


Combinación 52



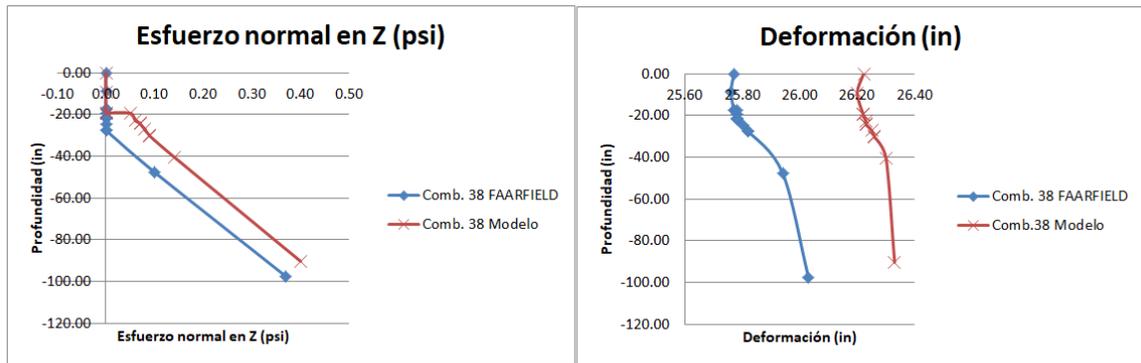
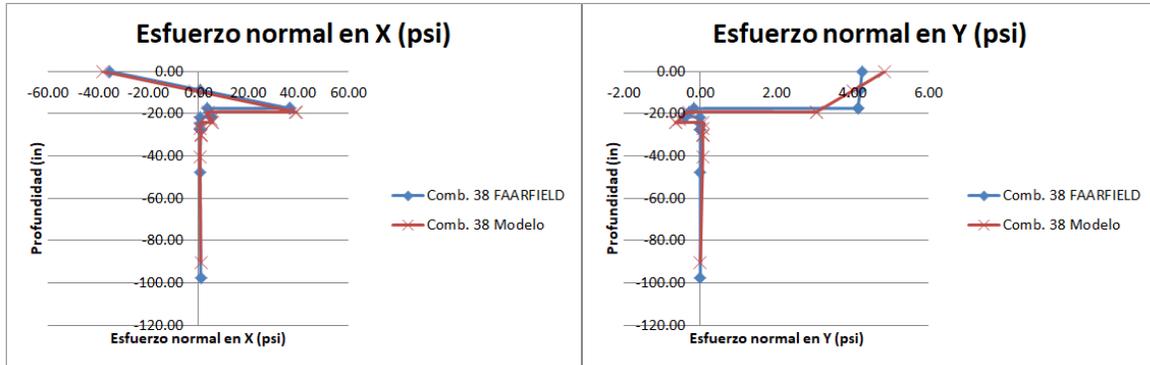


