



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DE AQUINO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTAR PAVIMENTOS DE
ADOQUÍN EN CALLES DE RODAJE Y PLATAFORMAS DE AEROPUERTOS
REGIONALES EN COLOMBIA

PRESENTA:

JUAN SEBASTIAN TOLE GONZALEZ

2348747

BOGOTÁ

2025



ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTAR PAVIMENTOS DE
ADOQUÍN EN CALLES DE RODAJE Y PLATAFORMAS DE AEROPUERTOS
REGIONALES EN COLOMBIA.

PRESENTA:

JUAN SEBASTIAN TOLE GONZALEZ

2348747

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2025

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, agradezco a **Dios**, por ser mi fuente inagotable de fortaleza y esperanza, y por permitirme alcanzar la meta de culminar mis estudios. Gracias por guiarme en este camino, dándome la fuerza para superar cada desafío y la sabiduría para continuar adelante. Este logro es también una forma de honrar a mi familia, y a través de ellos, seguir siendo un motivo de orgullo y gratitud.

Quiero también recordar con profundo cariño a mi **abuelo, Miguel González Ramírez**, quien, aunque ya no está físicamente, lo he sentido siempre a mi lado, guiando cada paso que he dado. Su presencia en mi vida ha sido un faro de inspiración, y le agradezco por estar conmigo espiritualmente durante este proceso, brindándome la fuerza y la serenidad necesarias para lograr mis metas.

Asimismo, agradezco a mi **abuelo Jorge Niño**, quien siempre me apoyó, me aconsejó y, con su cariño, me inspiró a seguir adelante. Él me enseñó el valor de la educación y me motivó a caminar por este camino, brindándome su paciencia y amor incondicional en cada momento. Su ejemplo ha sido un pilar fundamental en mi vida, y su apoyo ha sido clave para que hoy pueda alcanzar este logro.

Le agradezco a mi padre, **Óscar Darío Niño**, por brindarme su apoyo incondicional y ser siempre un ejemplo de fuerza, perseverancia y determinación. Su constante motivación para que siga adelante, incluso en los momentos más difíciles, ha sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mis metas. Gracias por recordarme cada día la importancia de la educación y por

enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la dedicación son las claves del éxito. Sin su guía y apoyo, este logro no hubiera sido posible.

Le agradezco a mi tío, **Edgar Eduardo Niño**, por su constante apoyo en mi proceso de crecimiento personal y profesional. Ha sido una guía invaluable, acompañándome en cada paso que he dado, día a día, con su presencia y sabios consejos. Su ejemplo de vida profesional y sus enseñanzas me han ayudado a tomar decisiones acertadas y a seguir adelante con determinación, recordándome siempre la importancia de ser una mejor persona y alcanzar mis metas. Su apoyo incondicional ha sido clave en mi desarrollo, y por ello le estoy profundamente agradecido.

A la **Universidad Santo Tomás**, mi más sincero agradecimiento por permitirme ser parte de esta honorable institución, que me ha brindado la oportunidad de crecer no solo académicamente, sino también como persona. A los docentes, a quienes tuve el privilegio de tener como guías, les agradezco por compartir su conocimiento y por enriquecerme con sabiduría, formando en mí valores que perdurarán más allá de las aulas.

Un agradecimiento especial al **Ingeniero Juan Miguel Sánchez Durán**, cuya experiencia y dedicación en el campo de los pavimentos han sido una fuente invaluable de conocimiento y orientación durante el desarrollo de este trabajo. Su habilidad para transmitir su extenso conocimiento técnico, así como su compromiso con la excelencia académica, no solo han enriquecido este proyecto, sino que también me han inspirado a seguir perfeccionando mis habilidades en la ingeniería civil. Por todo ello, le estaré siempre profundamente agradecido.

Este triunfo se lo dedico, ante todo, a mi **familia**, que ha sido mi mayor pilar en cada paso de este camino. A ustedes, por estar presentes en cada momento, por cada consejo valioso que me dieron y por brindarme la fortaleza para seguir adelante. Sin su amor y apoyo, no habría llegado

hasta aquí. Su influencia ha sido esencial para formarme, no solo como profesional, sino también como persona.

A mis **padres** y a mi **abuela Vicky**, les dedico este logro con todo mi corazón. Gracias por darme la oportunidad de perseguir mis sueños, por ser un ejemplo constante de esfuerzo y dedicación, y por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles. Ustedes me ofrecieron su fuerza cuando más la necesitaba, y sus palabras de aliento fueron mi guía en los momentos de mayor incertidumbre. Sin su fe en mí, este objetivo de culminar mis estudios nunca habría sido posible. Este triunfo es tanto suyo como mío, y les estaré eternamente agradecido.

Nota de aceptación

Firma del director del proyecto Ing. Juan Miguel Sánchez Duran

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Bogotá, 26 de marzo de 2025

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	JUSTIFICACIÓN	9
4.	OBJETIVOS	1
5.	ALCANCE.....	2
6.	METODOLOGÍA	3
7.	MARCO TEÓRICO.....	1
8.	PAVIMENTOS DE ADOQUÍN.....	3
9.	CEMENTO	6
10.	USO DE ADITIVOS EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN. ..	11
11.	PROCESO DE ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN.....	12
12.	DOSIFICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN.....	14
13.	PROCESO DE MOLDEADO DE ADOQUINES DE CONCRETO.....	17
14.	PROCESO DE SECADO DE ADOQUINES DE CONCRETO.....	17
15.	PROCESO DE CURADO EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO	19
16.	RESISTENCIA A COMBUSTIBLES Y QUÍMICOS	22
17.	FACTORES CLAVE PARA LA RESISTENCIA	23
18.	CAPACIDAD PARA SOPORTAR CARGAS ESTÁTICAS	24
19.	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	26
20.	CONFORT DE MARCHA EN PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE HORMIGÓN ..	27
21.	CONSIDERACIONES GENERALES.....	27

22.	RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL CONFORT DE MARCHA.....	28
23.	TIPOS DE MARCACIONES DEL PAVIMENTO.....	29
24.	SÍMBOLOS Y TEXTO	30
25.	CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE MARCACIONES.....	31
26.	CONSTRUCTIBILIDAD.....	32
27.	EJEMPLO PRÁCTICO DE CONSTRUCTIBILIDAD	34
28.	MANTENIMIENTO Y REINSTALACIÓN DE PAVIMENTOS DE BLOQUES DE CONCRETO.....	34
29.	MANTENIMIENTO.....	34
30.	CONSIDERACIONES CLIMÁTICAS.....	37
31.	COMPORTAMIENTO DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO A ALTAS TEMPERATURAS.....	38
32.	FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A MOVIMIENTOS TÉRMICOS ..	43
33.	USO EN ÁREAS PROPENSAS A ASENTAMIENTOS	44
34.	INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	46
35.	MANTENIMIENTO.....	47
36.	RENTABILIDAD DE LOS ADOQUINES PERMEABLES EN PAVIMENTOS DE AEROPUERTOS.....	48
37.	ANÁLISIS DE COSTOS DE CICLO DE VIDA.....	49
38.	RENTABILIDAD DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO.....	50
39.	DURABILIDAD Y MANTENIMIENTO.....	51
40.	BENEFICIOS ECONÓMICOS	51
41.	RENTABILIDAD DE LOS PAVIMENTOS PERMEABLES	52

42.	REQUISITOS DE MATERIAL Y ESTRUCTURA DE LA BASE	54
43.	NORMA ASTM C936:.....	55
44.	REQUISITOS DE MATERIAL Y FABRICACIÓN	55
45.	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	56
46.	DIMENSIONES Y TOLERANCIAS.....	56
47.	DATOS DE LAS AERONAVES	58
48.	CRITERIOS DE DISEÑO	59
49.	EJEMPLO DE DISEÑO	60
50.	EVALUACIÓN DEL SUBSUELO.....	61
51.	ANÁLISIS DEL TRÁFICO DE AERONAVES	62
52.	CONSTRUCCIÓN REQUERIDA	62
53.	EXPERIENCIA PREVIA EN AEROPUERTOS	64
54.	PRINCIPIOS DEL DISEÑO ELÁSTICO EN CAPAS.....	68
55.	MATERIALES Y PROPIEDADES:	68
56.	INSTALACIÓN DE LOS ADOQUINES:	70
57.	DISEÑO ESTRUCTURAL PARA PAVIMENTO DE AERONAVES LIGERAS.	71
58.	CRITERIOS DE DISEÑO	71
59.	MÉTODOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL.....	72
60.	SELECCIÓN DE MATERIALES PARA LA BASE Y SUBBASE.....	73
61.	COMPORTAMIENTO OPERACIONAL Y MANTENIMIENTO.....	74
62.	EXPERIENCIAS NACIONALES.....	75
63.	EXPERIENCIAS EN OTROS AEROPUERTOS REGIONALES	77
64.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	80

65.	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	81
66.	PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS	82
67.	EXPERIENCIAS INTERNACIONALES.....	84
68.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS.....	85
69.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
70.	ANÁLISIS ECONÓMICO.	92
71.	ANÁLISIS DE VARIACIONES ECONÓMICAS SEGÚN LA ZONA.....	106
72.	CÁLCULO DE COSTOS TOTALES PARA 1.000 M ² DE PAVIMENTACIÓN	106
73.	ESTIMACIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO PARA 10, 20 Y 30 AÑOS	108
74.	COMPARACIÓN	108
75.	SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRUCTURA DEL SUELO PARA EL AERÓDROMO DE ARARACUARA	109
76.	ANÁLISIS DE COSTOS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO	111
77.	CONCLUSIONES	115
78.	GLOSARIO	117
79.	ANEXOS.	130
80.	BIBLIOGRAFÍA	131

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura aeroportuaria y aeródromos juegan un papel crucial en el desarrollo económico y la conectividad de un país y regiones, actuando como una puerta de entrada y salida para el transporte de pasajeros, mercancías y turismo. En el contexto colombiano, los aeropuertos regionales son pilares fundamentales para facilitar el acceso a áreas geográficamente remotas de nuestro país, promover el turismo y el comercio, así como aumentar el desarrollo socioeconómico de las comunidades locales y de muy poco acceso, sin embargo, la eficiencia y funcionalidad de estos aeródromos dependen en gran medida de la calidad y sostenibilidad de su infraestructura vial, particularmente de la pavimentación de calles de rodaje y plataformas. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

A través de la **PRÁCTICA EMPRESARIAL** realizada en la **AERONAUTICA CIVIL DE COLOMBIA** se identificó que el mantenimiento de pavimentos de asfalto representa una carga económica significativa, lo que llevó a explorar alternativas más económicas y sostenibles. Durante esta práctica, se realizaron **encuestas y entrevistas** con los encargados de mantenimiento, y se **analizaron los costos y la durabilidad de diferentes tipos de pavimento**, incluyendo el adoquín, el cual ha demostrado ser una opción viable para reducir los **costos operativos a largo plazo**. Los resultados de esta monografía (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023), basados en la recopilación de datos durante la práctica empresarial, sugieren que el adoquín podría ser una **alternativa más duradera y económica** en comparación con el asfalto. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

La pavimentación de calles de rodaje y plataformas en aeropuertos regionales en Colombia es una tarea que enfrenta desafíos significativos debido a la complejidad operativa y logística ante

estas instalaciones. La elección del material de pavimentación adecuado es importante para garantizar la seguridad operativa, la eficiencia y la durabilidad de la infraestructura aeroportuaria en estas ubicaciones estratégicas y remotas. En este contexto, surge la pregunta sobre la factibilidad de implementar pavimentos de adoquín como una alternativa viable y eficiente para calles de rodaje y plataformas en aeropuertos regionales colombianos. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

La implementación de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales representa un enfoque innovador que puede ofrecer una serie de ventajas potenciales en comparación con las opciones tradicionales de pavimentación. Los adoquines, conocidos por su durabilidad, versatilidad y facilidad de mantenimiento, han sido ampliamente utilizados en proyectos de pavimentación en entornos urbanos y rurales en todo el mundo, sin embargo, su aplicación en el contexto aeroportuario plantea desafíos específicos que deben ser evaluados de manera integral. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

El presente estudio se propone analizar en detalle la factibilidad, económica y operativa de utilizar adoquines como material de pavimentación para calles de rodaje y plataformas en aeropuertos regionales en Colombia. **A través de la práctica empresarial**, se pretende identificar y evaluar los requerimientos de viabilidad, los costos asociados y las implicaciones operativas de esta alternativa en comparación con las opciones tradicionales de pavimentación. Además, se busca determinar si la implementación de pavimentos de adoquín es una opción viable y eficiente en términos operativos y económicos para los aeropuertos regionales colombianos, especialmente aquellos ubicados en áreas remotas y de menor escala que enfrentan desafíos adicionales de logística y mantenimiento, en última instancia, se espera que los resultados de este estudio proporcionen información valiosa y perspectivas fundamentadas que puedan orientar la toma de

decisiones de los responsables de la planificación y gestión de la infraestructura aeroportuaria en Colombia, así como contribuir al desarrollo sostenible y la eficiencia operativa de los aeropuertos regionales en el país. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

Como parte de esta **monografía**, se incorporan **datos obtenidos durante mi práctica empresarial** en la **Aerocivil**, donde se realizaron **encuestas** a los encargados de mantenimiento para evaluar **la durabilidad de los pavimentos de adoquín y asfalto**, así como el impacto **económico del mantenimiento** a largo plazo.

