

Representation of deflection bowl in flexible airport pavement structures

Representación de cuencos de deflexión en estructuras de pavimento flexible aeroportuario

Carlos Hernando Higuera-Sandoval^{1*}, Susan Daniela Camero-Patiño², Laura Sofia Ospina-Moreno³

¹MSc. Ingeniería de Transporte y Vías, carlos.higuera@uptc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1333-2517>, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

²Ingeniería de Transporte y Vías, susan.camero@uptc.edu.co, <https://orcid.org/0009-0002-6314-5453>, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

³Ingeniería de Transporte y Vías, laura.ospina04@uptc.edu.co, <https://orcid.org/0009-0000-3219-440X>, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

Cómo citar: C. H. Higuera-Sandoval, S. D. Camero-Patiño, y L. S. Ospina-Moreno, "Representación de cuencos de deflexión en estructuras de pavimento flexible aeroportuario", *Respuestas*, vol. 29, n.º 2, pp. 20–37, May. 2024. <https://doi.org/10.22463/0122820X.4347>

Received on December 24, 2023 - Approved on April 13 2024.

ABSTRACT

Keywords:

Deflection Bowl,
Structural Package,
Federal Aviation
Administration (FAA),
Influence Area.

The development of a deflection bowl for aircraft is an alternative for the analysis and observation of its loads on a flexible pavement structure and in this way to follow-up the displacement that is generated in the structural package before the pass of the aircrafts that transit in an airport. In this way, the analysis of the effect of the damage of the design aircraft (B-707-320-B) of a fleet, to which a flexible pavement structure was previously calculated with the help of the FAARFILED program and following the FAA methodology, is performed, to achieve the construction of longitudinal, transversal and 3D deflection bowls through the development of a matrix of 5000 points in Excel and WinJULEA modeling software, which resulted in significant deflections higher than 3 mm in the principal train and higher than 2 mm in the nose train in the axis of load application in each case, it was also noted a significant influence area of the aircraft wheels on the pavement and the principal train generated the most damage on the pavement due to the magnitude of the applied load.

RESUMEN

Palabras clave:

Cuenco de deflexión,
Paquete estructural,
Administración Federal de
Aviación (FAA), Área de
influencia.

La elaboración de un cuenco de deflexión para aeronaves es una alternativa para el análisis y observación de sus cargas sobre una estructura de pavimento flexible y de esta forma dar un seguimiento al desplazamiento que se genera en el paquete estructural ante el paso de las aeronaves que transiten en un aeropuerto, pues los cuencos inciden en el funcionamiento estructural y funcional de una estructura de pavimento flexible y por lo tanto en su vida útil de esta forma se realiza el análisis del efecto del daño del avión de diseño (B-707-320-B) de una flota, al que previamente se le calculó una estructura de pavimento flexible con ayuda del programa FAARFILED y siguiendo la metodología de la FAA, para lograr la construcción de cuencos de deflexión longitudinales, transversales y en 3D a través de la formación de una matriz de 5000 puntos en el software Excel y el software WinJULEA para la modelación, dando como resultado deflexiones significativas mayores a 3 mm en el tren principal y mayores a 2 mm en el tren de nariz en el eje de aplicación de las cargas en cada caso, se determinó de la misma forma, un área de influencia significativa de las ruedas del avión en el pavimento y el tren principal es el que genera el mayor daño en el pavimento por la magnitud de la carga aplicada.

*Corresponding author.

E-mail Address: carlos.higuera@uptc.edu.co

(Carlos Hernando Higuera-Sandoval)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

Introducción

El reconocimiento del estado estructural de un pavimento hace parte de los elementos de diseño críticos en la modelación del mismo, cuya investigación permite el estudio del fenómeno de la deflexión, que se trata de una herramienta de análisis significativa en cuanto a la capacidad estructural de un pavimento [1], [2], [3], a su vez determina la formación de cuencos y permite visualizar la respuesta elástica del pavimento ante la aplicación de una carga generalmente producida por el tránsito [2], [4], [5]. En el caso de los pavimentos flexibles, la deflexión juega un papel crucial, ya que está inversamente relacionada con la capacidad de soporte de dichos pavimentos, en donde deflexiones bajas reflejan una estructura de pavimento con buena capacidad estructural, mientras que deflexiones altas representan una estructura débil [5], que además puede ser comparada en valores de deflexión por zonas o capas estructurales en el largo, ancho o profundidad de la estructura de pavimento.[6], [7]. Así mismo a partir de la información recopilada de cuencos de deflexión, se pueden construir modelos tridimensionales, como los de elementos finitos, que constituyen herramientas de diseño avanzado que se prefieren por su capacidad multitarea y multifunción, su gran confiabilidad y alta precisión en los resultados [2], [8], este tipo de modelos propician el análisis de la interacción pavimento-neumáticos, los posibles modos de fallo del pavimento y la transferencia de esfuerzos al considerar tensiones y deformaciones [9].

Las deflexiones en una carretera o un aeropuerto generalmente son medidas en campo mediante diferentes métodos. Entre los más comunes se encuentra la viga Benkelman o los deflectómetros de impacto FWD, que a su vez se clasifican en livianos (LWD) o pesados (HWD) [2], [8], los cuales se tratan de los métodos más utilizados para la medición de deflexiones [3], [8]. Estos dispositivos posicionan una carga sobre el pavimento, y mediante sensores ubicados a diferentes distancias en una misma recta, se mide la deflexión en cada punto. Esto permite conocer el cuenco de deflexión definido por cada distancia vertical medida en el dispositivo. Mediante retrocálculo, este procedimiento permite conocer la rigidez de las capas individuales y la capacidad del paquete estructural basándose en la teoría elástica lineal y teniendo en cuenta la forma del cuenco obtenido [6], [10], [11], [12], [13]. Además de estos métodos, estudios recientes demuestran que la integración de datos reales del pavimento con los ensayos no destructivos proporcionan precisión acerca de la capacidad de la estructura aportando información específica del lugar, con el fin de proteger y prolongar la vida útil de los pavimentos [14].

Con base en lo anterior, se debe reconocer que los principios empleados para el diseño y la evaluación de pavimentos de carreteras pueden aplicarse a pavimentos aeroportuarios pero con algunas modificaciones, teniendo especial atención al análisis del comportamiento de los pavimentos y la predicción de sus respectivos modelos en zonas como las pistas de despegue y aterrizaje, calles de rodaje y plataformas [7], además estos pavimentos se destacan por una exigencia mayor en las especificaciones de espesores y calidad de los materiales debido a las cargas y presiones de alta magnitud que poseen las aeronaves. Por otra parte es importante destacar las diferencias en cuanto a las repeticiones de carga, puesto que en autopistas convencionales una repetición está dada por el paso de un eje mientras que en el caso de un pavimento para aeropuerto una repetición corresponde al paso de un conjunto de trenes (decolajes) [13], [15] lo que conlleva a diferentes técnicas de construcción y diferencias en la magnitud de los daños provocados en los pavimentos [16].

Los tipos de pavimentos aeroportuarios más utilizados son los pavimentos flexibles, rígidos y los pavimentos “híbridos”; en el caso de los pavimentos flexibles se usa convencionalmente la mezcla asfáltica en caliente

(MDC o por sus siglas en inglés HMA) [13], [17], para los pavimentos rígidos por otra parte se usa el concreto de cemento Portland PCC o Hormigón de Cemento simple y por último los llamados pavimentos híbridos se refieren a la disposición de una capa de pavimento flexible sobre una capa rígida (blacktopping).