Combinación 10



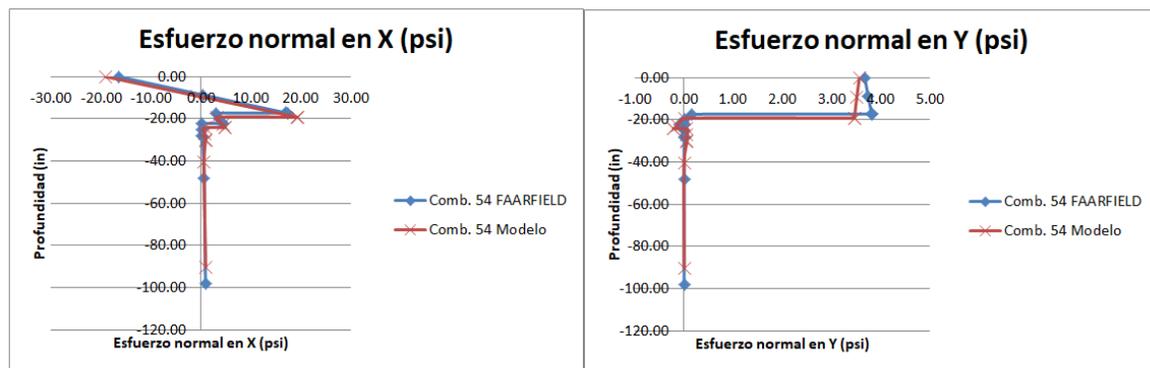


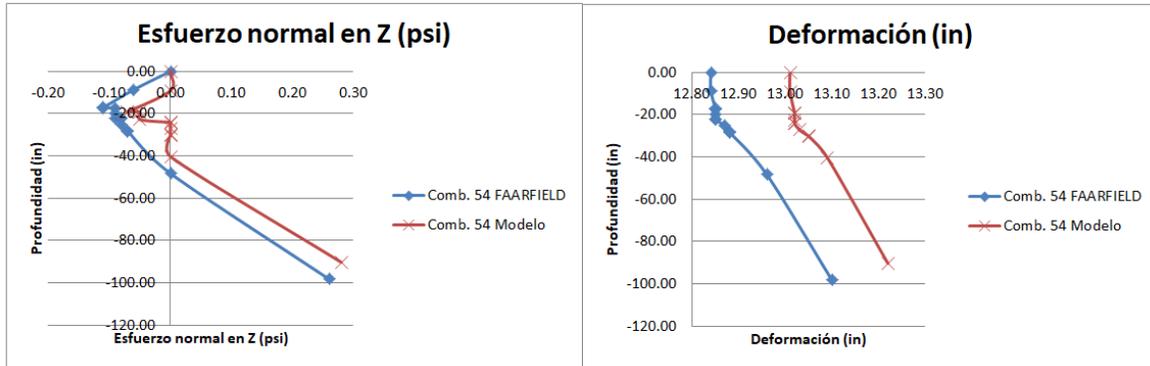
Combinación 38



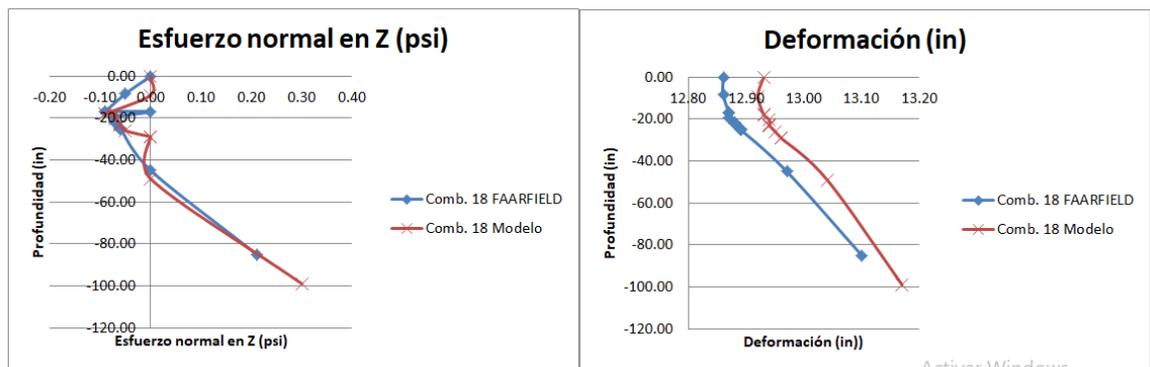
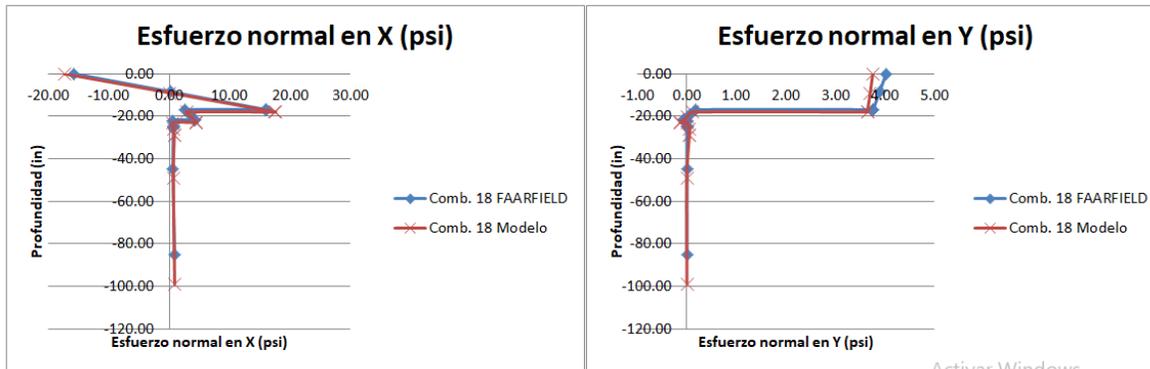
Autodesk VAWI 2010

Combinación 54





Combinación 18





Anexo 9: Esfuerzos y deformaciones de los diseños seleccionados (FAARFIELD y Modelo).