2. JUSTIFICACIÓN

La infraestructura de pavimentación en los aeropuertos regionales de Colombia es un área crítica que impacta directamente en la operatividad, la sostenibilidad económica y la seguridad de estas instalaciones. Los **altos costos de mantenimiento del asfalto y concreto**, un material comúnmente utilizado en las **calles de rodaje y plataformas**, han generado un desafío continuo para los **aeropuertos regionales**, especialmente en aquellas zonas de difícil acceso, donde las reparaciones prolongadas afectan la **eficiencia operativa** y la conectividad aérea. Esta situación ha sido identificada como un problema crucial durante mi **práctica empresarial** en la **Aeronáutica civil de Colombia**, donde se **realizaron encuestas** y análisis directos sobre el estado de los pavimentos y las **necesidades de mantenimiento**. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

2.1.Limitaciones Logísticas y Geográficas:

La ubicación geográfica de muchos aeropuertos regionales en Colombia, a menudo en zonas remotas o de difícil acceso, impone desafíos logísticos significativos en términos de suministro de materiales y equipo, así como en la movilización de personal especializado. Esta situación puede resultar en retrasos en la ejecución de proyectos de pavimentación y en un aumento de los costos operativos, lo que afecta la eficiencia y la rentabilidad de estas infraestructuras críticas. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

La implementación de pavimentos de adoquín podría ofrecer una solución a estos desafíos logísticos al reducir la dependencia de materiales voluminosos y equipos especializados. El modularidad de los adoquines facilita su transporte y manipulación, lo que puede agilizar los

procesos de construcción y mantenimiento en aeropuertos regionales, especialmente en aquellos ubicados en áreas remotas.

2.2.Escasez de Personal y Equipos Especializados:

La falta de personal altamente calificado y de equipos especializados en regiones remotas puede obstaculizar la implementación y el mantenimiento efectivo de pavimentos convencionales en aeropuertos regionales. La escasez de recursos humanos y técnicos puede resultar en demoras en la ejecución de proyectos, así como en una calidad deficiente de las intervenciones realizadas, lo que a su vez puede comprometer la seguridad operativa y la durabilidad de la infraestructura.

La implementación de pavimentos de adoquín podría mitigar esta problemática al requerir menos personal altamente especializado y equipos técnicos avanzados para su instalación y mantenimiento. La naturaleza modular de los adoquines facilita su colocación y reparación, lo que puede reducir la dependencia de mano de obra altamente especializada y acelerar los procesos de mantenimiento y rehabilitación. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

2.3.Sostenibilidad y Durabilidad:

La sostenibilidad y durabilidad de la infraestructura aeroportuaria son aspectos fundamentales para garantizar su funcionalidad a largo plazo y minimizar los costos asociados con el mantenimiento y la rehabilitación. Los materiales de pavimentación deben ser capaces de resistir las condiciones climáticas adversas, el tráfico intenso y el desgaste constante sin comprometer la seguridad operativa ni la experiencia del usuario, la implementación de pavimentos de adoquín puede ofrecer ventajas en términos de sostenibilidad y durabilidad debido a su capacidad para

resistir el desgaste, absorber cargas y adaptarse a las fluctuaciones del terreno. Los adoquines bien mantenidos pueden tener una vida útil prolongada en comparación con los materiales de pavimentación convencionales, lo que puede resultar en ahorros significativos en costos de mantenimiento y rehabilitación a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

2.4.Contribución al Desarrollo Sostenible:

La implementación de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales en Colombia no solo tiene el potencial de abordar los desafíos logísticos, de mano de obra y de sostenibilidad asociados con la pavimentación convencional, sino que también puede contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades locales y regionales. La reducción de los costos operativos y de mantenimiento puede liberar recursos que pueden reinvertir en iniciativas de desarrollo económico y social, mientras que la durabilidad y la resistencia de los adoquines pueden garantizar la funcionalidad y la seguridad de la infraestructura a largo plazo. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

4. OBJETIVOS

4.1.OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad económica y operativa del adoquín como pavimento para las calles de rodaje y plataformas en aeropuertos regionales en Colombia, comparando sus ventajas y desventajas con otros materiales de pavimentación, como el asfalto y concreto rígido.

4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comparar los costos de pavimentación entre adoquín y asfalto, evaluando tanto los costos iniciales como los costos de mantenimiento a largo plazo.

Analizar la durabilidad de los pavimentos de adoquín y asfalto, en términos de su capacidad para soportar las cargas dinámicas y condiciones climáticas extremas, basándose en los datos obtenidos durante la práctica empresarial.

Evaluar la viabilidad económica del adoquín en términos de mantenimiento y operatividad a largo plazo, considerando los costos de reparación, la durabilidad y la facilidad de mantenimiento.

Establecer las preferencias operativas de los encargados de mantenimiento e infraestructura en aeropuertos regionales, para determinar qué tipo de pavimento consideran más adecuado desde el punto de vista de facilidad de mantenimiento, costo y durabilidad.

5. ALCANCE

Evaluar la factibilidad y viabilidad, económica y operativa de utilizar adoquines como material de pavimentación para calles de rodaje y plataformas en aeropuertos regionales en Colombia. De acuerdo a lo aprendido en la práctica empresarial. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

Análisis Económico:

Se llevará a cabo una comparación de los costos asociados con la implementación de pavimentos de adoquín en comparación con las opciones tradicionales de pavimentación utilizadas en aeropuertos regionales. Esto incluirá la evaluación de los costos de materiales, mano de obra y mantenimiento a largo plazo. Asimismo, se investigará la disponibilidad de recursos locales necesarios para la construcción y mantenimiento de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales. (INVIAS, 2025) (HUMANO, 2025) (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

5.1.Comparación de Rendimiento Operativo:

Se realizará una comparación del rendimiento operativo de los pavimentos de adoquín con las opciones tradicionales en términos de **durabilidad, eficiencia y resistencia** para el tráfico aéreo y terrestre en aeropuertos regionales.

5.2.Identificación de Desafíos y Riesgos:

Se identificarán los posibles desafíos y riesgos asociados con la implementación de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales y se propondrán estrategias de mitigación para abordar estas cuestiones de manera eficiente y operativa.

6. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación se basa en los datos obtenidos a través de la práctica empresarial realizada en la Aeronáutica civil de Colombia. El objetivo principal de la metodología es obtener información relevante sobre la viabilidad del adoquín como pavimento para las calles de rodaje y plataformas en aeropuertos regionales. Esta información se recopiló utilizando diversos métodos, incluyendo encuestas, entrevistas y observaciones directas. Los datos obtenidos fueron utilizados para analizar los costos y mantenimiento de los pavimentos, con un enfoque en los aspectos económicos y operativos.

6.1. *Revisión de la Literatura:*

Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente relacionada con la pavimentación de calles de rodaje y plataformas en aeropuertos regionales, así como con el uso de adoquines como material de pavimentación. Esta revisión abarca estudios en la Aerocivil y libros e informes de investigación, normativas y mejores prácticas tanto a nivel nacional como internacional. El objetivo de esta fase es establecer un marco teórico sólido y comprender el estado actual del conocimiento en el área de estudio.

6.2. *Análisis Económico:*

Se realizará un análisis económico detallado para evaluar los costos asociados con la implementación de pavimentos de adoquín en comparación con las opciones tradicionales de pavimentación. Esto incluirá la estimación de los costos de materiales, mano de obra y equipos, así como la proyección de los costos de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura. Se utilizarán técnicas de análisis financiero y económico para determinar la viabilidad económica de la implementación de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

6.3. *Comparación de Rendimiento Operativo:*

Con base en la experiencia e información en la Aerocivil y el autor (D. & McQueen, 2020) se llevará a cabo una comparación detallada del rendimiento operativo de los pavimentos de adoquín con las opciones tradicionales en términos de seguridad, eficiencia y comodidad para el tráfico aéreo y terrestre en aeropuertos regionales.

6.4. *Identificación de Desafíos y Riesgos:*

Con base en la información de la práctica empresarial y el autor (BENAVIDES, 2015) se identificarán posibles desafíos y riesgos asociados con la implementación de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales, y se propondrán estrategias de mitigación. Esto implica la evaluación de factores como la resistencia estructural de los adoquines, la compatibilidad con los sistemas de drenaje y servicios auxiliares, y la disponibilidad de recursos humanos para la construcción y mantenimiento de los pavimentos.

6.5. Validación y Análisis de Resultados:

Finalmente, se validarán y analizarán los resultados obtenidos a través de un proceso de revisión por pares y consultas e entrevistas con expertos en el campo de la ingeniería civil y aeroportuaria. Se identificarán las implicaciones prácticas y las recomendaciones para la implementación de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales en Colombia, y se presentarán en un informe final que resuma los hallazgos del estudio.

7. MARCO TEÓRICO

Los aeropuertos regionales son infraestructuras clave en el transporte aéreo, especialmente en países como Colombia, donde las distancias y la conectividad son esenciales para el desarrollo económico. Los pavimentos utilizados en las calles de rodaje, plataformas y pistas de aterrizaje deben cumplir con altos estándares de resistencia y durabilidad. El mantenimiento constante de estas infraestructuras es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia operativa. En este sentido, los pavimentos deben ser capaces de soportar el tráfico pesado de aeronaves y vehículos, las condiciones climáticas extremas y el desgaste constante. El asfalto ha sido tradicionalmente utilizado debido a su bajo costo inicial, pero presenta desventajas en términos de mantenimiento a largo plazo. El adoquín, por otro lado, se presenta como una alternativa más duradera y económicamente sostenible a largo plazo. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

Como menciona (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017) (FIERRO, 2014) los adoquines son unidades modulares prefabricadas, generalmente hechas de concreto, que se ensamblan sobre una base de arena y grava, su diseño modular permite una distribución uniforme de las cargas, lo que resulta en una mayor resistencia a la compresión y una mejor adaptabilidad a los movimientos del suelo.

Desde el punto de vista analítico, los pavimentos de adoquín ofrecen varias ventajas; su diseño modular facilita la reparación y el reemplazo de unidades dañadas, lo que reduce los tiempos de inactividad y los costos de mantenimiento. Además, su superficie porosa permite un drenaje eficiente del agua, lo que minimiza el riesgo de acumulación de charcos y reduce el

potencial de deterioro causado por la humedad. Estas características hacen que los pavimentos de adoquín sean especialmente adecuados para su uso en aeropuertos regionales, donde las condiciones climáticas y las limitaciones presupuestarias pueden representar desafíos adicionales para la pavimentación convencional, numerosos estudios y casos de éxito respaldan la eficacia de los pavimentos de adoquín en aeropuertos y otras infraestructuras similares ejemplos de su implementación exitosa se encuentran en diferentes partes del mundo, donde han demostrado su capacidad para soportar cargas pesadas, resistir condiciones climáticas extremas y mantener su integridad estructural a lo largo del tiempo. Estos casos proporcionan evidencia sólida de la viabilidad y eficacia de los pavimentos de adoquín en entornos aeroportuarios, respaldando su consideración como una opción viable para aeropuertos regionales en Colombia.

(PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

8. PAVIMENTOS DE ADOQUÍN.

8.1.Historia del adoquín.

De acuerdo con (FIERRO, 2014) la historia de los adoquines está vinculada al desarrollo de las vías urbanas a lo largo del tiempo. En la Antigua Roma, se empleaban bloques de piedra para crear calzadas lisas que facilitaran el tránsito rápido y cómodo. Los primeros adoquines usados en áreas urbanas fueron de piedra, madera y cerámica. En ese entonces, la preocupación principal era la superficie de las vías, sin embargo, con el aumento del tráfico y el peso de los vehículos, se empezó a prestar atención a la estructura subyacente, como la base, sub-base y explanada.

La llegada del concreto como material de construcción trajo consigo los adoquines prefabricados. Estos adoquines de concreto, surgidos a finales del siglo XIX, demostraron ser más económicos que los de piedra, esto impulsó su popularidad en la industria de la construcción.