En cuanto a la verificación del comportamiento estructural del diseño del pavimento de aeropuerto se consideran únicamente dos variables: tensión vertical por compresión en la subrasante y la deformación radial en la base de la carpeta asfáltica [9], [18]. Sus valores límites están definidos por los valores admisibles que garantizan la serviciabilidad y durabilidad del pavimento dentro del periodo de diseño, los cuales involucran variables como las repeticiones a la falla y el módulo elástico de la capa asfáltica [19] y se muestran en las ecuaciones (1), (2) y (3)

$$\log_{10}(C) = 2.68 - 5 * \log_{10}(\varepsilon_{AA}) - 2.665 * \log_{10}(E_A) \quad (1)$$

Donde:

C : Número de pasadas a la falla

ε_{AA} : Módulo de elasticidad del concreto asfáltico Lb/pulg²

E_A : Deformación radial admisible en la base de la capa asfáltica, strains

$$\text{Cuando } C \leq 12.100 \rightarrow C = \left(\frac{0.004}{\varepsilon_v} \right)^{8.1} \quad (2)$$

$$\text{Cuando } C > 12.100 \rightarrow C = \left(\frac{0.002428}{\varepsilon_v} \right)^{14.21} \quad (3)$$

Donde:

C : Número de pasadas a la falla

ε_v : Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante, strains

De esta manera, existen diversos aplicativos como Pitra, Bisar, Weslea, Everstress, WinJULEA, Kenlayer, entre otros, que permiten calcular y conocer los estados tensionales de una estructura de pavimentos flexible, conocidos también como los valores de servicio, y de esta forma predecir las deflexiones de un pavimento [8]; Esto facilita su evaluación para garantizar que cumpla con las características de durabilidad y resistencia ante las cargas del tránsito y los efectos climáticos, tanto para carreteras como para autopistas de aeropuertos. Conocer los estados tensionales a los cuales está sometida la estructura ante el paso de las aeronaves, es fundamental para compararlos con los valores admisibles y determinar si la estructura establecida es capaz o no de resistir los esfuerzos transmitidos por las aeronaves.

Debido a lo anterior, fueron desarrollados diversos métodos de diseño, entre ellos se encuentra el método de la Administración Federal de Aviación (FAA) de Estados Unidos, el cual es uno de los principales para el diseño de pavimentos aeroportuarios y el cual emplea los criterios anteriormente especificados para predecir la vida estructural del pavimento y proporcionar el espesor necesario para todas las capas del mismo, con base en un conjunto de aeronaves [17], [19]. En la misma forma, el Laboratorio Central de Puentes y Carreteras (LCPC) de Francia, la empresa Mincad Systems de Australia y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE), han desarrollado metodologías aceptadas para el diseño y construcción de

pavimentos aeroportuarios que han derivado en los principales softwares utilizados para estas actividades, conocidos como: FAARFIELD, ALIZE, APSD y PCASE [17], en donde se destaca que a excepción del software desarrollado por Mincad systems, los demás permiten el diseño de pavimentos flexibles y rígidos.

Una vez diseñadas las estructuras necesarias para las operaciones, se deben recopilar registros del rendimiento del pavimento e investigar cómo serían los patrones de deterioro de la estructura en base a la flota que transitará, de modo que se eviten la formación de fallas en la misma, como baches o surcos que por la operación aeroportuaria resultarían más costosos y difíciles de corregir [18].

Evaluar un pavimento aeroportuario requiere establecer su condición estructural y funcional [13], [20]. La evaluación funcional se refiere a la apariencia general del estado del pavimento y se encuentra directamente relacionada con la resistencia al deslizamiento, la rugosidad, el deterioro de la superficie, entre otros, que pueden asociarse con la seguridad y la calidad de la conducción [20], [21]. Uno de los índices más relevantes para evaluar el estado funcional de los pavimentos aeroportuarios es el índice de estado (PCI), el cual es un único número diseñado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos que refleja la condición del pavimento a través de la inspección visual para determinar la magnitud y presencia de diferentes tipos de deterioro con base a una calificación de 0 a 100, donde 0 se trata de un pavimento defectuoso y 100 de un pavimento en perfectas condiciones [13], [20], [21]. Otros índices relevantes son el Índice de Serviciabilidad Actual (PSI) y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) [21], estos índices junto con el análisis de la deflexión permiten identificar secciones uniformes y diagnosticar las posibles causas de un deterioro estructural [7].

Por otro lado, una de las herramientas que permite dar seguimiento al comportamiento estructural del pavimento una vez aplicadas las cargas y realizar el diseño de la misma, es la medición de deflexiones, estas mediciones son datos útiles que permiten la evaluación del estado del pavimento y ofrecen a operadores y gestores un método sistemático y objetivo para la evaluación, planificación del mantenimiento y asignación de presupuestos [7], [10]. Adicionalmente esta información puede ser implementada en un sistema de gestión de pavimentos (PMS), a través de indicadores como los índices de deflexión y acompañados por los estudios geotécnicos correspondientes para cada proyecto. Al igual que en las carreteras, la deflexión también puede ser medida en campo para el pavimento aeroportuario mediante procedimientos no destructivos como el FWD o HWD [3], que se tratan de alternativas apropiadas para evaluar las características mecánicas del pavimento [22] cuyo procedimiento en el estudio aeroportuario consiste en modificar la carga para simular el efecto de una sola rueda del avión más crítico y así obtener los desplazamientos típicos para estas estructuras [6], [13], [19], [20].

Otro método para la evaluación estructural de los aeropuertos fue desarrollado por la Organización Civil de Aviación Internacional (OACI), conocido como el método “Número de clasificación de aeronaves-Número de clasificación del pavimento” (ACN-PCN). Este enfoque permite definir un número que expresa el impacto de una aeronave sobre el pavimento en función de la resistencia de subrasante estándar especificada (ACN) y es proporcionado por cada aerolínea correspondiente a cada aeronave que tiene en funcionamiento. Además, se establece un número que indica la capacidad de carga estructural de un pavimento para operaciones sin restricciones (PCN) y es indicado por cada aeropuerto. La relación entre estos dos componentes da a conocer el procedimiento a seguir acerca del mantenimiento, limitaciones de pasadas de las aeronaves, etc. [13] [21]. El presente artículo aborda la construcción de un cuenco de deflexión para el avión de diseño elegido de una flota de aeronaves siguiendo la metodología propuesta por la FAA, que lleva a cabo estudios principalmente

en modelos bidimensionales y tridimensionales bajo el método de elementos finitos [15], para llegar a la construcción de una estructura de pavimento flexible de la zona más crítica de un aeropuerto que se trata de las pistas en donde la aeronave ocupa y se mueve con la capacidad máxima de carga a transportar, a este proceso se le suma la modelación de la estructura a través del software WinJULEA, De tal forma que se construya el cuenco de deflexiones en 3D y 2D tanto longitudinal como transversalmente, determinando el comportamiento de la estructura ante la aplicación de la carga del avión B-707-320-B y analizando el patrón de las deflexiones producidas y su magnitud.