Diseños FAARFIELD – Aeropuerto A					
Combinación	Profundidad (in)	Esfuerzo normal (psi)			Deformación (mili.in)
		X	Y	Z	Z
22	0.00	-25.29	134.35	0.00	229.61
	-8.08	1.95	-1.94	0.23	229.63
	-15.15	25.75	-121.18	0.45	229.61
	-15.16	0.25	-7.58	0.46	229.61
	-15.17	0.25	-7.59	0.46	229.61
	-18.17	0.16	-10.84	0.47	229.57
	-21.15	0.11	-14.08	0.47	229.51
	-21.16	0.16	-0.13	0.47	229.51
	-21.17	0.16	-0.13	0.47	229.51
	-24.16	0.16	-0.18	0.47	229.20
	-27.15	0.16	-0.23	0.47	228.88
	-27.16	0.25	0.17	0.47	228.88
	-47.16	0.23	0.14	0.46	226.26
	-97.16	0.16	0.07	0.43	204.88
28	0.00	-17.63	129.81	0.00	224.86
	-7.39	-0.49	13.54	0.18	224.88
	-14.77	16.42	-102.48	0.41	224.87
	-14.78	-0.77	-18.53	0.42	224.87
	-14.79	-0.78	-18.55	0.42	224.87
	-17.78	-1.44	-27.13	0.45	224.83
	-20.77	-2.04	-35.73	0.46	224.78
	-20.78	0.14	-0.10	0.46	224.78
	-20.79	0.14	-0.10	0.46	224.78
	-23.79	0.14	-0.15	0.46	224.48
	-26.77	0.14	-0.20	0.46	224.17
	-26.78	0.24	0.17	0.46	224.17
	-46.78	0.22	0.14	0.45	217.77
	-96.78	0.15	0.07	0.42	201.02
43	0.00	-20.41	131.60	0.00	226.82
	-7.49	-0.21	10.47	0.19	226.83
	-14.96	19.78	-110.27	0.42	226.82
	-14.97	-0.25	-14.12	0.43	226.82
	-14.98	-0.25	-14.14	0.43	226.82
	-17.98	-0.62	-20.42	0.46	226.78



	-20.96	-0.94	-26.69	0.47	226.73
	-20.97	0.14	-0.07	0.47	226.73
	-20.98	0.14	-0.07	0.47	226.73
	-23.97	0.14	-0.10	0.46	226.35
	-26.96	0.14	-0.14	0.46	225.97
	-26.97	0.24	0.17	0.46	225.96
	-46.97	0.22	0.14	0.46	219.48
	-96.97	0.15	0.07	0.42	202.50
	0.00	-13.72	5.85	0.00	4.76
	-6.88	-0.86	2.35	0.00	4.76
	-13.75	11.96	-1.14	0.00	4.76
	-13.76	1.26	0.14	0.00	4.76
	-13.78	1.26	0.14	0.00	4.76
	-16.77	1.80	0.10	0.00	4.76
	-19.75	2.34	0.07	0.00	4.77
51	-19.76	0.18	0.00	0.00	4.77
	-19.77	0.18	0.00	0.00	4.77
	-22.75	0.19	0.00	0.00	4.77
	-22.76	0.19	0.00	0.00	4.77
	-25.79	0.32	0.00	0.00	4.77
	-42.76	0.45	0.00	0.09	4.80
	-96.76	0.47	0.00	0.32	4.75
	0.00	-14.30	6.03	0.00	4.79
	-7.06	-1.03	2.35	0.00	4.79
	-14.11	12.19	-1.33	0.00	4.79
	-14.12	1.61	0.16	0.00	4.79
	-14.13	1.61	0.16	0.00	4.79
	-17.12	2.30	0.11	0.00	4.79
57	-20.11	2.98	0.07	0.00	4.80
	-20.12	0.19	0.00	0.00	4.80
	-20.13	0.19	0.00	0.00	4.80
	-23.12	0.20	0.00	0.00	4.80
	-26.11	0.21	0.00	0.00	4.80
	-26.12	0.33	0.00	0.00	4.80
	-46.12	0.47	0.00	0.12	4.83
	-96.12	0.46	0.00	0.33	4.77
	0.00	-24.94	10.33	0.00	9.62
	-6.85	-0.85	2.67	0.00	9.62
	-13.69	23.16	-4.97	0.05	9.62