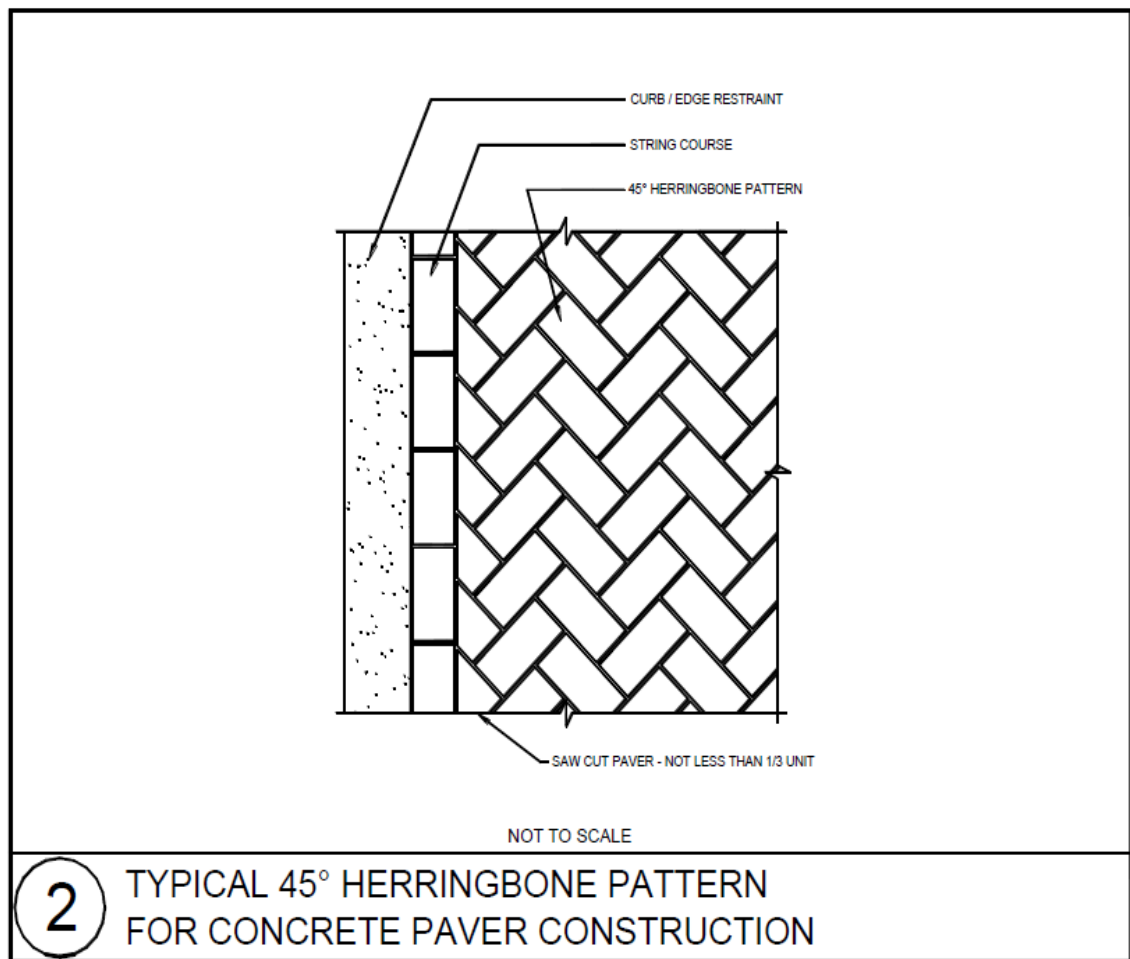
Como sostiene (FIERRO, 2014) en los años 70, la producción de adoquines se expandió, lo que llevó a la introducción de diferentes métodos de fabricación, una variedad de diseños y, lo más importante, una reducción en los costos tanto de fabricación como de instalación de estos elementos.

8.2.Materia Prima

En la fabricación de adoquines, es fundamental tener en cuenta ciertas normas y procesos para la materia prima utilizada, como el cemento, los agregados y el agua, la materia prima para la fabricación de adoquines de hormigón debe cumplir con requisitos específicos de resistencia, absorción, dimensiones y resistencia a la abrasión. (FIERRO, 2014)

FIGURA 1

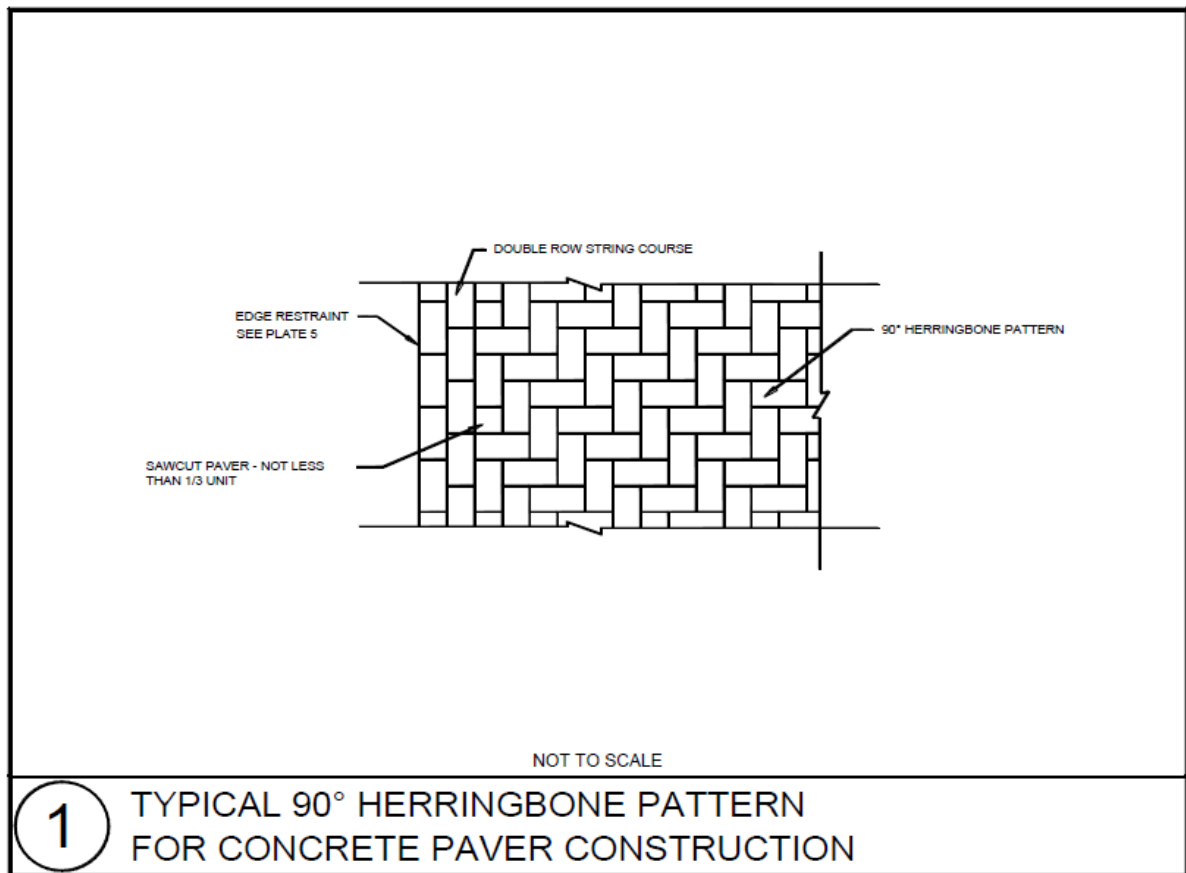
ESTRUCTURA DE ADOQUIN.



Nota: Una superficie con adoquines es un área de carga estable que transfiere sus cargas individualmente. (McQueen, 2012)

Figura 2

ESTRUCTURA DE ADOQUIN 90°.



Nota: La superficie adoquinada, en general, debe formar un entrabe, de manera que se puedan transferir muy eficazmente las cargas verticales y horizontales que se apliquen sobre ella, básicamente, por la circulación de vehículos. (McQueen, 2012)

9. CEMENTO

Como sostiene (FIERRO, 2014) el cemento Portland es la materia prima esencial en la construcción de pavimentos de concreto. Se combina con agregados como arena y grava, y agua para formar una mezcla homogénea que se vierte y compacta para crear la superficie del pavimento. El documento proporciona especificaciones detalladas sobre la entrega, almacenamiento, manejo e instalación de adoquines de concreto, incluyendo un plan de control de calidad que abarca elementos como diseño de mezcla, proporciones y colocación de arena de base. Además, se destaca su resistencia a altas temperaturas y movimientos térmicos, así como su capacidad para acelerar el derretimiento de nieve y hielo.

El cemento Portland es un tipo de cemento hidráulico que se utiliza ampliamente en la construcción de pavimentos de concreto debido a su capacidad de fraguar y endurecer mediante una reacción química con el agua. Está compuesto principalmente de silicatos y aluminatos de calcio, y su resistencia y durabilidad lo hacen ideal para soportar cargas pesadas y resistir condiciones climáticas adversas. (FIERRO, 2014)

Además, se recomienda un adecuado almacenamiento del cemento y de los materiales agregados utilizados en la fabricación de adoquines, manteniéndolos en lugares cubiertos para evitar la saturación de humedad, polvos o residuos que puedan alterar sus características. Tal y como expone (TRANSPORTE, 2022) los agregados gruesos deben cumplir con requisitos específicos de resistencia y desgaste, y en caso de no cumplir con la normativa, se pueden utilizar siempre y cuando el proveedor demuestre un desempeño satisfactorio en la resistencia del concreto elaborado con esos áridos de la misma fuente. Es importante almacenar los agregados en sitios limpios y separados, libres de residuos y materias orgánicas.

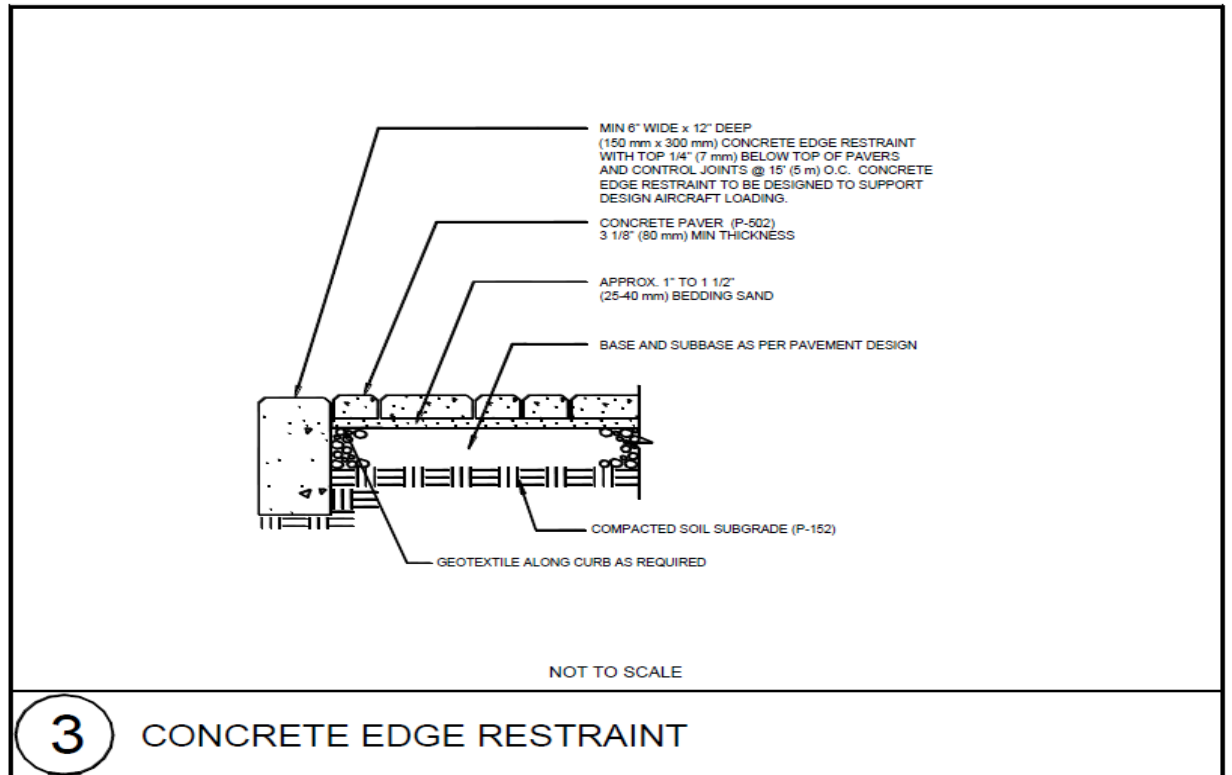
9.1.ÁRIDOS.