Materiales y Métodos

Método de diseño. El presente estudio llevó a cabo dos procedimientos simultáneos. En primer lugar (ver Figura 1), se determinó la aeronave más crítica para una estructura de pavimento flexible mediante el método de la FAA, es decir, basándose en el mayor espesor obtenido de las cartas de diseño de pavimentos flexibles para áreas críticas de cada aeronave y/o de acuerdo a la configuración de trenes de la flota establecida.

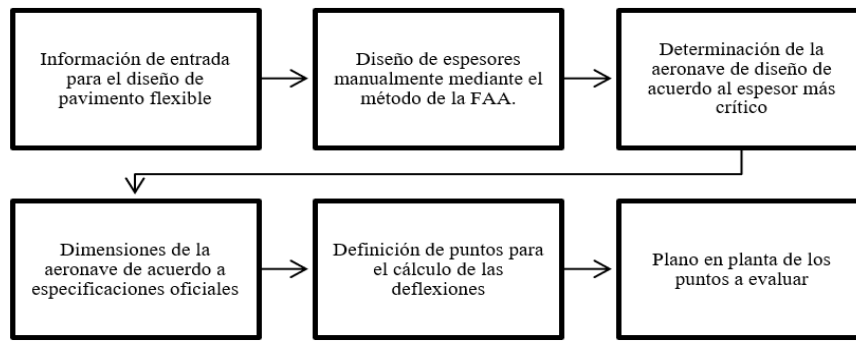


Figura 1. Procedimiento para la obtención de la aeronave a modelar

En segundo lugar (ver Figura 2), se llevó a cabo la optimización de la estructura que soportaría la flota analizada, mediante la implementación del programa FAARFIELD establecido para el diseño de pavimentos de aeropuertos por la FAA.

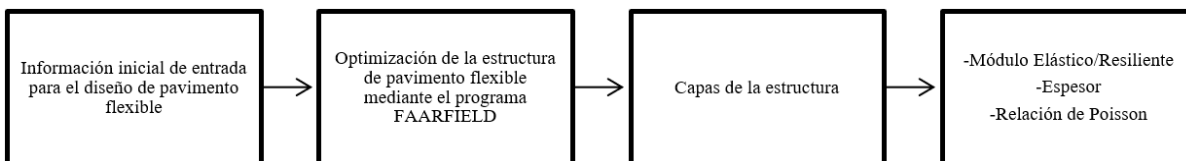


Figura 2. Procedimiento para la obtención de la estructura de pavimento flexible.

Una vez completados ambos procedimientos se procedió a relacionar estos dos componentes para ingresarlos al programa seleccionado para posteriormente modelar y obtener los cuencos transversales, longitudinales y en 3 dimensiones-3d. (ver Figura 3)

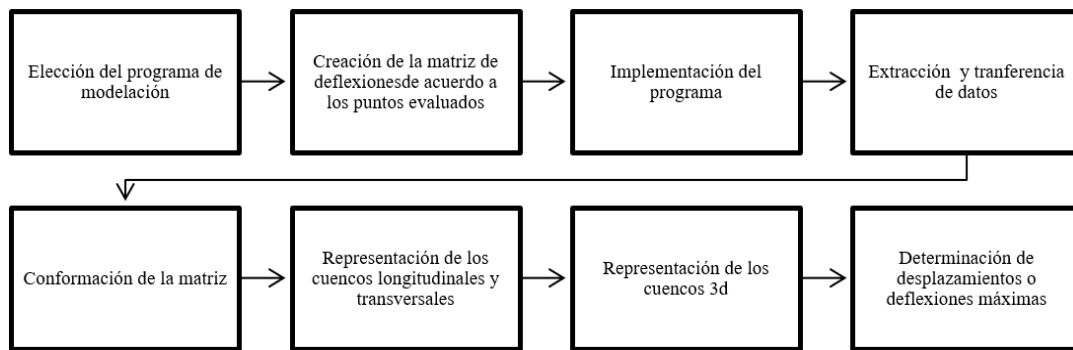


Figura 3. Procedimiento para la obtención de los cuencos de deflexión.

Aeronave de diseño

La aeronave de diseño se eligió en base a la metodología de la Administración Federal de Carreteras, en donde se usan una serie de cartas de diseño que emplean como variable principal la capacidad de soporte del suelo o CBR, que para este caso de estudio fue de 3.5%, además se debe tener en cuenta la geometría del tren de aterrizaje de cada aeronave, el número de decolajes anuales y el peso bruto máximo de decolajes de estas [23]. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la aeronave de diseño corresponde a la que requiere un espesor de pavimento flexible mayor, por tal razón, se eligió la aeronave B-707-320B como aeronave de diseño. Las dimensiones de la aeronave se determinaron a partir de especificaciones y fichas técnicas de los fabricantes de las aeronaves. (Ver Figura 4)

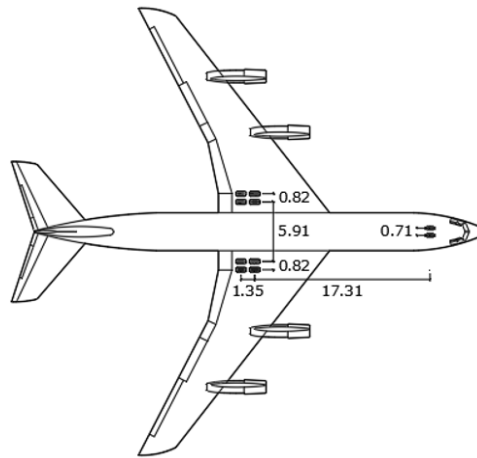


Figura 4. Configuración y dimensiones del avión de diseño

Con la aeronave de diseño, se procedió a establecer la zona de influencia para determinar el comportamiento del pavimento no solo en el área ocupada por el avión, sino también en sus alrededores. (Ver Figura 5)

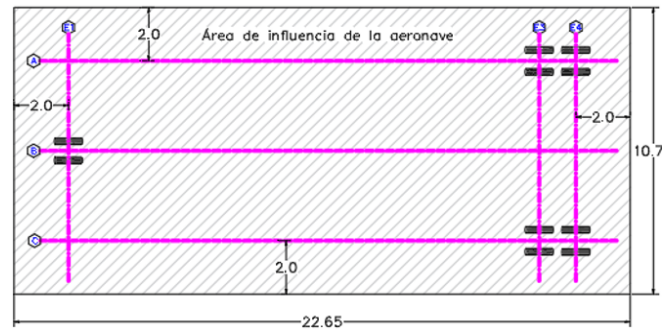


Figura 5. Área de influencia del avión

Ahora bien, se determinaron los puntos de análisis estableciendo una variación proporcional tanto horizontal como verticalmente en el área de influencia. Esta variación fue calculada relacionando la distancia horizontal del área de influencia y el número de puntos horizontalmente fijados (100), dando como resultado 0.23 metros. Además, fue necesario considerar algunos puntos de relevancia como la posición de las cargas y en medio de ellas. La ubicación de los puntos se presenta en la Figura 6.