59	-13.70	1.53	0.00	0.06	9.62
	-13.71	1.53	0.00	0.06	9.62
	-16.70	2.15	0.00	0.07	9.63
	-19.69	2.78	-0.12	0.08	9.63
	-19.70	0.27	0.00	0.08	9.63
	-19.71	0.27	0.00	0.08	9.63
	-22.70	0.30	0.00	0.09	9.63
	-25.69	0.32	-0.05	0.11	9.62
	-25.70	0.38	0.00	0.11	9.62
	-45.70	0.48	0.00	0.19	9.63
	-95.70	0.43	0.00	0.38	9.38
8	0.00	-24.13	10.37	0.00	9.61
	-6.65	-1.58	2.95	0.00	9.61
	-13.29	20.89	-4.45	0.05	9.61
	-13.30	2.73	0.00	0.06	9.61
	-13.31	2.73	0.00	0.06	9.61
	-15.80	3.76	-0.10	0.07	9.62
	-18.29	4.79	-0.24	0.08	9.63
	-18.30	0.51	-0.08	0.08	9.63
	-18.31	0.51	0.08	0.08	9.63
	-21.30	0.61	-0.11	0.09	9.63
	-24.29	0.70	-0.14	0.10	9.63
	-24.30	0.39	0.00	0.10	9.63
	-44.30	0.49	0.00	0.19	9.64
	-94.30	0.44	0.00	0.38	9.39
	9	0.00	-12.98	5.96	0.00
-6.81		-1.05	2.47	0.00	4.76
-13.6		10.82	-1.01	0.00	4.76
-13.61		1.43	0.17	0.00	4.76
-13.62		1.43	0.17	0.00	4.76
-16.11		1.96	0.12	0.00	4.77
-18.60		2.49	0.07	0.00	4.77
-18.61		0.45	-0.05	0.00	4.77
-18.62		0.45	-0.05	0.00	4.77
-21.60		0.54	-0.08	0.00	4.77
-21.61		0.54	-0.08	0.00	4.77
-24.61		0.35	0.00	0.00	4.78
-44.61		0.49	0.00	0.11	4.81
-94.61		0.47	0.00	0.32	4.76



17	0.00	-24.06	10.65	0.00	9.67
	-6.47	-2.59	3.32	0.00	9.67
	-12.93	18.80	-4.01	0.07	9.67
	-12.94	3.44	0.00	0.08	9.67
	-12.95	3.44	0.00	0.08	9.67
	-15.94	5.14	-0.21	0.09	9.68
	-18.93	6.84	-0.46	0.10	9.68
	-18.94	0.53	0.09	0.10	9.68
	-18.95	0.53	-0.09	0.10	9.68
	-21.94	0.62	-0.12	0.11	9.68
	-24.93	0.71	-0.15	0.13	9.68
	-24.94	0.40	0.00	0.13	9.68
	-44.94	0.49	0.00	0.21	9.68
	-94.94	0.43	0.00	0.39	9.40

Diseños modelo - Aeropuerto A					
Combinación	Profundidad (in)	Esfuerzo normal (psi)			Deformación (mili.in) Z
		X	Y	Z	
22	0.00	-7.77	126.41	0.00	216.46
	-8.73	0.86	4.42	0.20	216.48
	-17.45	9.43	-117.38	0.42	216.46
	-17.46	-0.81	-7.57	0.43	216.46
	-17.47	-0.81	-7.58	0.43	216.46
	-19.96	-1.16	-9.88	0.43	216.42
	-22.45	-1.50	-12.19	0.43	216.37
	-22.46	0.11	-0.10	0.43	216.37
	-22.47	0.11	-0.10	0.43	216.37
	-25.46	0.11	-0.14	0.43	216.08
	-28.45	0.11	-0.18	0.43	215.79
	-28.46	0.22	0.16	0.43	215.79
	-48.46	0.20	0.13	0.42	209.72
	-98.46	0.14	0.07	0.39	193.94
	0.00	-2.11	121.91	0.00	211.19
	-8.73	0.86	8.92	0.18	211.22
	-17.45	3.68	-103.86	0.39	211.20
	-17.46	-3.25	-19.30	0.40	211.20
-17.47	-3.25	-19.33	0.40	211.20	
-19.96	-4.42	-25.36	0.41	211.17	
-22.45	-5.55	-31.41	0.42	211.12	