Los estudios han demostrado que el uso de agregados reciclados de hormigón y material triturado de desechos de ladrillos, así como el uso de cenizas volantes en la fabricación de adoquines de hormigón, pueden ser beneficiosos para mejorar la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental de la producción de adoquines. En el análisis de (FIERRO, 2014) la incorporación de estos materiales alternativos no solo contribuye a la reutilización de residuos, sino que también puede mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de los adoquines, resultando en una mayor resistencia a la compresión y una menor absorción de agua.

Además, la selección adecuada de áridos para la fabricación de adoquines de hormigón es crucial para garantizar la resistencia y durabilidad del producto final. La granulometría, forma y calidad de los áridos utilizados pueden influir en la resistencia a la compresión, absorción de agua y resistencia a la abrasión de los adoquines. Por lo tanto, es importante realizar pruebas y análisis de los áridos antes de su incorporación en la mezcla de hormigón para asegurar que cumplan con los estándares de calidad requeridos. Los áridos utilizados en la fabricación de adoquines deben cumplir con la Norma INEN 872 o NTE en Colombia, en este sentido (BENAVIDES, 2015) hace referencia a que los Áridos para hormigón ocupan del 70 al 80% del volumen del concreto. Estos elementos son fundamentales para la resistencia a cargas, disminución de retracciones y mejora de la durabilidad del hormigón. Se recomienda un bodegaje adecuado para evitar la saturación de humedad, polvos o residuos que puedan alterar sus propiedades, almacenándolos en sitios limpios y separados de residuos y materias orgánicas.

Figura 3

ESTRUCTURA DE ADOQUIN INTERNA.



Nota: Cuanto mayor sea el espesor del adoquín es mucho más estable y duradero será el pavimento sometido a tráfico pesado. (McQueen, 2012)

9.2.CONTROL Y SELECCIÓN DE ÁRIDOS GRUESOS EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN.

El árido grueso utilizado en la fabricación de adoquines debe consistir en grava, grava triturada, piedra triturada o una combinación de estos, cumpliendo con los requisitos de la norma según (TRANSPORTE, 2022). Es fundamental que los agregados gruesos no tengan un porcentaje de desgaste mayor al 40% en el ensayo de abrasión de la Máquina de los Ángeles. Además, es importante almacenar los agregados gruesos en sitios limpios y separados de residuos y materias orgánicas para mantener sus propiedades intactas.

El tamaño y la forma de los agregados gruesos pueden influir significativamente en la resistencia y durabilidad de los pavimentos de adoquines. Se ha observado que los agregados gruesos angulares tienden a proporcionar una mayor resistencia al corte en comparación con los agregados redondeados, lo que puede contribuir a una mayor estabilidad y durabilidad de los adoquines. La selección adecuada de los agregados gruesos, considerando su forma y tamaño, es fundamental para garantizar la calidad y el rendimiento de los pavimentos de adoquines de hormigón. (BENAVIDES, 2015)

El agregado grueso, como la grava, se combina con cemento Portland y agua para formar una mezcla homogénea utilizada en la construcción de pavimentos de concreto. El agregado grueso debe cumplir con los requisitos de la norma ASTM C33 según (BENAVIDES, 2015), con excepción de los requisitos de gradación que se encuentran en la Tabla 1 de esta especificación.

Además, el agregado grueso no debe variar desde el límite superior en un tamiz hasta el límite inferior en el siguiente tamiz más grande.

Figura 4

REQUISITOS DE GRADACION DE ARENA DE LECHO

TABLE 1	
GRADING REQUIREMENTS FOR BEDDING SAND	
Sieve Size	Percent Passing
3/8 in. (9.5 mm)	100
No. 4 (4.75 mm)	95 to 100
No. 8 (2.36 mm)	80 to 100
No. 16 (1.18 mm)	50 to 85
No. 30 (0.600 mm)	25 to 60
No. 50 (0.300 mm)	10 to 30
No. 100 (0.150 mm)	2 to 10
No. 200 (0.075 mm)	0 to 2

Nota: Los requisitos de gradación para arena de lecho son esenciales para asegurar la adecuada estabilidad y compactación de los adoquines sobre la superficie especialmente en pavimentos sometidos a tránsito pesado. (McQueen, 2012)

9.3.USO Y CONTROL DEL AGUA EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN

Como expone (FIERRO, 2014) el agua utilizada en la fabricación de adoquines debe ser agua dulce y limpia, preferiblemente potable y libre de sustancias como aceites, ácidos, álcalis, sales y materia orgánica. Se recomienda mantenerla en recipientes limpios y tapados. En caso de no contar con agua potable, se deben realizar pruebas de resistencia con morteros preparados con agua no potable para garantizar un desempeño eficiente del concreto.

El agua se combina con cemento Portland y agregados como arena y grava para formar una mezcla homogénea utilizada en la construcción de pavimentos de concreto. El documento menciona que las condiciones del agua subterránea varían de buena a excelente, con niveles de agua subterránea que van desde casi nulos hasta ligeros. Mantener la calidad del agua utilizada es esencial para asegurar la resistencia y durabilidad de los adoquines de hormigón.

10. USO DE ADITIVOS EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN.

Como detalla (FIERRO, 2014) los aditivos en la fabricación de adoquines de hormigón pueden mejorar diversas propiedades del producto final, como la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del hormigón. Estudios han demostrado que la incorporación de aditivos como plastificantes, acelerantes, retardantes o fibras puede influir positivamente en las características del hormigón utilizado para la fabricación de adoquines. Estos aditivos pueden ser utilizados para aumentar la resistencia, densidad y reducir la probabilidad de eflorescencia. Su empleo contribuye a mejorar las propiedades del concreto y garantizar su durabilidad.

Figura 4

REQUISITOS DE GRADACION DE ARENA DE LECHO

In the United States, pavers are manufactured to the standards contained in ASTM C 936, "Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Concrete Paving Units." This standard requires:

- compressive strength of 8,000 psi (55 MPa)
- less than 5 percent absorption
- resistance to abrasion
- freeze-thaw durability
- close dimensional tolerances

Nota: En estados unidos la fabricación de adoquines de concreto se rige por lo estipulado en la norma ASTM C936 la cual establece criterios esenciales para garantizar la calidad y durabilidad de estos elementos en pavimentos.

11. PROCESO DE ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN

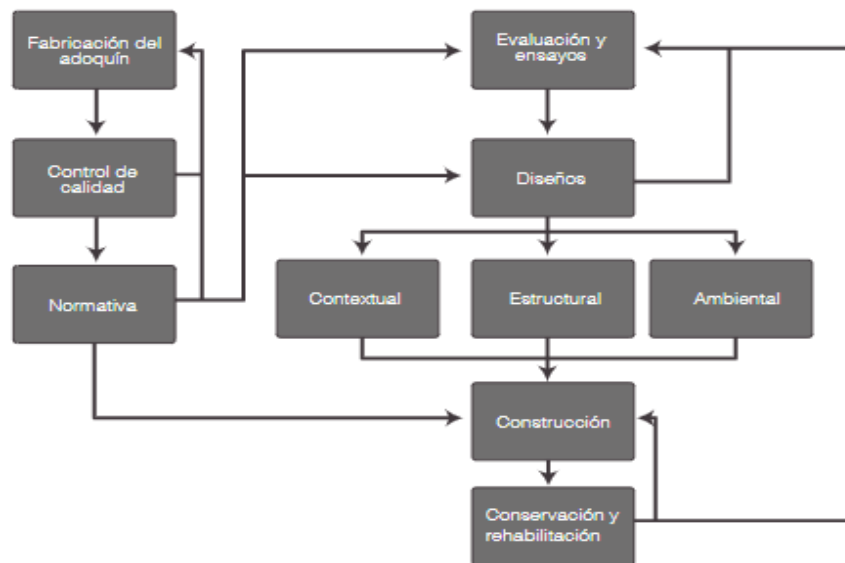
El proceso de elaboración de adoquines de concreto implica la combinación de cemento Portland, agregados finos y gruesos, y agua para formar una mezcla homogénea. Esta mezcla se vierte en moldes y se compacta bajo vibración y presión extrema para dar forma a los adoquines. Los adoquines son fabricados de acuerdo con las normas contenidas en ASTM C 936, que establece requisitos de resistencia a la compresión, absorción, resistencia a la abrasión, durabilidad ante ciclos de congelación y descongelación, y tolerancias dimensionales cercanas. (FIERRO, 2014)

El proceso de fabricación de adoquines de hormigón sigue las especificaciones detalladas en la norma ASTM C936, con modificaciones específicas incluidas en las secciones 502-4.1 y 502-4.2 de las especificaciones del libro (McQueen, 2012). Estas modificaciones aseguran que los

adoquines cumplan con los estrictos requisitos de calidad y rendimiento necesarios para su uso en pavimentos duraderos y resistentes.

Figura 5

PROCESO DE FABRICACION DE ADOQUIN.



Nota: El diagrama muestra el proceso integral de fabricación y mantenimiento de adoquines, asegurando calidad y durabilidad en cada etapa, desde la producción hasta la rehabilitación. (FIERRO, 2014)

12. DOSIFICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN

Como se observa en (FIERRO, 2014) el dosificado de materiales para la elaboración de adoquines de concreto implica mezclar cemento, arena, agregados finos y gruesos, y agua en proporciones específicas. Este proceso es fundamental para garantizar la calidad y durabilidad de los adoquines de concreto utilizados en pavimentos. Por ejemplo, para el concreto tipo DLC (Dry Lean Concrete), se establecen requisitos específicos como una relación máxima de agregado a cemento, resistencia a la compresión y densidad in situ mínima. Las relaciones básicas entre los componentes son establecidas previamente, pero la dosificación óptima se determina según las características de los materiales utilizados. Este proceso asegura que los adoquines cumplan con los estándares necesarios para su uso en pavimentos de alta resistencia y durabilidad, como los de aeropuertos en la visión de (D. & McQueen, 2020).

Figura 6

GRADACION DE AGREGADOS.

DRYLEAN CONCRETE AGGREGATE GRADING (All-in Aggregate)	
BS EN 933-2 Sieves (mm)	Percentage by mass passing
63	100
31.5	70-92
16	40-74
4	22-46
0.500	6-27
0.250	2-15
0.125	0

Nota: La tabla muestra la gradación de agregados para concreto seco, especificando los porcentajes de masa que deben pasar por diferentes tamices, lo cual es crucial para garantizar las propiedades óptimas del concreto, como su resistencia y durabilidad. (D. & McQueen, 2020)

**12.1. PROCESO DE MEZCLADO PARA LA FABRICACIÓN DE
ADOQUINES DE CONCRETO**

Una vez determinada la mezcla ideal para preparar el concreto, se procede a su fabricación mediante mezclado mecánico. Como plantea (FIERRO, 2014) este método es preferible sobre el mezclado manual, ya que garantiza una uniformidad adecuada del material y asegura resistencias óptimas.

El proceso comienza con la combinación en seco del cemento y los agregados en la mezcladora, asegurando una distribución uniforme del color. Luego se añade el agua y se mezcla durante aproximadamente 4 minutos a una velocidad de 20 revoluciones por minuto, gracias a un motor eléctrico, tambor circular y hélice.

Es esencial que el mezclado sea suficiente para cubrir completamente los áridos con la pasta de agua-cemento, asegurando así la calidad y durabilidad del concreto utilizado en los adoquines.

Figura 7

PROCESO DE MOLDEADO DE ADOQUINES DE CONCRETO



Nota: Este proceso consiste en verter la mezcla de cemento, agregados y agua en moldes, manteniendo una temperatura mínima de 5°C, seguida de vibro compactación para asegurar la resistencia del adoquín. “(ADOBE STOCK, 2024)”

13. PROCESO DE MOLDEADO DE ADOQUINES DE CONCRETO

Según los principios expuestos por (FIERRO, 2014) el proceso de moldeado de adoquines de concreto implica verter la mezcla homogénea de cemento Portland, agregados y agua en moldes específicos. Es crucial mantener una temperatura mínima de 5°C durante este proceso. Luego, los moldes se llevan a una máquina de vibro-compactación donde se vibran durante aproximadamente 12 segundos para lograr la compactación adecuada. Posteriormente, se retira el exceso de material y se compacta nuevamente hasta alcanzar la altura deseada del adoquín.

Este método asegura la formación precisa y la resistencia necesaria de cada adoquín, fundamental para la construcción de pavimentos duraderos y de alta calidad.

14. PROCESO DE SECADO DE ADOQUINES DE CONCRETO.

El proceso de secado de los adoquines es fundamental para asegurar su resistencia y durabilidad. Después de ser desmoldados, los adoquines se colocan en un área protegida del sol y el viento para evitar la evaporación rápida del agua contenida en ellos, lo cual podría comprometer su resistencia. Como puntualiza (FIERRO, 2014) se recomienda un tiempo de secado de entre 4 a 8 horas, aunque idealmente se deben levantar del tablero al día siguiente de su fabricación para asegurar un secado completo y uniforme.