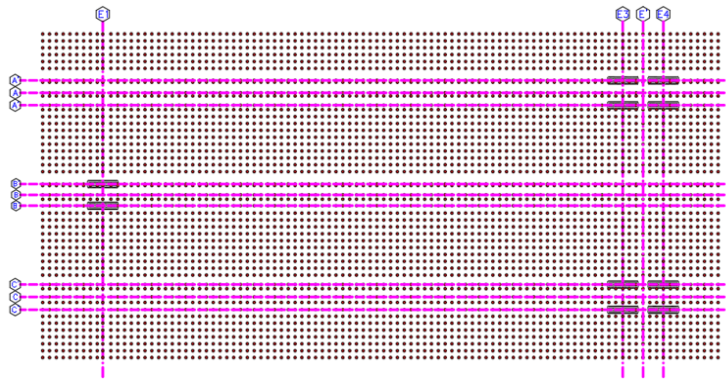


Figura 6. Puntos evaluados incluyendo ruelas y puntos centrales

Estructura de pavimento flexible

La definición de la estructura de pavimento flexible es un proceso iterativo, donde se ven involucrados el tipo, calidad y propiedades estructurales de los materiales, la magnitud y las características de las aeronaves, el volumen y la distribución del tránsito y la resistencia de la subrasante, los cuales son ingresados por el modelador y procesados por el programa [19] (ver Figura 7), el cual cuenta con la siguiente estructura y menús de procesamiento de datos.

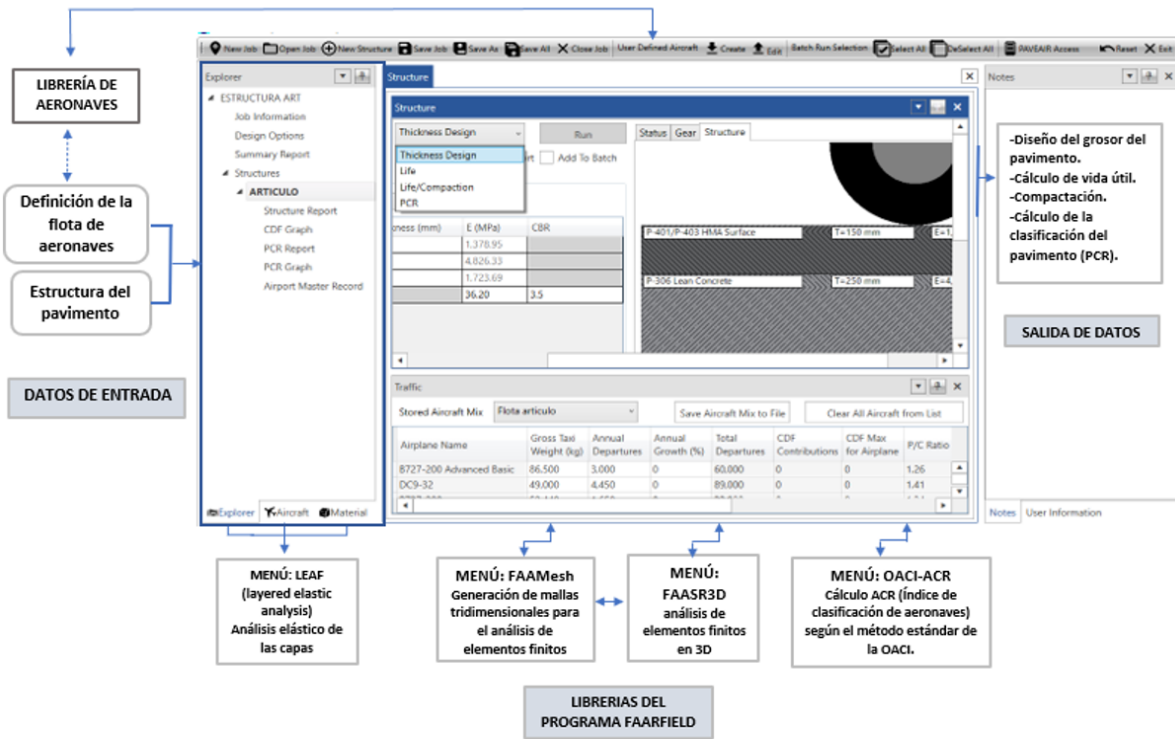


Figura 7. Descripción general del programa FAARFIELD

Fuente: Federal Administration Aviation, 2021.

Teniendo en cuenta la flota y la homologación de esta, la estructura de pavimento establecida comprende de 4 capas compuesta por una capa asfáltica con un espesor de 150 mm y un módulo elástico de 1378.95 MPa; una capa de base estabilizada con concreto magro con un espesor de 250 mm y módulo resiliente de 4826.33 MPa; una capa de base estabilizada con suelo cemento con un espesor de 310 mm y módulo resiliente de 1723.69 MPa y una subrasante de 36.20 MPa. (Ver Figura 8)

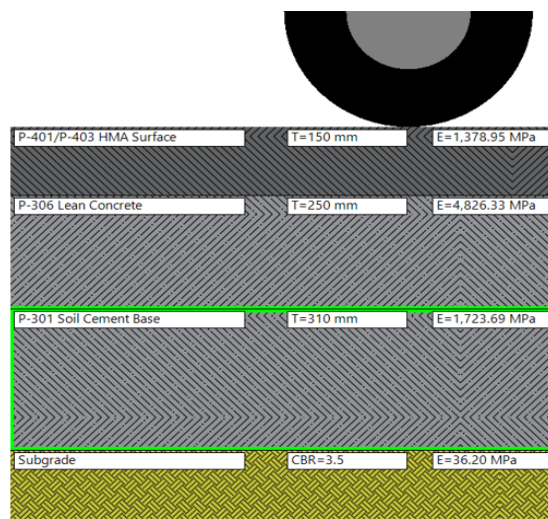


Figura 8. Estructura de pavimento obtenida mediante el programa FAARFIELD

De la misma manera, se realizó la verificación del cumplimiento de los criterios de fatiga y deformación vertical. Para ello, mediante el software WinJULEA se modeló el semieje del tren principal del avión de diseño y se posicionó en la estructura de pavimento obtenida mediante el programa FAARFIELD. Los resultados obtenidos, de servicio, se relacionaron con los valores admisibles y se calculó el consumo y la reserva del modelo estructural propuesto, tal como se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Verificación de criterios del pavimento aeroportuario

Criterio	Parámetro	Servicio	Admisible	%Consumo	%Reserva	Observaciones
Fatiga	ϵ_r	2.67E-05	5.01E-04	5.3	94.7	Cumple
Deformación (z)	ϵ_z	8.41E-05	1.07E-03	7.9	92.1	Cumple

Como se puede observar, la estructura seleccionada posee valores elevados de reserva, lo que supone una mayor durabilidad con el paso del tiempo. Debido a que estos valores se obtuvieron directamente de FAARFIELD, se conservó la escritura calculada por este y se procedió a llevar a cabo la modelación.

Modelación

La modelación se realizó a través del programa WinJULEA, debido a la facilidad de la extracción y transferencia de datos. Este programa cuenta con una interfaz muy completa, donde integra los datos asociados a las capas, las cargas, los puntos de evaluación y los resultados en el sistema de unidades inglesas [24]. Los resultados se visualizan en forma de matriz en base a las coordenadas X, Y y Z ingresadas de los puntos evaluados.