28	-22.46	0.10	-0.08	0.42	211.12
	-22.47	0.10	-0.08	0.42	211.12
	-25.46	0.10	-0.12	0.42	210.84
	-28.45	0.09	-0.16	0.42	210.56
	-28.46	0.21	0.16	0.42	210.56
	-48.46	0.19	0.13	0.41	204.74
	-98.46	0.13	0.07	0.38	189.63
43	0.00	-4.40	123.86	0.00	213.55
	-8.73	0.81	7.03	0.19	213.57
	-17.45	5.90	-109.60	0.41	213.56
	-17.46	-2.11	-14.43	0.41	213.56
	-17.47	-2.12	-14.45	0.41	213.56
	-19.96	-2.90	-18.89	0.42	213.52
	-22.45	-3.65	-23.34	0.42	213.47
	-22.46	0.11	-0.05	0.42	213.47
	-22.47	0.11	-0.05	0.42	213.47
	-25.46	0.10	-0.08	0.42	213.13
	-28.45	0.10	-0.11	0.42	212.78
	-28.46	0.22	0.16	0.42	212.78
	-48.46	0.19	0.13	0.41	206.85
	-98.46	0.13	0.07	0.38	191.47
51	0.00	-10.82	5.32	0.00	4.66
	-5.80	-0.78	2.60	0.00	4.66
	-11.50	9.08	-0.07	- 0.06	4.66
	-11.60	0.97	0.17	- 0.05	4.66
	-11.70	0.99	0.17	- 0.05	4.66
	-14.10	1.40	0.15	0.00	4.66
	-16.50	1.80	0.12	0.00	4.67
	-16.60	0.13	0.00	0.00	4.67
	-16.70	0.13	0.00	0.00	4.67
	-19.60	0.15	0.00	0.00	4.67
	-22.50	0.16	0.00	0.00	4.68
	-22.60	0.26	0.00	0.00	4.68
	-42.60	0.43	0.00	0.00	4.72
	-92.60	0.49	0.00	0.27	4.72
	0.00	-11.11	5.35	0.00	4.66
-5.80	-0.94	2.62	0.00	4.66	



57	-11.50	9.05	-0.06	- 0.05	4.67
	-11.60	1.22	0.22	0.00	4.67
	-11.70	1.24	0.22	0.00	4.67
	-14.10	1.76	0.19	0.00	4.67
	-16.50	2.28	0.16	0.00	4.67
	-16.60	0.13	0.00	0.00	4.67
	-16.70	0.13	0.00	0.00	4.67
	-19.60	0.15	0.00	0.00	4.68
	-22.50	0.16	0.00	0.00	4.68
	-22.60	0.26	0.00	0.00	4.68
	-42.60	0.43	0.00	0.00	4.73
	-92.60	0.49	0.00	0.27	4.73
59	0.00	-24.10	9.62	0.00	9.49
	-6.43	-0.75	2.73	0.00	9.49
	-12.84	22.49	-4.13	0.00	9.49
	-12.85	1.47	0.05	0.00	9.49
	-12.86	1.47	0.05	0.00	9.49
	-15.35	2.02	0.00	0.00	9.49
	-17.85	2.56	0.00	0.00	9.50
	-17.86	0.24	0.00	0.00	9.50
	-17.87	0.24	0.00	0.00	9.50
	-20.86	0.27	0.00	0.00	9.50
	-23.85	0.30	-0.05	0.06	9.50
	-23.86	0.34	0.00	0.06	9.50
8	-46.86	0.48	0.00	0.16	9.54
	-96.86	0.44	0.00	0.36	9.33
	0.00	-23.71	10.07	0.00	9.56
	-6.43	-1.63	3.01	0.00	9.56
	-12.84	20.34	-4.02	0.00	9.56
	-12.85	2.66	0.06	0.00	9.56
	-12.86	2.66	0.06	0.00	9.56
	-15.35	3.71	-0.06	0.06	9.57
	-17.85	4.76	-0.19	0.06	9.57
	-17.86	0.51	-0.08	0.06	9.57
	-17.87	0.51	-0.08	0.06	9.57
	-20.86	0.60	-0.11	0.08	9.57
-23.85	0.70	-0.14	0.09	9.58	
-23.86	0.38	0.00	0.09	9.58	



	-46.86	0.49	0.00	0.19	9.60
	-96.86	0.43	0.00	0.37	9.35
	0.00	-12.24	5.78	0.00	4.73
	-6.43	-1.10	2.56	0.00	4.73
	-12.84	9.99	-0.64	0.00	4.73
	-12.85	1.32	0.19	0.00	4.73
	-12.86	1.32	0.19	0.00	4.73
	-15.35	1.85	0.14	0.00	4.74
9	-17.85	2.38	0.10	0.00	4.74
	-17.86	0.43	-0.05	0.00	4.74
	-17.87	0.43	-0.05	0.00	4.74
	-20.86	0.52	-0.07	0.00	4.74
	-23.85	0.61	-0.10	0.00	4.75
	-23.86	0.34	0.00	0.00	4.75
	-46.86	0.49	0.00	0.10	4.79
	-96.86	0.47	0.00	0.32	4.74
	0.00	-22.70	9.51	0.00	9.47
	-5.80	-2.39	3.35	0.00	9.46
	-11.50	17.53	-2.71	0.00	9.47
	-11.60	3.28	0.19	0.00	9.47
	-11.70	3.34	0.18	0.00	9.47
	-14.10	4.80	0.00	0.00	9.47
17	-16.50	6.26	-0.10	0.00	9.48
	-16.60	0.47	-0.07	0.00	9.48
	-16.70	0.48	-0.07	0.00	9.48
	-19.60	0.58	-0.10	0.00	9.48
	-22.50	0.67	-0.13	0.05	9.48
	-22.60	0.36	0.00	0.06	9.48
	-42.60	0.48	0.00	0.14	9.52
	-92.60	0.45	0.00	0.35	9.36