El secado es una etapa crítica en la fabricación de adoquines de concreto. Tras el moldeado y la compactación en los moldes, los adoquines deben pasar por un proceso de curado que incluye un secado controlado. Durante este proceso, es esencial mantener condiciones adecuadas de temperatura y humedad para permitir que el concreto alcance la resistencia deseada y se eviten posibles fisuras o debilitamientos.

En este sentido (FIERRO, 2014) considera que el tiempo de secado puede variar según factores como la composición de la mezcla de hormigón, el tamaño y la forma de los adoquines, y las condiciones ambientales. Un secado apropiado asegura que los adoquines adquieran las propiedades mecánicas necesarias para resistir cargas y condiciones climáticas adversas, garantizando así la calidad y la longevidad de los pavimentos de concreto.

15. PROCESO DE CURADO EN LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO

El curado es un proceso fundamental en la fabricación de adoquines de concreto que asegura la resistencia y durabilidad del producto final. De acuerdo con el enfoque propuesto por (FIERRO, 2014) después del moldeado y compactación de la mezcla de concreto en los moldes, los adoquines deben pasar por un proceso de curado cuidadoso. Este proceso implica mantener condiciones controladas de temperatura y humedad durante un período específico.

Es crucial regar periódicamente los adoquines para mantener la humedad del concreto y permitir que la reacción química del cemento con el agua continúe. Esto es fundamental para alcanzar las resistencias deseadas y evitar la formación de grietas. Como refiere (FIERRO, 2014) se recomienda arrumar los adoquines con suficiente separación para asegurar que todos los lados se humedezcan de manera uniforme. Mantener una temperatura alrededor de 20°C ayuda a evitar la pérdida de humedad por evaporación prematura.

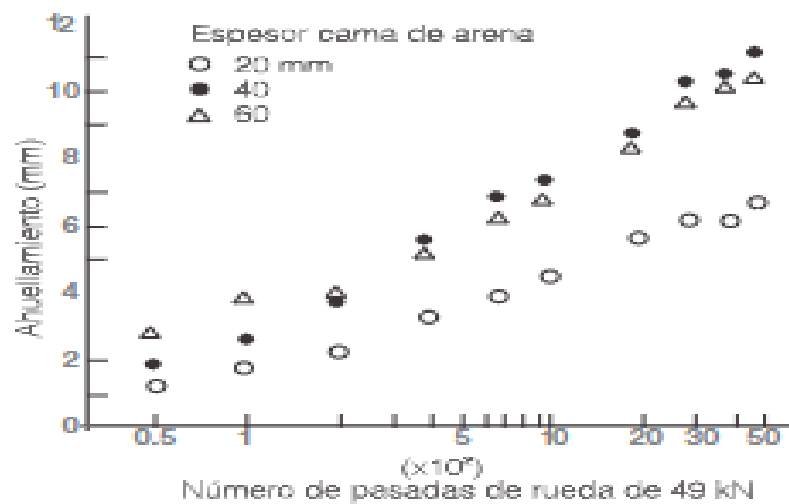
Un curado adecuado juega un papel crucial, ya que aproximadamente el 80% de la resistencia especificada para los 28 días se desarrolla en los primeros 7 días si se realiza correctamente. Por lo tanto, un curado inadecuado podría resultar en bajos niveles de resistencia y la aparición de grietas en el concreto.

En su investigación (FIERRO, 2014) el método de curado puede variar según la composición de la mezcla de concreto, el tamaño y la forma de los adoquines, así como las condiciones ambientales. Métodos como el curado al vapor, el curado con agua nebulizada o el

uso de membranas de curado pueden ser utilizados para asegurar un proceso efectivo y garantizar la calidad y longevidad de los adoquines de concreto.

Figura 8

RELACION ENTRE EL ESPESOR DE LA CAMA DE ARENA Y EL AHUELLAMIENTO DEL PAVIMENTO.



Nota: El grafico muestra como el ahuellamiento aumenta con el número de pasadas de rueda, dependiendo del espesor de la cama de arena, indicando la influencia de este factor en la durabilidad del pavimento. (FIERRO, 2014)

15.1. ESTABILIDAD DE LA SUPERFICIE PARA LA INSTALACIÓN DE ADOQUINES EN AEROPUERTOS REGIONALES.

15.2. Requisitos de Estabilidad de la Superficie

Tal como indica (D. & McQueen, 2020) la estabilidad de la superficie es un criterio crucial en el diseño y construcción de pavimentos de adoquines en aeropuertos. Esta estabilidad se asegura mediante varios factores y consideraciones técnicas que garantizan que los pavimentos puedan soportar las cargas sin sufrir deformaciones permanentes o fallos estructurales.

15.3. Soporte de Cargas:

Los pavimentos deben estar diseñados para soportar tanto las cargas estáticas como las dinámicas de las aeronaves. Esto incluye el peso de las aeronaves estacionadas, así como las cargas de rodaje y aterrizaje.

15.4. Deformaciones:

La superficie del pavimento debe ser resistente a deformaciones permanentes. Esto se logra mediante una base y subbase adecuadamente compactadas y el uso de materiales de alta calidad.

15.5. Durabilidad:

Los pavimentos deben mantener su integridad estructural a lo largo del tiempo, a pesar del tráfico constante de aeronaves y vehículos de servicio. Esto implica la selección de materiales duraderos y la aplicación de técnicas de construcción que maximicen la vida útil del pavimento.

15.6. *Distribución de Cargas:*

El diseño debe asegurar una distribución uniforme de las cargas a través de la superficie del pavimento. Esto puede incluir el uso de capas de distribución de carga y la implementación de patrones de colocación de adoquines que optimicen la estabilidad.

15.7. *Prevención de Deslizamientos:*

Los pavimentos deben proporcionar suficiente tracción para prevenir el deslizamiento de las aeronaves durante el aterrizaje y el despegue, así como durante el rodaje en condiciones húmedas o heladas.

15.8. *Resistencia al Desgaste:*

La superficie debe ser resistente al desgaste causado por el tráfico repetido de aeronaves y vehículos de servicio. Esto se logra mediante el uso de materiales que puedan resistir la abrasión y el impacto.

16. RESISTENCIA A COMBUSTIBLES Y QUÍMICOS

16.1. *Importancia:*

Según los principios expuestos por (McQueen, 2012), la resistencia a combustibles y productos químicos es un factor crucial en el diseño de pavimentos para aeropuertos. Las superficies de pavimento en áreas aeroportuarias están expuestas regularmente a derrames de combustibles, aceites hidráulicos y productos químicos utilizados para el deshielo. Estos agentes

pueden deteriorar rápidamente los materiales del pavimento si no se diseñan adecuadamente para resistirlos.

17. FACTORES CLAVE PARA LA RESISTENCIA

17.1. *Selección de Materiales*

De acuerdo con el enfoque propuesto por (D. & McQueen, 2020) los materiales utilizados en la construcción del pavimento deben tener propiedades químicas que les permitan resistir la acción corrosiva de los combustibles y aceites.

Materiales como ciertos tipos de concreto y asfalto modificado pueden ofrecer una mejor resistencia a los productos químicos.

17.2. *Sellado y Protección*

La aplicación de selladores específicos en la superficie del pavimento puede proporcionar una barrera protectora contra la penetración de líquidos corrosivos.

Estos selladores deben ser compatibles con los materiales del pavimento y efectivos contra una variedad de productos químicos.

17.3. *Drenaje Adecuado*

Un sistema de drenaje eficiente es esencial para evitar la acumulación de líquidos en la superficie del pavimento.

El diseño del drenaje debe asegurar que los derrames de combustible y otros líquidos se eliminen rápidamente, minimizando su tiempo de contacto con la superficie del pavimento.

17.4. *Mantenimiento Regular*

La inspección y mantenimiento regulares del pavimento pueden identificar y reparar áreas dañadas por productos químicos antes de que se agraven.

Las reparaciones oportunas y la re-aplicación de selladores pueden extender significativamente la vida útil del pavimento.

17.5. *Pruebas de Resistencia Química*

Antes de la instalación, es importante realizar pruebas de resistencia química en los materiales del pavimento para asegurarse de que cumplen con los estándares requeridos

Estas pruebas deben simular las condiciones operativas reales a las que se expone el pavimento.

17.6. *Uso de Aditivos*

Los aditivos específicos pueden incorporarse a los materiales del pavimento para mejorar su resistencia a productos químicos.

Estos aditivos deben seleccionarse cuidadosamente para no comprometer otras propiedades importantes del pavimento, como la resistencia y la durabilidad.

18. CAPACIDAD PARA SOPORTAR CARGAS ESTÁTICAS

De acuerdo con (Midlands, 2011), los pavimentos contruidos con adoquines de concreto han demostrado ser adecuados para resistir cargas estáticas generadas por aeronaves. Se recomienda un espesor de aproximadamente 80 mm para los adoquines y 30 mm de arena como capa de cama durante la construcción de estos pavimentos. Los adoquines de concreto ofrecen

resistencia a derrames de combustible y a la indentación estática, además de permitir ahorros significativos en costos y tiempo de construcción en comparación con pavimentos convencionales.

Tal como argumenta (McQueen, 2012) para proyectos donde las exigencias de carga son altas, se sugiere que la resistencia individual de los adoquines sea de al menos 50 MPa, con una resistencia promedio de la muestra superior a 55 MPa. En proyectos con menores solicitaciones o propósitos ornamentales, se pueden aceptar resistencias en un rango entre 40 MPa y 50 MPa. Asimismo, se establece que la absorción promedio debe ser inferior al 5%, con valores individuales por debajo del 7%, para asegurar la calidad y durabilidad de los adoquines.

Figura 9

PLATAFORMA DE ADOQUINES EN AEROPUERTOS PARA AERONAVES.



Nota: La imagen ilustra el uso de adoquines en plataformas de aeropuertos, demostrando su efectividad para soportar el peso de aeronaves y su durabilidad en condiciones de alta demanda. (McQueen, 2012) (HUMANO, 2025)

19. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Como refleja (D. & McQueen, 2020), en los pavimentos de aeropuertos contruidos con adoquines de concreto, la resistencia al deslizamiento es un factor de gran importancia. Las características de fricción de las superficies aeroportuarias se evalúan mediante equipos especializados que simulan condiciones reales de operación. Estos dispositivos utilizan ruedas equipadas con mecanismos para aplicar agua bajo presión, imitando las condiciones de humedad que pueden afectar la adherencia del pavimento.

Para velocidades bajas, como las típicas durante las maniobras de aterrizaje y despegue, se destaca la importancia de la micro textura de la superficie del adoquín y la dureza de los agregados empleados. Estos factores influyen significativamente en la capacidad del pavimento para proporcionar resistencia al deslizamiento, asegurando así operaciones seguras y eficientes en el aeropuerto. (D. & McQueen, 2020)

El documento (McQueen, 2012) también enfatiza la utilización de pruebas específicas, como el ensayo de resistencia al pulido (PSV), para evaluar de manera precisa la resistencia al deslizamiento de los pavimentos. Estas pruebas son esenciales para verificar que la superficie del pavimento cumpla con los estándares requeridos de seguridad operativa, minimizando el riesgo de accidentes derivados de la falta de adherencia.

20. CONFORT DE MARCHA EN PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE HORMIGÓN

Tal como indica (McQueen, 2012) el confort de marcha es un aspecto importante a considerar en los pavimentos, ya que influye en la comodidad de los usuarios y en la reducción de la fatiga del conductor. Para lograr un buen confort de marcha, se deben tener en cuenta propiedades como la rugosidad superficial, la planicidad y la uniformidad del pavimento. Un pavimento con buenas características de confort de marcha contribuye a una experiencia de conducción más segura y placentera.

El documento (McQueen, 2012) menciona que el confort de marcha en pavimentos de aeropuertos contruidos con adoquines de concreto es un aspecto relevante. Se destaca que los pavimentos de adoquines de hormigón ofrecen un buen confort de marcha debido a su capacidad de absorber vibraciones y ruidos, lo que los hace adecuados para áreas urbanas y peatonales. La textura de la superficie de los adoquines también contribuye a proporcionar un buen agarre y tracción, mejorando la seguridad y comodidad de los usuarios, especialmente en condiciones climáticas adversas.

21. CONSIDERACIONES GENERALES

21.1. Zonas de Baja Velocidad

Según (McQueen, 2012) En las áreas de plataforma y de rodaje de baja velocidad, el confort de marcha es generalmente adecuado debido a las bajas velocidades de las aeronaves. La superficie pavimentada con bloques de concreto proporciona una marcha suficientemente cómoda para las operaciones de aeronaves a bajas velocidades.