La primera fase de la modelación consistió en la determinación de algunas variables relacionadas a los factores de diseño y evaluación de pavimentos como el peso por llanta de la aeronave, la presión de contacto y las coordenadas de ubicación y de los puntos de evaluación. El peso por llanta se determinó con base al peso bruto máximo de decolaje, la configuración del tren de aterrizaje y la distribución de las cargas en el mismo. Es importante resaltar que, aunque las dos primeras variables pueden diferir de un avión a otro, la distribución de la carga para los aviones se reparte generalmente en 95 % para el tren principal y 5% para el tren de nariz [18]. (Ver Tabla II).

Tabla II. Carga/rueda del avión de diseño

PBMD avión de diseño	Tren	% distribución de carga	Peso (Kg)	Ruedas	Peso/rueda (Kg)	Peso/rueda (Lb)
136650	Nariz	5.0	6832.5	2	3416.25	7531.5
	Principal	95.0	129817.5	8	16227.1875	35774.8

La presión de contacto se determinó mediante el programa FAARFIELD. Este parámetro varía según la configuración del tren, el peso bruto y el tamaño de los neumáticos. Para determinar esta variable, FAARFIELD mantiene el área de contacto constante, lo que genera que un aumento en el peso bruto produzca un aumento proporcional de la presión de contacto [15]. El valor de esta variable arrojado por el programa fue de 1651.91 KPa.

De la misma manera, se calculó el área de contacto relacionando la carga por rueda y la presión de contacto, asumiendo una huella redondeada como se muestra en la expresión (4) [18].

$$Ac = \frac{P}{q} \quad (4)$$

Donde:

Ac: Área de contacto

P: Carga por rueda

q: Presión de contacto

Con respecto a las coordenadas, se obtuvieron posicionando el plano cartesiano en medio de las llantas del tren de nariz y se determinaron los valores de la ubicación de las ruedas. (Ver Tabla III)

Tabla III. Coordenadas de las cargas (ruedas) del avión de diseño

X-COORD (In)	Y-COORD (In)	LOAD (Lb)	Ac (pulg2)	
0.0	14.06	7532	31.33	Tren de Nariz
0.0	-14.06	7532	31.33	
681.3	-148.58	35775	148.83	Tren principal
681.3	-116.38	35775	148.83	
681.3	116.38	35775	148.83	
681.3	148.58	35775	148.83	
734.4	-148.58	35775	148.83	
734.4	-116.38	35775	148.83	
734.4	116.38	35775	148.83	
734.4	148.58	35775	148.83	

Finalmente se obtuvieron los valores de los puntos de evaluación, involucrando las cargas y los puntos intermedios entre ruedas y entre ejes. Con estos valores se procedió a conformar la matriz disponiendo en las columnas X y en las filas Y, dando como resultado una matriz de 50 X 100, con 5000 puntos en total. El esquema para el ingreso de los datos de la matriz me muestra en la Tabla IV.

Tabla IV. Esquema ilustrativo de la configuración de la matriz de puntos de evaluación.

X \ Y	-78.7	-69.8	-60.9	-52.0	-43.1	-34.1	n=100
-211.22								
-202.30								
-193.38								
-184.46								
-175.54								
-166.63								
-157.71								
.....								
n=50								

Con la información de entrada completa para la implementación del programa WinJULEA, se procedió a ingresar los datos y obtener los desplazamientos verticales en la superficie de la capa asfáltica. Es importante resaltar, que el programa identifica un par de coordenadas X y Y, por lo que fue necesario correr el programa

tantas veces como Y existieran (50), colocando y variando en el programa los valores de Y para la totalidad de valores en X que existieran (100). (Ver Figura 9).

Input Layers				
	Thickness	E-Modulus	PR	Slip
1	5.9100	0.19995E+06	0.35000	0.0000
2	9.8400	0.69984E+06	0.20000	0.0000
3	12.200	0.24994E+06	0.20000	0.0000
4	0.0000	5249.1	0.35000	0.0000
5				
6				

Input Loads				
	X-Coord.	Y-Coord.	Load	Contact Area
1	0.0000	14.060	7531.5	31.340
2	0.0000	-14.060	7531.5	31.340
3	681.34	-148.58	35775	148.87
4	681.34	-116.38	35775	148.87
5	681.34	116.38	35775	148.87

Input Evaluation Points	
	X-Coord. Y-Coord.
1	-78.740 -211.22
2	-69.821 -211.22
3	-60.902 -211.22
4	-51.983 -211.22
5	-43.065 -211.22
6	-34.146 -211.22

Input Calculation Depths	
	Depth
1	0.0000
2	
3	
4	
5	
6	

Figura 9. Ingreso de datos al programa

Seguidamente, los resultados de los desplazamientos se extraen y se transfieren a la matriz realizada previamente hasta determinar la deflexión en los 5000 puntos. (Ver Figura 10)

Results at Calculations Points			
	Point 1	Point 2	Point 3
X-Coord.	-78.740	-69.821	-60.902
Y-Coord.	-211.22	-211.22	-211.22
Z-Coord.	0.0000	0.0000	0.0000
Stress_X	-53.087	-1.5632	0.96218
Stress_Y	-20.407	-2.4816	-7.3232
Stress_Z	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_XY	2.1661	-16.117	2.8953
Strain_X	-0.22978E-03	-0.34741E-05	0.17631E-04
Strain_Y	-0.91354E-05	-0.96746E-05	-0.38309E-04
Strain_Z	0.12865E-03	0.70801E-05	0.11135E-04
ShearStrain_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_XY	0.29250E-04	-0.21764E-03	0.39097E-04
Displ_X	0.13053E-02	0.90618E-03	0.11751E-02
Displ_Y	0.13835E-02	0.11729E-02	0.17315E-02
Displ_Z	0.28419E-01	0.30840E-01	0.30499E-01
PrincStress_1	0.11093E-05	14.101	1.8737
PrincStress_2	-20.264	-0.21702E-05	-0.68028E-06
PrincStress_3	-53.230	-18.146	-8.2347
PrincStrain_1	0.12865E-03	0.10229E-03	0.23785E-04
PrincStrain_2	-0.81703E-05	0.70801E-05	0.11135E-04

Matriz de deflexiones				
X \ Y	-78.7	-69.8	-60.9n=100
-211.22	2.84E-02	3.08E-02	3.05E-02	
-202.30				
-193.38				
.....n=50				

Figura 10. Creación de la matriz de deflexiones

Resultados y Discusión

Según el modelo realizado, se logra representar las deflexiones mediante los cuencos longitudinales, transversales y en tres dimensiones (3D), a partir del avión de diseño establecido y la estructura de pavimento flexible propuesta.

Cuencos transversales

Los cuencos transversales se determinaron únicamente para los ejes del tren de aterrizaje del avión, teniendo en total tres cuencos transversales y la comparación de estos.

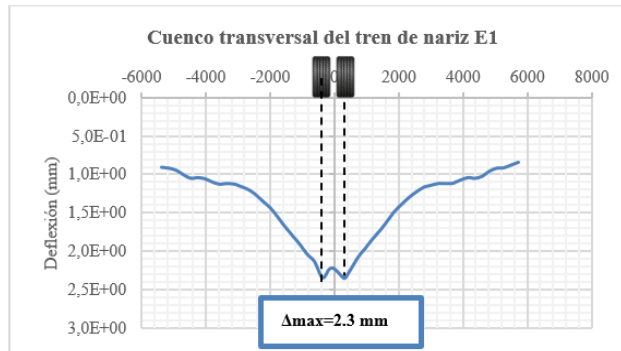


Figura 11. Cuenco transversal del tren de nariz

A partir de la Figura 11, se puede apreciar un comportamiento descendente en la forma de la estructura de pavimento, llegando hasta un valor máximo de 2.3 mm ubicado en el punto de aplicación de la carga. Adicional a esto, se nota un punto de inflexión en medio de las llantas del tren de nariz, para luego tener un comportamiento ascendente en la forma de la estructura del pavimento. Es importante resaltar que, los valores mínimos de deflexión se sitúan alrededor de 1 mm, y la recuperación completa de la estructura no es apreciable dentro del área de influencia definida para este estudio.