Diseños FAARFIELD - aeropuerto B					
Combinación	Profundidad	Esfuerzo normal (psi)			Deformación (mili.in)
	(in)	X	Y	Z	Z
	0.00	58.43	219.72	0.00	588.73
	-13.25	3.91	7.73	0.36	588.90
	-26.40	-50.30	-202.61	0.75	588.76
	-26.50	-50.71	-204.22	0.75	588.76
	-26.60	-1.58	-18.98	0.76	588.76



25	-29.50	-2.02	-23.28	0.77	588.72
	-32.40	-2.44	-27.59	0.77	588.67
	-32.50	-2.45	-27.74	0.77	588.67
	-32.60	0.33	0.07	0.77	588.66
	-35.50	0.31	0.00	0.77	588.25
	-38.40	0.30	0.00	0.77	587.82
	-38.50	0.30	0.00	0.77	587.81
	-48.60	0.37	0.30	0.76	582.51
	-98.60	0.30	0.21	0.73	555.38
52	0.00	60.52	218.32	0.00	585.19
	-13.16	4.91	11.23	0.34	585.36
	-26.30	-50.77	-195.48	0.73	585.22
	-26.31	-50.82	-195.64	0.73	585.22
	-26.32	-50.86	-195.79	0.73	585.22
	-29.31	-4.00	-39.30	0.76	585.19
	-32.30	-4.84	-46.94	0.76	585.14
	-32.31	-4.84	-46.96	0.76	585.14
	-32.40	-4.86	-47.19	0.76	585.14
	-35.31	0.35	0.19	0.76	584.51
	-38.20	0.34	0.16	0.75	583.90
	-38.40	0.34	0.16	0.76	583.85
	-48.40	0.37	0.30	0.75	578.70
	-98.40	0.30	0.21	0.72	551.95
	10	0.00	57.89	220.34	0.00
-13.35		3.38	5.73	0.37	589.96
-26.50		-50.39	-205.64	0.74	589.82
-26.69		-51.15	-208.70	0.75	589.81
-26.75		-0.89	-14.00	0.77	589.81
-29.69		-1.16	-14.76	0.77	589.77
-32.50		-1.41	-17.38	0.77	589.72
-32.69		-1.43	-17.56	0.77	589.72
-32.75		0.33	0.07	0.77	589.71
-35.69		0.31	0.00	0.77	589.29
-38.50		0.30	0.00	0.77	588.88
-38.69		0.30	0.00	0.77	588.85
-48.69		0.38	0.30	0.76	583.58
-98.69		0.30	0.21	0.73	556.36
0.00		-35.34	4.25	0.00	25.77
-8.75	0.60	4.20	0.00	25.76	



38	-17.40	36.10	4.14	0.00	25.77
	-17.51	36.55	4.15	0.00	25.77
	-17.60	3.51	-0.18	0.00	25.78
	-19.50	4.24	-0.30	0.00	25.78
	-21.40	4.98	-0.42	0.00	25.78
	-21.50	5.02	-0.42	0.00	25.78
	-21.60	0.55	0.00	0.00	25.78
	-24.50	0.64	0.00	0.00	25.80
	-27.40	0.73	0.00	0.00	25.82
	-27.50	0.74	0.00	0.00	25.82
	-47.60	0.66	0.00	0.10	25.94
	-97.60	0.84	0.00	0.37	26.03
	0.00	-16.52	3.67	0.00	12.84
	-8.64	0.36	3.74	-0.06	12.84
54	-17.10	16.88	3.81	-0.11	12.85
	-17.28	17.23	3.81	-0.11	12.85
	-17.40	2.84	0.15	-0.09	12.85
	-19.78	3.61	0.00	-0.09	12.85
	-22.10	4.36	-0.08	-0.09	12.85
	-22.28	4.42	-0.09	-0.08	12.85
	-22.40	0.17	0.00	-0.08	12.85
	-25.28	0.19	0.00	-0.08	12.87
	-28.10	0.20	0.00	-0.07	12.88
	-28.28	0.21	0.00	-0.07	12.88
	-48.28	0.58	0.00	0.00	12.96
	-98.28	0.85	0.00	0.26	13.10
	0.00	-15.77	4.02	0.00	12.86
	-8.42	0.11	3.89	-0.05	12.86
-16.83	15.96	3.76	-0.09	12.87	
-16.84	15.98	3.76	-0.09	12.87	
-16.94	2.62	0.18	0.00	12.87	
-19.34	3.38	0.06	-	12.87	