21.2. *Zonas de Alta Velocidad:*

Existe poca información sobre el desempeño de los pavimentos de bloques de concreto bajo el tránsito de aeronaves a altas velocidades. Este aspecto podría ser relevante para las pistas de aterrizaje y despegue, donde las aeronaves alcanzan mayores velocidades. Sin embargo, el uso de bloques de concreto en estas áreas no es común debido a las exigencias específicas de resistencia y suavidad de la superficie.

22. RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL CONFORT DE MARCHA

22.1. *Inspección y Mantenimiento Regular:*

Realizar inspecciones periódicas para asegurar que los bloques de concreto permanezcan nivelados y en su lugar, minimizando cualquier irregularidad que pueda afectar el confort de marcha. (McQueen, 2012)

Mantener la arena de juntas y realizar ajustes según sea necesario para evitar que las juntas se abran y causen incomodidad en la marcha.

22.2. *Calidad de los Materiales:*

Utilizar bloques de concreto de alta calidad y asegurar una correcta instalación para evitar hundimientos o desplazamientos que puedan afectar el confort de marcha. (McQueen, 2012)

Seleccionar adecuadamente el tipo de arena de cama y de juntas para asegurar una distribución uniforme de las cargas y evitar irregularidades en la superficie.

22.3. *Estudios y Pruebas*

Tal como indica (McQueen, 2012) las pruebas de baja y alta velocidad realizadas por la NASA en 1992 demostraron una resistencia superior al deslizamiento en comparación con el

concreto simple. Además, se destacó que los adoquines de concreto proporcionan una resistencia al deslizamiento igual o superior a las superficies asfálticas, lo que contribuye al confort de marcha de vehículos y aeronaves en áreas de baja velocidad como las plataformas de estacionamiento y las áreas de rodaje de aeropuertos regionales, en conclusión, el confort de marcha en pavimentos de adoquines de hormigón es un aspecto crucial para garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios, tanto en áreas urbanas como en entornos aeroportuarios. La adecuada selección de materiales, la correcta instalación y el mantenimiento regular son factores clave para lograr pavimentos con buenas características de confort de marcha.

22.4. *Marcaciones del Pavimento:*

Según los principios expuestos por (D. & McQueen, 2020) Las marcaciones del pavimento son elementos cruciales en la infraestructura aeroportuaria, ya que proporcionan información visual esencial para la navegación y seguridad de las aeronaves en tierra. Estas marcaciones incluyen líneas, símbolos y texto que guían a los pilotos durante el rodaje, despegue y aterrizaje, y ayudan a mantener la organización y el orden en el aeropuerto

23. TIPOS DE MARCACIONES DEL PAVIMENTO

23.1. *Líneas de Rodaje (Taxiway Lines):*

Línea Central: Indica el centro de la calle de rodaje. Generalmente es una línea amarilla continua que guía a las aeronaves desde y hacia las pistas y las plataformas de estacionamiento.

Líneas de Borde: Indican los límites laterales de la calle de rodaje. Estas pueden ser líneas continuas o discontinuas, dependiendo de si el área adyacente es operativa o no. (D. & McQueen, 2020)

23.2. *Líneas de Espera (Holding Position Lines):*

Se colocan en las intersecciones de las calles de rodaje con las pistas. Son líneas amarillas dobles con espacios entre ellas, indicando a las aeronaves que deben detenerse y esperar autorización para cruzar o ingresar a la pista. (D. & McQueen, 2020)

23.3. *Líneas de Guía en las Plataformas (Apron Guidance Lines):*

Guían a las aeronaves desde la calle de rodaje hacia sus posiciones de estacionamiento. Estas líneas son cruciales para asegurar que las aeronaves se estacionen en la posición correcta, evitando colisiones y optimizando el uso del espacio. (D. & McQueen, 2020)

23.4. *Marcaciones de Posición de Aeronaves (Aircraft Stand Markings):*

Indican la posición exacta donde la aeronave debe detenerse para el embarque y desembarque de pasajeros, carga y mantenimiento. Estas incluyen líneas de guía para las ruedas delanteras y traseras, así como marcas para las alas y la cola. (D. & McQueen, 2020)

24. SÍMBOLOS Y TEXTO

24.1. *Números de Pistas:*

Indican la identificación de las pistas, generalmente basados en la dirección magnética. Los números son grandes y blancos, pintados en cada extremo de la pista.

24.2. *Marcaciones de Zonas de Aterrizaje (Touchdown Zone Markings):*

Indican la zona óptima de aterrizaje en una pista. Estas consisten en una serie de líneas paralelas blancas.

Como refiere (D. & McQueen, 2020), las marcaciones en el pavimento de adoquines de hormigón son importantes para delimitar áreas, proporcionar orientación a los usuarios y mejorar

la seguridad vial. Estas marcas pueden incluir líneas divisorias, señales de tránsito, símbolos direccionales y zonas de cruce peatonal. Es fundamental que las marcaciones cumplan con las normativas locales de señalización vial para garantizar una circulación segura y ordenada en las áreas pavimentadas con adoquines.

25. CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE MARCACIONES

25.1. *Visibilidad:*

Las marcaciones deben ser altamente visibles en todas las condiciones

25.2. *Climáticas:*

Esto puede implicar el uso de materiales reflectantes o de alta visibilidad.

25.3. *Durabilidad:*

Las pinturas y materiales utilizados deben ser resistentes al desgaste causado por el tráfico de aeronaves y las condiciones ambientales.

25.4. *Normativas y Estándares:*

De acuerdo con (P.E., 2020) las marcaciones deben cumplir con las regulaciones de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la Administración Federal de Aviación (FAA) en términos de tamaño, color y ubicación.

En su análisis (P.E., 2020) las marcas del pavimento deben cumplir con las especificaciones de la FAA y ser claramente visibles para guiar el tráfico de manera segura en los aeropuertos regionales. Las marcas deben ser duraderas y resistentes a la abrasión, garantizando una correcta señalización en pistas, calles de rodaje y plataformas. Se recomienda seguir las

normativas y estándares demarcación de pavimentos para asegurar la eficacia y seguridad en la operación aeroportuaria.

Como sostiene (Midlands, 2011) los adoquines de concreto pueden ser coloreados integralmente y utilizados para marcas en pavimentos de aeropuertos, como ubicaciones de engranajes, líneas de entrada, números de puertas, equipos, áreas de estacionamiento e identificación de aerolíneas. También se destaca que los adoquines de concreto pueden ser pintados con líneas y números comunes en pavimentos de aeropuertos, lo que permite una rápida construcción en comparación con el concreto convencional, reduciendo el tiempo de cierre de pistas durante la construcción de calles de rodaje adyacentes. Esto puede ahorrar a las aerolíneas y aeropuertos interrupciones en los horarios de operación y costos.

26. CONSTRUCTIBILIDAD

26.1. *Facilidad de construcción del pavimento de bloques de concreto.*

Como señala (TRANSPORTE, 2022) el concepto de constructibilidad se refiere a la facilidad y eficiencia con la que se puede construir una estructura o pavimento. En el caso de los pavimentos de bloques de concreto, la constructibilidad es un aspecto clave que influye en la selección de este tipo de pavimento para diversos proyectos, incluyendo aeropuertos, calles urbanas y áreas peatonales.

26.2. *Ventajas de la Constructibilidad de los Bloques de Concreto*

26.3. *Modularidad:*

Los pavimentos de bloques de concreto son modulares, lo que significa que están compuestos por unidades individuales que se ensamblan para formar una superficie continua. Esta

modularidad permite una instalación rápida y flexible, facilitando ajustes y reparaciones locales sin la necesidad de remover grandes secciones del pavimento.

26.4. *Velocidad de Construcción:*

La instalación de bloques de concreto es relativamente rápida en comparación con otros métodos de pavimentación. No requiere tiempos prolongados de curado, como en el caso del concreto vertido en sitio. Esto permite que las áreas pavimentadas se abran al tráfico más rápidamente, reduciendo las interrupciones y los costos asociados con el cierre de vías.

26.5. *Flexibilidad en el Diseño:*

Los bloques de concreto pueden ser fabricados en una variedad de formas, tamaños y colores, lo que proporciona una gran flexibilidad en el diseño. Esto permite la creación de patrones y texturas personalizadas que pueden adaptarse a las necesidades específicas del proyecto.

26.6. *Reparaciones y Mantenimiento:*

Una de las ventajas más significativas de los pavimentos de bloques de concreto es la facilidad de reparación y mantenimiento. Las unidades dañadas pueden ser removidas y reemplazadas individualmente sin afectar el resto del pavimento. Esto minimiza los costos de mantenimiento y prolonga la vida útil del pavimento.

26.7. *Sostenibilidad y Reutilización:*

Los bloques de concreto pueden ser reutilizados en caso de que se requiera reconfigurar o rediseñar el área pavimentada. Esto contribuye a la sostenibilidad del proyecto al reducir la generación de residuos y la necesidad de materiales nuevos.

27. EJEMPLO PRÁCTICO DE CONSTRUCTIBILIDAD

Como argumenta (Midlands, 2011) en proyectos aeroportuarios, la constructibilidad de los pavimentos de bloques de concreto es particularmente beneficiosa. la capacidad de construir rápidamente se destaca como una ventaja significativa. Los adoquines de concreto pueden ser instalados en áreas críticas como calles de rodaje y plataformas de estacionamiento, permitiendo una rápida apertura al tráfico aéreo. Esto es crucial para minimizar las interrupciones en las operaciones del aeropuerto y reducir los costos asociados con el cierre de pistas.

28. MANTENIMIENTO Y REINSTALACIÓN DE PAVIMENTOS DE BLOQUES DE CONCRETO

Como señala (TRANSPORTE, 2022) el mantenimiento y la reinstalación de pavimentos de bloques de concreto son esenciales para garantizar la longevidad y funcionalidad de estas superficies. Estos procesos deben ser considerados desde la etapa de diseño para facilitar intervenciones futuras y reducir costos a lo largo del ciclo de vida del pavimento.

29. MANTENIMIENTO

El mantenimiento y la reinstalación de los pavimentos de bloques de concreto son relativamente sencillos y económicos. Según (FIERRO, 2014) Se destaca que la facilidad para retirar y reemplazar bloques individuales permite realizar reparaciones puntuales sin afectar toda la estructura del pavimento. Además, se resalta que el mantenimiento regular, que puede incluir limpieza, reposición de bloques dañados y relleno de juntas, contribuye a prolongar la vida útil del pavimento y mantener su buen estado estético y funcional.

29.1. *Inspección Regular:*

Realizar inspecciones periódicas es esencial para identificar y reparar daños menores antes de que se conviertan en problemas mayores. Las inspecciones deben incluir la revisión de la integridad estructural de los bloques, la alineación de las juntas y la condición del lecho de soporte.

Reemplazo de Bloques Dañados

Uno de los beneficios clave de los pavimentos de bloques de concreto es la facilidad con la que los bloques individuales pueden ser reemplazados. Si un bloque se daña, puede ser removido y reemplazado sin afectar el resto del pavimento. Este proceso es rápido y económico, minimizando las interrupciones en el uso de la superficie.

29.2. *Limpieza:*

La limpieza regular de la superficie del pavimento ayuda a mantener su apariencia y funcionalidad. La remoción de escombros, polvo y materiales derramados evita el deterioro prematuro y mejora la seguridad al reducir el riesgo de resbalones.

29.3. *Reajuste de Bloques:*

Con el tiempo, algunos bloques pueden desalinearse debido a la carga y el tráfico. Es importante reajustar estos bloques para mantener una superficie uniforme y evitar irregularidades que puedan afectar el confort de marcha y la seguridad.

29.4. *REINSTALACIÓN*

29.5. *Lecho de Soporte:*

Antes de la reinstalación de los bloques, es crucial asegurar que el lecho de soporte esté en buenas condiciones. Cualquier deformación o asentamiento debe ser corregido para garantizar una base estable y uniforme.

29.6. *Reinstalación de Bloques:*

Los bloques pueden ser reinstalados siguiendo el patrón original. Es importante asegurarse de que las juntas estén alineadas correctamente y que los bloques estén nivelados para mantener la integridad estructural del pavimento.

29.7. *Compactación:*

Una vez reinstalados, los bloques deben ser compactados para asegurar que estén firmemente asentados en el lecho de soporte. Esto ayuda a prevenir movimientos futuros y a mantener la superficie uniforme.

29.8. *Aplicación de Arena de Sellado:*

La arena de sellado debe ser aplicada y barrida en las juntas entre los bloques. Esto ayuda a fijar los bloques en su lugar y a prevenir la infiltración de agua, lo que puede causar daños por congelación y descongelación.

29.9. *Ejemplo Práctico*

La facilidad de mantenimiento y reinstalación de los adoquines de concreto es especialmente beneficiosa en entornos aeroportuarios. Las reparaciones pueden realizarse rápidamente sin necesidad de cierres prolongados, lo que minimiza las interrupciones en las operaciones del aeropuerto. Este enfoque modular permite mantener la superficie en condiciones óptimas con un mínimo de intervención y costo. Además, se menciona que en casos de reinstalación de pavimentos, es fundamental realizar una evaluación estructural para diseñar adecuadamente los requerimientos de refuerzo y rehabilitación.