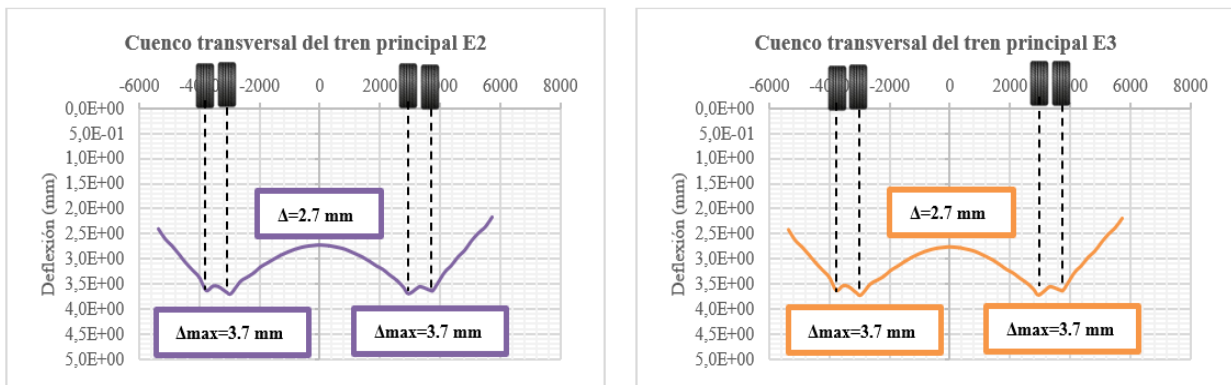


Figura 12. Cuenco transversal del tren principal

En cuanto a la representación gráfica del cuenco transversal del tren de principal (Ver Figura 12), denota una tendencia al aumento de la deformación del pavimento hasta la aplicación de la carga, llegando hasta un valor máximo de 3.7 mm en las ruedas internas del eje. Seguidamente, se presenta un punto de cambio de concavidad y vuelve a tener su valor máximo en la llanta interna del eje, donde comienza a tener una

disminución en la deflexión del pavimento hasta un valor mínimo de 2.7 mm y vuelve a comenzar el mismo comportamiento descrito inicialmente. Igual que en el cuenco del tren de nariz, no se alcanza a apreciar la recuperación total del pavimento, debido al área de influencia establecida.

Por otro lado, se observa un comportamiento semejante en ambos ejes del tren principal. Con el fin de corroborar esta similitud, se llevó a cabo una gráfica comparativa del tren de aterrizaje para identificar tanto las discrepancias como similitudes del tren de nariz y del tren principal.

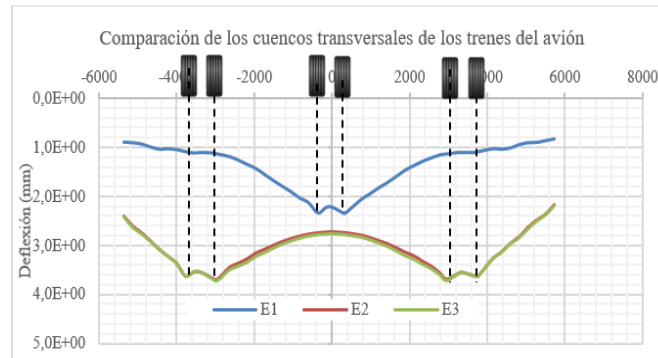


Figura 13. Comparación de los cuencos transversales del tren de aterrizaje.

La Figura 13 demuestra una clara homogeneidad tanto el comportamiento de los cuencos de los ejes del tren principal como en sus valores máximos posiblemente por la cercanía entre estos. Además, se observa una significativa diferencia entre el cuenco del tren principal y el tren de aterrizaje, coincidiendo en que los valores máximos están justamente ubicados en el punto de aplicación de las cargas. A partir de esta grafica se puede observar que, debido a la configuración y valores de las cargas por llanta, el eje tándem doble genera una afectación mayor al pavimento.

Cuencos longitudinales

El cuenco longitudinal se determinó para el tren de nariz y el tren principal teniendo en cuenta la rueda interna para el caso del tren principal, donde se encontraron los valores más críticos de la deflexión.

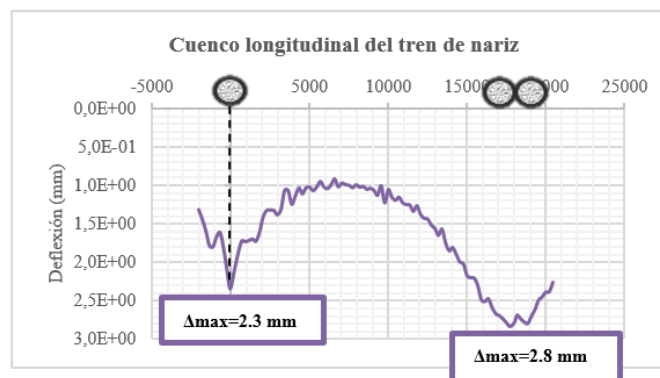


Figura 14. Cuenco longitudinal del tren de nariz

En base a la Figura 14 se establece un valor máximo de deflexión de 2.8 mm, ubicado en la proyección de la posición de las cargas asociadas al tren principal. Asimismo, se logra notar un pico importante en la deformación del pavimento justo debajo de la aplicación de la carga del tren de nariz alcanzando 2.3 mm. Como se puede observar, el comportamiento del cuenco no exhibe uniformidad en cuanto a la recuperación del pavimento, reflejándose en una serie de oscilaciones ascendentes después del paso del tren de nariz, y oscilaciones descendentes antes del paso del tren principal.

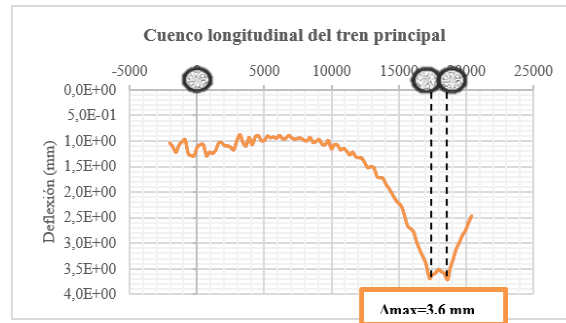


Figura 15. Cuenco longitudinal del tren principal

La Figura 15, por su parte revela un comportamiento cíclico con una amplitud considerable en la posición de la proyección del tren de nariz y valores máximos asociadas con la posición de las cargas del tren principal, alcanzando un valor de 3.6 mm. De la misma manera, el pavimento presenta mayormente oscilaciones descendentes de menor amplitud después del paso del tren de nariz y antes del tren principal.

Para poder observar claramente las diferencias entre los cuencos longitudinales de ambos trenes se realizó la siguiente gráfica comparativa.