18				0.07	
	-21.74	4.13	-0.07	-	12.88
				0.07	
	-21.84	4.16	-0.07	-	12.88
				0.07	
	-21.94	0.55	0.00	-	12.88
				0.07	
	-24.74	0.65	0.00	-	12.89
				0.06	
	-24.84	0.66	0.00	-	12.89
			0.06		
-24.94	0.66	0.00	-	12.89	
			0.06		
-44.94	0.59	0.00	0.00	12.97	
-84.94	0.84	0.00	0.21	13.10	

Diseños modelo - Aeropuerto B

Combinación	Profundidad	Esfuerzo normal (psi)			Deformación (mili.in)
	(in)	X	Y	Z	Z
	0.00	37.24	228.28	0.00	623.71
	-11.91	3.65	7.86	0.39	623.86
	-23.71	-	-210.48	0.82	623.74
		29.74			
	-23.81	-	-212.33	0.82	623.73
		30.02			
	-23.91	0.58	-20.10	0.83	623.73
25	-26.31	0.61	-24.29	0.84	623.70
	-28.71	0.66	-28.49	0.84	623.66
	-28.81	0.66	-28.67	0.84	623.33
	-28.91	0.40	0.11	0.84	623.65
	-31.81	0.39	0.05	0.84	623.22
	-34.71	0.38	0.00	0.84	622.77
	-34.81	0.38	0.00	0.84	622.75
	-44.81	0.42	0.33	0.83	617.07
	-94.81	0.34	0.22	0.80	587.56
	0.00	37.91	228.24	0.00	689.89
	-8.98	1.63	15.81	0.42	689.97
	-17.86	-	-194.21	0.90	689.92
		40.55			
	-17.96	-	-196.58	0.90	689.92
		40.99			
	-18.06	12.62	-34.70	0.92	689.91
	-20.46	15.93	-44.60	0.95	689.89



52	-22.86	19.29	-106.00	0.95	689.87
	-22.96	19.43	-54.93	0.95	689.87
	-23.06	0.56	0.30	0.95	689.84
	-25.96	0.56	0.26	0.95	689.14
	-28.86	0.56	0.22	0.95	688.42
	-28.96	0.56	0.22	0.95	688.39
	-48.96	0.51	0.34	0.95	675.64
	-98.96	0.42	0.22	0.92	641.89
	0.00	35.02	229.05	0.00	626.51
10	-11.91	3.36	6.08	0.40	626.66
	-23.71	-	-214.79	0.83	626.53
		28.09			
	-23.81	-	-216.66	0.83	626.53
		28.35			
	-23.91	0.59	-12.76	0.84	636.53
	-26.31	0.63	-15.41	0.85	626.50
	-28.71	0.69	-18.07	0.85	626.46
	-28.81	0.69	-18.18	0.85	626.45
	-28.91	0.41	0.10	0.85	626.44
	-31.81	0.40	0.00	0.85	626.00
	-34.71	0.39	0.00	0.84	625.55
	-34.81	0.39	0.00	0.84	625.54
	-44.81	0.43	0.33	0.84	619.82
-94.81	0.35	0.23	0.81	590.09	
38	0.00	-	4.85	0.00	26.22
		38.24			
	-9.10	-1.58	4.00	0.00	26.20
	-19.10	38.64	3.05	0.00	26.22
	-19.20	39.04	3.05	0.00	26.22
	-19.30	3.78	-0.31	0.05	26.22
	-22.80	5.11	-0.55	0.06	26.23
	-24.10	5.61	-0.64	0.07	26.23
	-24.20	5.65	-0.65	0.07	26.23
	-24.30	0.66	0.06	0.07	26.23
	-27.20	0.75	0.06	0.08	26.25
	-30.10	0.83	0.06	0.09	26.26
	-30.20	0.83	0.06	0.09	26.26
	-40.30	0.62	0.06	0.14	26.30
-90.30	0.84	0.00	0.40	26.33	
0.00	-	3.56	0.00	13.01	