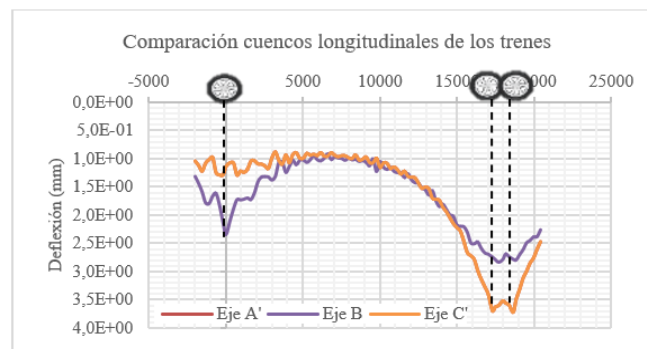


Figura 16. Comparación de los cuencos longitudinales del tren de aterrizaje.

En la comparación gráfica (Ver Figura 16) se puede establecer una clara influencia de un tren sobre el otro, a pesar de que no están ubicados en el mismo eje. Observando detenidamente la imagen, se puede determinar un impacto importante del tren principal sobre el tren de nariz, pero contrariamente, una influencia poco significativa del tren de nariz sobre el tren principal. Esto permite concluir que, desde cualquier perspectiva, el mayor daño al pavimento es generado por el tren principal debido al peso que este soporta.

Cuenco en planta y en 3 dimensiones- 3D

Para conocer el efecto completo de las cargas y distribución de los trenes sobre el pavimento se realiza un gráfico completo de la matriz de deflexiones con los datos obtenidos de los desplazamientos en cada punto de evaluación, representado en un plano en planta y en los cuencos en 3 dimensiones-3D.

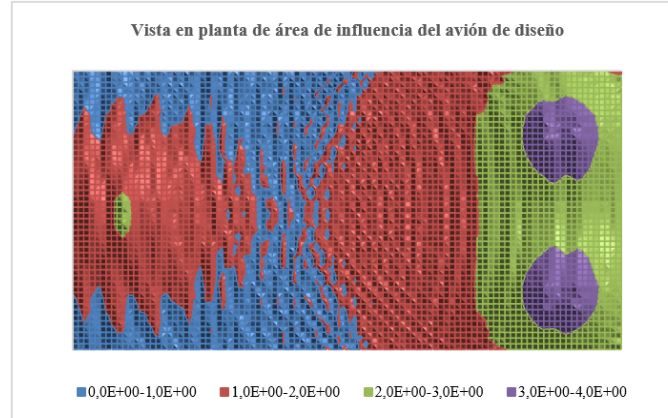


Figura 17. Vista en planta del área de influencia del avión

A partir de la Figura 17 se puede evidenciar el impacto del tren de aterrizaje del avión de diseño sobre la estructura de pavimento flexible propuesta. La figura muestra una incidencia importante del tren de nariz y aun mayor del tren principal. Además de esto, se puede notar el bulbo de presiones generado por ambas cargas y la recuperación del pavimento hasta cierto valor mínimo de desplazamiento desde su estado original, ya que como se describió anteriormente, no se logra evidenciar una recuperación total de este. También, se observa una intermitencia antes del área de influencia de la carga correspondiente al tren principal, asociado con las oscilaciones representadas anteriormente.

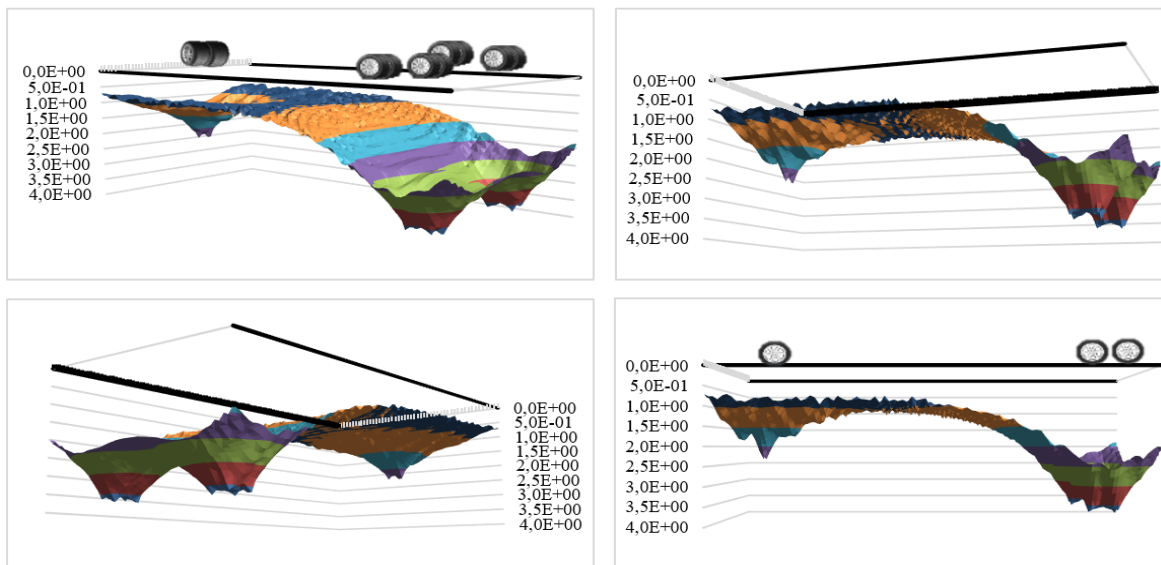


Figura 18. Cuencos en 3 dimensiones del avión de diseño en la estructura de pavimento flexible propuesta.

Como se puede observar en la Figura 18, se graficó la matriz teniendo en cuenta las coordenadas en X, Y y Z siendo X y Y coordenadas de posicionamiento y Z deflexiones dadas en milímetros. La imagen resalta la forma curva y gradual del cuenco de deflexión, notándose los puntos críticos y los menos críticos de la estructura durante el paso del avión seleccionado. Además, el cuenco posee un comportamiento ondulatorio persistente a lo largo del eje X en cada punto evaluado. Asimismo, se puede notar visualmente la magnitud y heterogeneidad entre el cuenco generado del tren de nariz y el tren principal teniendo en cuenta la distribución de la carga en los trenes y la configuración de estos. Por otro lado, se puede ver reflejada la afectación total del pavimento generada por el avión de diseño, no solamente en los puntos de aplicación de la carga, sino en el área de influencia total determinada en el presente estudio.

Conclusiones

La construcción y modelación del cuenco de deflexión permite determinar la incidencia y magnitud de una carga debido a su paso continuo sobre una estructura de pavimento, además a partir de él, se puede visualizar que al igual que en el caso de cuencos de deflexión producidos por otro tipo de vehículos o pavimentos para aeropuertos, la deflexión máxima se ve reflejada en el eje axial de la carga y esta deflexión describe cómo se comporta el sistema global del pavimento bajo la misma, pero no necesariamente como las capas individuales del pavimento van a resistir a la fatiga o la deformación permanente [7]; Adicionalmente, debido a la magnitud del eje tándem doble del tren de aterrizaje respecto al eje de nariz, el tren de aterrizaje produce mayor magnitud en su bulbo, pues esta carga es mayor, por lo que refleja mayor daño en el pavimento, lo que coincide con el estudio de H. Wang et. al (2018), quienes demuestran que en la configuración de tren de aterrizaje de 6 ruedas se presentan mayores respuestas en el pavimento [25]. Sin embargo, ambos trenes de aterrizaje representan una deflexión significativa para el pavimento teniendo valores de 2.3 mm para el tren de nariz y 3.7 mm para el tren de aterrizaje, valores correspondientes a los cuencos transversales anteriormente presentados, en donde también se pudo observar que los valores máximos se encontraron en la cara interna de los ejes para el caso del tren principal.