		19.15			
	-9.10	-0.92	3.51	0.00	13.01
	-19.10	19.08	3.46	- 0.07	13.02
	-19.20	19.28	3.46	- 0.07	13.02
	-19.30	3.20	0.00	- 0.05	13.02
54	-22.80	4.36	-0.14	- 0.05	13.02
	-24.10	4.79	-0.21	0.00	13.02
	-24.20	4.82	-0.22	0.00	13.02
	-24.30	0.66	0.06	0.00	13.02
	-27.20	0.76	0.06	0.00	13.03
	-30.10	0.86	0.06	0.00	13.05
	-30.20	0.87	0.06	0.00	13.05
	-40.30	0.58	0.00	0.00	13.09
	-90.30	0.86	0.00	0.28	13.22
	0.00	-	3.75	0.00	12.93
		17.44			
	-8.98	0.09	3.70	0.00	12.92
	-17.86	17.40	3.64	- 0.09	12.93
	-17.96	17.59	3.64	- 0.09	12.93
	-18.06	2.90	0.12	- 0.07	12.93
	-20.46	3.68	0.00	- 0.07	12.94
18	-22.86	4.46	-0.13	- 0.06	12.94
	-22.96	4.49	-0.14	- 0.06	12.94
	-23.06	0.60	0.00	- 0.06	12.94
	-25.96	0.71	0.05	- 0.05	12.95
	-28.86	0.81	0.05	0.00	12.96
	-28.96	0.81	0.05	0.00	12.96
	-48.96	0.65	0.00	0.00	13.04
	-98.96	0.87	0.00	0.30	13.17



REFERENCIAS

1. **Horonjeff Robert McKelvey Francis, Sproule William, Young Seth** Planning and Design of Airports [Libro]. - [s.l.] : Mc Graw Hill, 2010.
2. CEPAL. (2015). *Transporte y política aérea en América Latina y el Caribe en el contexto de desarrollo sostenible*.
3. Banco de desarrollo de América Latina. (2016). *Análisis de inversiones aeroportuarias y portuarias en América Latina y el Caribe al horizonte 2040*.
4. Alberto, S. (2008). *La aviación y los aeropuertos en Guayaquil*. Guayaquil: Grafipren S.A.
5. «Aeropuerto Cuenca,» [En línea]. Available: <http://www.aeropuertocuenca.ec/acerca-de-corpac/>. [Último acceso: 15 Septiembre 2018].
6. «Federal Aviation Administration,» [En línea]. Available: <https://www.faa.gov/>. [Último acceso: 10 Septiembre 2018].
7. Varella H., Buis S., Launey M., et al., «Global sensitivity analysis for choosing the main soil parameters of a crop model to be determined.,» *Agricultural Sciences.*, vol. 3, nº 7, 2012.
8. **U.S. Department of transportation** Advisory Circular 150/5320 - 6D: Airport Pavement Design and Evaluation. [Informe]. - 1995.
9. **Jorge Jimenez** [En línea]. - 27 de Septiembre de 2012. - 17 de Diciembre de 2018. - <https://es.scribd.com/doc/107215808/viga-fundacion-elastica>.
10. R David VIII ALACPA Airport Pavement Seminar & VI FAA Airport Pavement Workshop [Conferencia] // FAARFIELD 1.3 Hands on Training. - Buenos Aires: [s.n.], 2011.
11. Curiel Delia Orozco Mauricio SCRIBD [En línea]. - 01 de Septiembre de 2018.
12. **Ott Lyman Longnecker Michael** An introduction to Statistics Methods and Data Analysis [Libro]. - [s.l.] : Brooks/ Cole, 2001.
13. **Kerlinger Fred Lee Howard** Investigación del comportamiento. [Libro]. - [s.l.] : Mc Graw Hill. - Vol. 4.
14. Lopez Pedro Fachelli Sandra Metodología de la investigación social cuantitativa. [Libro]. - Barcelona : Creative Commons, 2015.



15. **Vicente Manzano** [En línea]. - 2014. - 19 de Noviembre de 2018. - <http://asignatura.us.es/dadpsico/apuntes/EpAnalisisVarianza.pdf>.
16. **Ronald Thisted** What is P-value?. - 2010.
17. [En línea] // Diseño de pavimentos para aeropuertos y drenaje, capítulo 4.. - 19 de Diciembre de 2018. - http://132.248.9.195/pdbis/264197/264197_07.pdf.
18. **ACPA** Análisis del costo del ciclo de vida: una herramienta para evaluar mejor las inversiones y decisiones técnicas de pavimentación. [Informe]. - 2012.
19. hueCO2. (2014). Huella de carbono de la construcción de obras públicas. España.
20. Aeropuertos.net [En línea]. - 3-9 de Septiembre de 2018. - <https://www.aeropuertos.net/aeropuerto-internacional-mariscal-lamar-salidas-de-vuelos/>.
21. **Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC)** Registro estadístico de entradas y salidas internacionales - Documento Metodológico. [Informe]. - [s.l.]: Disponible en: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Poblacion_y_Demografia/Migracion/2017/Metodologia%20ESI_2017.pdf, 2018.
22. Tagsa.aero [En línea]. - 2018. - 10 de Septiembre de 2018. - <http://www.tagsa.aero/vuelos-an.html>.
23. MOP - 001-F 2002