Las deflexiones producidas por un avión no solo tienen incidencia en la zona en donde se aplica la carga, pues la zona de influencia manifestada por la presión ejercida en el pavimento causa un efecto en las zonas aledañas e incluso alcanza a tener incidencia el tren de aterrizaje sobre el tren de nariz, demostrando ondulaciones en el pavimento y la importancia de considerar el comportamiento de las cargas para determinar la disipación de las mismas en una zona de estudio. Adicionalmente, se puede observar que por las características viscoelásticas o elásticas de los materiales utilizados en la estructura del pavimento este tiende a buscar la recuperación luego del paso de las cargas, lo que se representa en ondulaciones persistentes a lo largo del eje X en todo el cuenco de deflexiones de la zona de estudio analizada.

Para concluir, el análisis de las deflexiones producidas en un pavimento, se trata de una herramienta bastante significativa para la comprensión del comportamiento mecánico de una estructura de pavimento, de la misma forma a través de este análisis se pueden ofrecer criterios de rehabilitación, diseño o mantenimiento de un pavimento, que para el caso de los aeropuertos debe ofrecer un carácter de resistencia y seguridad significativo en las diversas zonas que componen la estructura de pavimento de un aeropuerto.

Referencias

[1] C. H. Higuera Sandoval, “Los cuencos de deflexión en estructuras de pavimentos flexibles”, *Revista*

Facultad de Ingeniería, vol. 15, núm. 20, pp. 30–35, 2006.

- [2] D. A. H. Rojas y C. H. H. Sandoval, “Cuencos de deflexión 3d en pavimento flexible”, *Ingenio Magno*, vol. 11, núm. 2, Art. núm. 2, 2020.
- [3] X. Jia, M. Woods, H. Gong, D. Zhu, W. Hu, y B. Huang, “Evaluation of influence of pavement data on measurement of deflection on asphalt surfaced pavements utilizing traffic speed deflection device”, *Construction and Building Materials*, vol. 270, p. 121842, feb. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121842.
- [4] C. H. H.- Sandoval, “Análisis de sensibilidad y correlación entre el ahuellamiento y la deflexión en estructuras de pavimento flexible”, *Respuestas*, vol. 28, núm. 2, Art. núm. 2, may 2023, doi: 10.22463/0122820X.3472.
- [5] C. H. Higuera, “Caracterización de los cuencos de deflexión en estructuras de pavimentos flexibles”, *Facultad de Ingeniería*, vol. 18, pp. 71–87, 2009.
- [6] E. Horak y S. Emery, “Evaluation of airport pavements with FWD deflection bowl parameter benchmarking methodology”.
- [7] F. Pigozzi, S. Portas, F. Maltinti, y M. Coni, “Analysis of Runway Deflectometer Campaign for Implementation on Airport Pavement Management System”, *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, vol. 15, dic. 2014, doi: 10.2478/ijpeat-2013-0009.
- [8] M. Souliman, S. Dessouky, y N. Bastola, “Expanding the Concept of Comprehensive Area Ratio Parameter to the South-Central States: Towards Simplifying the Structural Evaluation of Flexible Pavements at the Network Level”, *Publications*, dic. 2021, [En línea]. Disponible en: https://repository.lsu.edu/transet_pubs/119
- [9] G. White, “New Airport Pavement Technologies from the USA”, presentado en Australian Airport Association National Convention, Gold Coast, Australia, nov. 2014.
- [10] F. Pigozzi, M. Coni, S. Portas, y F. Maltinti, “Implementation of Deflection Bowl Measurements for Structural Evaluations at Network Level of Airport Pavement Management System”, presentado en 2014 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference Federal Aviation Administration Stockton College SRA International, Incorporated Applied Research Associates, Inc., 2014. Consultado: el 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://trid.trb.org/View/1322621>
- [11] C. Núñez et al., “Assessment of pavement deflection under vehicle loads using a 3D-DIC system in the field”, *Scientific Reports*, vol. 12, jun. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-13176-3.
- [12] R. L. Brockenbrough, *Highway engineering handbook: building and rehabilitating the infrastructure*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [13] J. Sun, G. Chai, E. Oh, y P. Bell, “A Review of PCN Determination of Airport Pavements Using

FWD/HWD Test”, *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 16, núm. 4, pp. 908–926, jul. 2023, doi: 10.1007/s42947-022-00170-1.

- [14] K. Gkyrtis, C. Plati, y A. Loizos, “Mechanistic Analysis of Asphalt Pavements in Support of Pavement Preservation Decision-Making”, *Infrastructures*, vol. 7, p. 61, abr. 2022, doi: 10.3390/infrastructures7050061.
- [15] Y. H. (Yang H. Huang, *Pavement analysis and design.*, 3a ed. Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [16] E. Kashi y G. Shafabakhsh, “Evaluation of aircraft wheel load on pavement damages by layered elastic method”, *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 24, nov. 2014, doi: 10.1177/1056789514562979.
- [17] T. Tamagusko, “Airport Pavement Design”, 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.19628.00640.
- [18] J. Sun, E. Oh, G. Chai, Z. Ma, D. E. L. Ong, y P. Bell, “A systematic review of structural design methods and nondestructive tests for airport pavements”, *Construction and Building Materials*, vol. 411, p. 134543, ene. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134543.
- [19] Federal Aviation Administration, “Airport Pavement Design and Evaluation”, U.S. Department of Transportation, AC No. 150/5320-6G, jul. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5320-6G-Pavement-Design.pdf
- [20] H. Jain y D. P. Purohit, “A study of an airfield pavement evaluation”, vol. 7, núm. 9, 2020.
- [21] Md. T. Miah, E. Oh, G. Chai, y P. Bell, “An overview of the airport pavement management systems (APMS)”, *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 13, núm. 6, pp. 581–590, nov. 2020, doi: 10.1007/s42947-020-6011-8.
- [22] J.-M. Simonin, V. L. Boursicaud, y P. Hornych, “Correction of deflection bowls measured by rolling devices using simple shape function”, *Transportation Engineering*, vol. 3, p. 100050, mar. 2021, doi: 10.1016/j.treng.2021.100050.
- [23] J. R. Quintero González, “Metodología de la administración federal de aviación para el diseño de estructuras de pavimento flexible para aeropuertos”, *Ingenio Magno*, vol. 1, núm. 1, Art. núm. 1, 2010, Consultado: el 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/13>
- [24] C. H. Higuera Sandoval, *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*, 1a ed., vol. 1. Tunja (Colombia): Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2010.
- [25] H. Wang, M. Li, N. Garg, y J. Zhao, “Multi-Wheel Gear Loading Effect on Load-Induced Failure Potential of Airfield Flexible Pavement”, *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, pp. 805–816, jun. 2020, doi: 10.1080/10298436.2018.1511783.