30. CONSIDERACIONES CLIMÁTICAS

30.1. *Durabilidad en Ciclos de Congelación-Descongelación*

Como señala (D. & McQueen, 2020) los adoquines de concreto pueden ser utilizados bajo una amplia variedad de condiciones climáticas. Los adoquines resistentes a ciclos de congelación-descongelación típicamente se logran con contenidos de cemento del 17% al 19%, una absorción menor al 4%, densidades que superen las 142 lbs/cu.ft (2200 kg/m³), una baja relación agua/cemento y agregados durables.

30.2. *Condiciones de las Aguas Subterráneas*

Como establece (McQueen, 2012) las condiciones de las aguas subterráneas deben ser investigadas, y cualquier evidencia de niveles altos de agua debe ser observada durante un análisis de campo. La capa inferior del sistema de pavimento permeable no debe intersectar con las aguas subterráneas. Se recomienda un mínimo de 2 pies (0.61 m) entre la elevación del nivel freático estacional alto y la parte inferior del pavimento permeable para asegurar una filtración adecuada del agua pluvial antes de que entre a las aguas subterráneas

30.3. *Clima y Gestión de Agua*

Como refleja (P.E., 2020) el diseño de pavimentos permeables debe considerar tanto los requisitos hidráulicos como estructurales. En sistemas de carreteras sometidos a cargas vehiculares, el diseño estructural del pavimento es típicamente más que adecuado para los espesores de capa determinados en el diseño hidráulico. Sin embargo, en el contexto aeroportuario, los pesos de las aeronaves son significativamente mayores que los de los vehículos, por lo que el diseño estructural puede desempeñar un papel más importante en los espesores de capa requeridos

30.4. *Remoción Rápida de Agua Superficial y Nieve*

Tal como indica (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017) los adoquines de concreto con bordes biselados son capaces de una rápida remoción del agua superficial y son considerados tan buenos como, si no mejores que, el pavimento convencional en la remoción de agua superficial. Observaciones han demostrado que, después de mojarse, los adoquines de concreto pueden secarse más rápido que las superficies de asfalto. Los adoquines de concreto también pueden ser coloreados para absorber más energía radiante del sol y acelerar la fusión de nieve y hielo.

30.5. *Resistencia a Altas Temperaturas*

En el análisis de (McQueen, 2012) la resistencia a altas temperaturas es una consideración crítica en el diseño y mantenimiento de pavimentos, especialmente en aeropuertos donde las superficies están expuestas a temperaturas extremas debido a la fricción de los neumáticos de los aviones y el impacto de los gases de escape de los motores a reacción. Este apartado examina la capacidad de los pavimentos para soportar altas temperaturas, con un enfoque en los adoquines de concreto, que han demostrado ser especialmente efectivos en estas condiciones.

31. COMPORTAMIENTO DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO A ALTAS TEMPERATURAS

Los adoquines de concreto son conocidos por su capacidad para resistir temperaturas extremas sin experimentar cambios significativos en sus propiedades estructurales. De acuerdo con (McQueen, 2012) esta característica es particularmente ventajosa en aeropuertos, donde las superficies pavimentadas están sujetas a temperaturas que pueden alcanzar hasta 520°C (1000°F). Estudios realizados por British Aerospace PLC durante investigaciones sobre la factibilidad de

aterrizajes de aeronaves militares de despegue vertical (Harriers) en diversas superficies han demostrado que los adoquines de concreto pueden soportar estas temperaturas extremas sin deteriorarse.

A diferencia de los materiales termo-viscosos como el asfalto caliente, cuyas propiedades estructurales pueden cambiar con el aumento de la temperatura, los adoquines de concreto mantienen su integridad estructural, evitando la indentación estática en las posiciones de estacionamiento. Además, como dice (D. & McQueen, 2020) debido a su pequeño tamaño, los adoquines de concreto no experimentan contracciones y desconchamientos rápidos cuando se someten a incrementos rápidos de temperatura. Este comportamiento contrasta con el concreto de cemento portland rígido, que puede desconcharse y generar FOD (Foreign Object Debris) debido a un aumento rápido de la temperatura en la superficie causado por los gases de escape de los motores a reacción

31.1. *Ventajas del Uso de Adoquines de Concreto en Aeropuertos*

Espesor: 100-120 mm.

- Módulo de Elasticidad: 30,000 MPa.
- Resistencia a la Compresión: 55 MPa.

31.2. *Capa de Arena para Asentamiento:*

- Espesor: 25-50 mm.
- Módulo de Elasticidad: 50 MPa

31.3. *Base Granular:*

- Espesor: 200 mm

- Módulo de Elasticidad: 300 MPa

31.4. Base Estabilizada:

- Espesor: 150 mm.
- Módulo de Elasticidad: 1,500 MPa.

31.5. Subbase Granular:

- Espesor: 300 mm.
- Módulo de Elasticidad: 200 MPa.

31.6. Criterios de Diseño:

- Fatiga: Resistencia a la fatiga de las capas de superficie (adoquines de concreto) y de la base estabilizada.
- Deformación Permanente: Control de las deformaciones permanentes en las capas no ligadas (arena y bases granulares).

31.7. Nuevo ejemplo de Diseño

31.8. Datos de Entrada:

31.9. Cargas de Aeronaves:

- Boeing 737-800: Peso Máximo al Despegue (MTOW): 79,015 kg.
- Configuración del Tren de Aterrizaje: Dual.
- Airbus A320: Peso Máximo al Despegue (MTOW): 73,500 kg.
- Configuración del Tren de Aterrizaje: Dual.

31.10. *Propiedades de los Materiales:*

En su análisis (McQueen, 2012) una de las ventajas clave de los adoquines de concreto es su capacidad para articular individualmente sin abrir significativamente las juntas, lo que permite que la superficie flexible absorba movimientos térmicos menores en las bases subyacentes sin mostrar movimiento visible en la superficie. Esta propiedad es particularmente útil en pavimentos de aeropuertos, donde las superficies están sujetas a una amplia gama de temperaturas y condiciones climáticas extremas.

Además, los adoquines de concreto tienen un color más claro en comparación con el asfalto, lo que reduce la cantidad de calor absorbido en el concreto subyacente y, por lo tanto, disminuye el movimiento térmico. Esta propiedad no solo mejora la durabilidad del pavimento, sino que también contribuye a la eficiencia energética al mantener temperaturas superficiales más bajas durante el día

31.11. *Ensayos de Resistencia a Altas Temperaturas*

De acuerdo con (D. & McQueen, 2020) para evaluar la resistencia de los adoquines de concreto a altas temperaturas, se han llevado a cabo diversos ensayos y estudios. Estos incluyen pruebas de laboratorio que simulan las condiciones extremas a las que están expuestos los pavimentos en aeropuertos. Los resultados de estos ensayos han confirmado que los adoquines de concreto no solo pueden soportar temperaturas extremas, sino que también mantienen su integridad estructural y funcional bajo estas condiciones

31.12. *Resistencia a Movimientos Térmicos*

La resistencia a los movimientos térmicos es una consideración crucial en el diseño y la implementación de pavimentos, especialmente en aeropuertos y otras infraestructuras críticas. De acuerdo con el enfoque propuesto por (McQueen, 2012) los cambios de temperatura pueden causar movimientos en los materiales de pavimentación, lo que puede resultar en grietas, deformaciones y otros daños estructurales. Este documento explora los mecanismos de resistencia a los movimientos térmicos, los métodos de diseño para mitigar estos efectos y las prácticas recomendadas para asegurar la durabilidad del pavimento bajo variaciones térmicas.

31.13. *Mecanismos de Movimientos Térmicos*

Los pavimentos están sujetos a movimientos térmicos debido a la expansión y contracción de los materiales cuando se exponen a cambios de temperatura. Estos movimientos pueden ser causados por:

31.14. *Diferenciales de Temperatura Diarios:*

Variaciones diarias en la temperatura superficial y subsuperficial que provocan movimientos cíclicos.

31.15. *Diferenciales de Temperatura Estacionales:*

Cambios más prolongados y graduales en la temperatura que pueden afectar el volumen del pavimento y los materiales subyacentes

31.16. *Efectos de Calor Localizados:*

Fuentes de calor específicas, como motores de aeronaves, que pueden causar aumentos rápidos de temperatura y expansión localizada del pavimento

32. FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A MOVIMIENTOS TÉRMICOS

La resistencia de un pavimento a los movimientos térmicos tal como dice (McQueen, 2012) depende de varios factores, entre ellos:

32.1. *Composición del Material:*

Los diferentes materiales tienen coeficientes de expansión térmica distintos. El concreto, por ejemplo, tiene una menor expansión térmica comparado con el asfalto.

32.2. *Diseño Estructural:*

El diseño del pavimento debe considerar juntas de expansión y otros elementos que permitan la expansión y contracción sin causar daños.

32.3. *Condiciones Climáticas:*

Las condiciones locales, como la temperatura máxima y mínima esperada, y la frecuencia de los ciclos de congelación y descongelación, influyen significativamente en el comportamiento del pavimento

32.4. *Métodos de Diseño para Mitigar Movimientos Térmicos*

Para mitigar los efectos adversos de los movimientos térmicos, se pueden implementar varias estrategias de diseño:

32.5. *Juntas de Expansión:*

Incorporar juntas de expansión en el diseño del pavimento permite que los materiales se expandan y contraigan sin causar grietas ni deformaciones significativas.

32.6. *Selección de Materiales:*

Utilizar materiales con baja expansión térmica y alta resistencia a las fluctuaciones de temperatura puede mejorar la durabilidad del pavimento.

32.7. *Capas de Base y Subbase:*

Diseñar adecuadamente las capas de base y subbase para distribuir uniformemente las cargas y reducir los puntos de tensión concentrada que pueden resultar en movimientos diferenciales.

33. USO EN ÁREAS PROPENSAS A ASENTAMIENTOS

Tal como indica (BENAVIDES, 2015) el uso de pavimentos permeables en áreas propensas a asentamientos presenta una serie de desafíos y beneficios únicos. Las características geotécnicas del suelo, la capacidad de redistribución de cargas y la adaptabilidad del pavimento son factores clave que deben considerarse al diseñar y aplicar este tipo de soluciones en tales áreas. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes del uso de pavimentos permeables en estas condiciones, abarcando desde la teoría básica hasta las aplicaciones prácticas.

33.1. *Uso en Áreas Propensas a Asentamientos*

Según los principios expuestos por (TRANSPORTE, 2022) el uso de pavimentos permeables en áreas propensas a asentamientos presenta una serie de desafíos y beneficios únicos. Las características geotécnicas del suelo, la capacidad de redistribución de cargas y la adaptabilidad del pavimento son factores clave que deben considerarse al diseñar y aplicar este

tipo de soluciones en tales áreas. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes del uso de pavimentos permeables en estas condiciones, abarcando desde la teoría básica hasta las aplicaciones prácticas.

33.2. *Características Geotécnicas del Suelo*

Los suelos en áreas propensas a asentamientos suelen presentar variaciones significativas en su composición y comportamiento mecánico. De acuerdo con (TRANSPORTE, 2022) estos suelos pueden estar compuestos por materiales como arcillas expansivas, limos orgánicos y otros materiales con alta compresibilidad y baja capacidad portante. La presencia de estos suelos puede causar problemas de asentamiento diferencial, lo que afecta la integridad estructural del pavimento.

33.3. *Evaluación del Suelo:*

Tal como argumenta (TRANSPORTE, 2022) antes de la instalación del pavimento, es crucial llevar a cabo un estudio geotécnico detallado que evalúe la capacidad portante, la compresibilidad y el comportamiento de expansión/contracción del suelo. Este estudio permitirá diseñar una base y subbase adecuadas que mitiguen los efectos adversos del asentamiento.

33.4. *Diseño del Pavimento:*

El diseño del pavimento en áreas propensas a asentamientos debe enfocarse en la flexibilidad y la capacidad de redistribuir cargas. Los pavimentos permeables, como los de bloques de concreto, ofrecen ventajas significativas debido a su estructura modular y su capacidad para adaptarse a pequeños movimientos del suelo sin comprometer su integridad.

33.5. *Capa de Base y Subbase:*

La base y subbase deben ser diseñadas para proporcionar una distribución uniforme de las cargas y permitir ciertos grados de movimiento sin causar deformaciones significativas en la superficie del pavimento. Materiales granulares bien compactados y capas de geotextil pueden ser utilizados para mejorar la estabilidad del sistema.

34. INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

Como indica (TRANSPORTE, 2022) la instalación correcta del pavimento es fundamental para su desempeño en áreas de asentamiento. La colocación adecuada de cada capa, así como el uso de técnicas de compactación apropiadas, son esenciales para garantizar la durabilidad del pavimento.

Procedimientos de Instalación:

34.1. Preparación del Suelo:

Excavar y preparar el suelo base, removiendo cualquier material inadecuado y nivelando la superficie.

34.2. Colocación de la Geomembrana:

Si es necesario, instalar una geomembrana impermeable para evitar la infiltración de agua en suelos expansivos.

34.3. Construcción de la Subbase:

Colocar y compactar una subbase granular, asegurándose de que esté bien nivelada y libre de puntos débiles.

34.4. Instalación de la Base:

Colocar y compactar la base granular, utilizando técnicas adecuadas para garantizar una distribución uniforme de las cargas.

34.5. Colocación del Pavimento:

Instalar los bloques de pavimento permeable según el diseño especificado, asegurando una interconexión adecuada y el relleno de juntas con arena estabilizadora.

35. MANTENIMIENTO

Como plantea (TRANSPORTE, 2022) el mantenimiento regular es esencial para prolongar la vida útil del pavimento. Esto incluye la inspección y el relleno periódico de juntas, la limpieza de la superficie para prevenir la obstrucción de los poros y la reparación de áreas afectadas por asentamientos diferenciales.

35.1. Beneficios del Pavimento Permeable en Áreas de Asentamiento

El uso de pavimentos permeables en áreas propensas a asentamientos ofrece varios beneficios significativos:

35.2. Reducción de Inundaciones:

Al permitir la infiltración de agua, se reduce el riesgo de acumulación de agua en la superficie y la formación de charcos.

35.3. Mejora de la Calidad del Agua:

Los pavimentos permeables ayudan a filtrar contaminantes y mejoran la calidad del agua subterránea.

35.4. Adaptabilidad al Movimiento:

La estructura modular de los bloques permite que el pavimento se ajuste a pequeños movimientos del suelo sin causar fallos estructurales significativos.

35.5. *Fácil Mantenimiento y Reparación:*

En caso de asentamiento diferencial, los bloques individuales pueden ser levantados y reubicados fácilmente, lo que facilita las reparaciones.

36. RENTABILIDAD DE LOS ADOQUINES PERMEABLES EN PAVIMENTOS DE AEROPUERTOS

De acuerdo con (D. & McQueen, 2020) el uso de adoquines permeables en pavimentos de aeropuertos presenta una alternativa viable y sostenible frente a los pavimentos tradicionales. Este análisis se centrará en la rentabilidad de los adoquines permeables, considerando tanto los beneficios económicos directos como los costos asociados con su implementación y mantenimiento. Además, se discutirán las ventajas técnicas y ambientales que estos pavimentos aportan.

36.1. *Costos Iniciales y de Implementación*

Los costos iniciales de instalación de adoquines permeables son generalmente más altos que los de los pavimentos convencionales. En términos económicos, estos costos incluyen:

36.2. *Materiales:*

Los adoquines de alta calidad necesarios para soportar el tráfico aéreo y las condiciones climáticas extremas.

36.3. *Preparación del Terreno:*

La preparación del terreno para garantizar una correcta permeabilidad y estabilidad del pavimento.

36.4. *Mano de Obra:*

La instalación requiere mano de obra especializada para asegurar que los adoquines se coloquen correctamente.

37. ANÁLISIS DE COSTOS DE CICLO DE VIDA

Uno de los principales beneficios de los adoquines permeables es su bajo costo de mantenimiento a largo plazo. A continuación, se presenta un análisis de los costos de ciclo de vida en comparación con los pavimentos tradicionales:

37.1. *Durabilidad:*

Los adoquines permeables tienen una vida útil más larga debido a su resistencia a la erosión y al desgaste. Esto reduce la frecuencia de reemplazo y las reparaciones.

37.2. *Mantenimiento:*

El mantenimiento de los adoquines permeables incluye la limpieza periódica de las juntas para prevenir obstrucciones. Este costo es significativamente menor en comparación con la reparación de grietas y la repavimentación necesaria para los pavimentos tradicionales.

37.3. *Gestión de Aguas Pluviales:*

La capacidad de los adoquines permeables para permitir la infiltración de agua reduce la necesidad de sistemas de drenaje adicionales, lo que representa un ahorro significativo en infraestructura y gestión de aguas pluviales.

37.4. *Beneficios Económicos*

Además de los costos directos de implementación y mantenimiento, los adoquines permeables ofrecen varios beneficios económicos indirectos:

37.5. *Reducción de Inundaciones:*

Al permitir la infiltración del agua, los adoquines permeables ayudan a reducir el riesgo de inundaciones, lo que puede traducirse en menores costos de daños y seguros.

37.6. *Mejora de la Calidad del Agua:*

La filtración del agua a través de los adoquines ayuda a remover contaminantes, mejorando la calidad del agua subterránea y reduciendo los costos de tratamiento.

37.7. *Incremento del Valor de Propiedad:*

Las áreas pavimentadas con adoquines permeables son vistas como más atractivas y sostenibles, lo que puede aumentar el valor de la propiedad.

38. RENTABILIDAD DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO

38.1. *Materiales y Mano de Obra:*

Los adoquines de concreto requieren una preparación cuidadosa de la base y la instalación precisa para asegurar la durabilidad y el rendimiento. Esto implica costos iniciales más altos en comparación con pavimentos tradicionales como el asfalto.

39. DURABILIDAD Y MANTENIMIENTO

39.1. *Durabilidad:*

Los adoquines de concreto son extremadamente duraderos y pueden soportar el tráfico pesado, incluyendo aeronaves de gran tamaño. Esta durabilidad reduce la necesidad de reparaciones frecuentes, lo cual es un beneficio económico a largo plazo. (FIERRO, 2014)

39.2. *Mantenimiento:*

El mantenimiento regular implica la inspección y el relleno de juntas con arena, y la compactación adicional según sea necesario. A pesar de estos requisitos, el costo de mantenimiento a lo largo del tiempo es generalmente menor comparado con otros tipos de pavimentos debido a la resistencia y longevidad de los adoquines.

40. BENEFICIOS ECONÓMICOS

40.1. *Larga Vida Útil:*

La larga vida útil de los adoquines reduce los costos a largo plazo. Aunque la inversión inicial puede ser alta, la necesidad reducida de reparaciones y reemplazos frecuentes equilibra estos costos a lo largo del tiempo.

40.2. *Flexibilidad y Reutilización:*

Los adoquines de concreto pueden ser levantados y reutilizados, lo que facilita las reparaciones subterráneas y reduce el desperdicio de materiales, proporcionando beneficios económicos adicionales en términos de gestión de recursos y sostenibilidad.

41. RENTABILIDAD DE LOS PAVIMENTOS PERMEABLES

41.1. *Gestión de Aguas Pluviales:*

Los pavimentos permeables, incluyendo los adoquines permeables, permiten la infiltración de agua, reduciendo la escorrentía superficial y la carga en los sistemas de drenaje. Esto puede traducirse en ahorros significativos en la infraestructura de gestión de aguas pluviales. (FIERRO, 2014)

41.2. *Reducción del Calor Urbano:*

La capacidad de los pavimentos permeables para reducir las islas de calor urbanas puede disminuir los costos de enfriamiento y mejorar el confort ambiental, lo que tiene un impacto económico positivo indirecto.

41.3. *Menor Necesidad de Infraestructura de Drenaje:*

Al reducir la escorrentía, los pavimentos permeables pueden minimizar la necesidad de infraestructura de drenaje costosa, lo que representa un ahorro significativo para los proyectos de construcción y mantenimiento de aeropuertos.

41.4. *ELEGIBILIDAD SEGÚN LA FAA DE LOS ADOQUINES*

Tal como argumenta (P.E., 2020) la Administración Federal de Aviación (FAA) proporciona regulaciones y guías detalladas para la construcción y mantenimiento de pavimentos en aeropuertos. Aunque no existe una circular de asesoramiento específica de la FAA dedicada exclusivamente a los adoquines de concreto, su uso en proyectos financiados por la FAA es permitido bajo ciertas condiciones. Este documento detalla las especificaciones técnicas y criterios de elegibilidad para la implementación de adoquines de concreto en pavimentos de aeropuertos según las normas de la FAA.

41.5. *Norma ASTM C936:*

Como establece (Midlands, 2011) los adoquines de concreto deben ser fabricados conforme a la norma ASTM C936, que define los requisitos de resistencia, absorción de agua, y durabilidad. Esta norma asegura que los adoquines sean adecuados para soportar las cargas y el desgaste típicos de un entorno aeroportuario.

41.6. *Requisitos de Diseño:*

- Los adoquines deben tener un bisel en el borde superior para reducir el daño por impacto y facilitar el manejo.
- Deben incluir separadores integrados para mantener un espacio uniforme entre los adoquines, lo que permite el llenado adecuado de las juntas con arena y asegura la estabilidad estructural del pavimento.

42. REQUISITOS DE MATERIAL Y ESTRUCTURA DE LA BASE

Según (P.E., 2020) la base sobre la cual se colocarán los adoquines de concreto es crítica para el rendimiento del pavimento. La FAA especifica diferentes requisitos de base dependiendo del peso bruto de las aeronaves que utilizarán la superficie pavimentada.

42.1. *Base Estabilizada:*

Para aeronaves con pesos brutos superiores a 100,000 libras (440 kN), es obligatorio utilizar una base estabilizada conforme a la FAA AC 150/5320-6C. Esta base puede estar tratada con cemento u otros estabilizadores para proporcionar la rigidez necesaria.

En el caso de bases tratadas con cemento, se debe colocar un geotextil tejido sobre la base estabilizada. Este geotextil previene la pérdida de la arena de cama a través de grietas de contracción que pueden formarse en la base estabilizada.

42.2. *Limitaciones de Uso:*

Los adoquines de concreto no se recomiendan en áreas sometidas a fuerzas extremas, como pistas de aterrizaje o áreas de plataforma donde se realicen operaciones de power-back. Estas

operaciones pueden generar fuerzas que excedan la capacidad de los adoquines para permanecer en su lugar sin desplazarse o dañarse.

43. NORMA ASTM C936:

43.1. *Adoquines de Concreto para Pavimentación*

La norma ASTM C936, Especificación Estándar para Adoquines de Concreto para Pavimentación, establece los requisitos que deben cumplir los adoquines de concreto destinados a la pavimentación. Esta norma es fundamental para asegurar la calidad, durabilidad y desempeño de los adoquines de concreto utilizados en diversas aplicaciones, incluyendo aeropuertos, calles, aceras, y otras áreas pavimentadas. A continuación, se detallan los aspectos más importantes y relevantes de la norma ASTM C936. (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017)

44. REQUISITOS DE MATERIAL Y FABRICACIÓN

44.1. *Composición del Concreto:*

Los adoquines deben estar compuestos de una mezcla de cemento portland, agregados y agua. Pueden incluirse aditivos químicos para mejorar ciertas propiedades del concreto.

Los materiales utilizados deben ser de alta calidad y cumplir con las especificaciones de otras normas ASTM aplicables, como ASTM C33 para agregados y ASTM C150 para cemento portland. (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017)

45. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

45.1. *Resistencia a la Compresión:*

Los adoquines de concreto deben tener una resistencia a la compresión mínima de 55 MPa (8000 psi). Esta alta resistencia asegura que los adoquines puedan soportar cargas pesadas y tráfico intenso sin sufrir daños estructurales.

45.2. *Absorción de Agua:*

La absorción de agua de los adoquines no debe exceder el 5% en masa. Un bajo nivel de absorción es crucial para la durabilidad, ya que reduce el riesgo de daños por ciclos de congelación y deshielo y la infiltración de agua que puede degradar el concreto.

46. DIMENSIONES Y TOLERANCIAS

46.1. *Dimensiones Estándar*

Los adoquines deben tener una forma y tamaño uniformes. Las dimensiones típicas incluyen longitudes y anchuras que varían de 60 a 240 mm, con espesores que generalmente oscilan entre 60 y 100 mm, dependiendo de la aplicación específica.

46.2. *Tolerancias Dimensionales:*

Según los principios expuestos por (D. & McQueen, 2020) las variaciones en las dimensiones de los adoquines no deben exceder los ± 3 mm para la longitud y la anchura, y ± 2 mm para el espesor. Estas tolerancias aseguran que los adoquines encajen correctamente y mantengan la estabilidad del pavimento.

Procedimiento de Diseño Estructural para Aeronaves con Peso Mayor a 30,000 Lbs (13,600 kg) y su Aplicabilidad en Aeropuertos de Colombia.

El diseño estructural de pavimentos para aeronaves con un peso superior a 30,000 libras (13,600 kg) sigue procedimientos técnicos rigurosos para asegurar que el pavimento pueda soportar las cargas pesadas y el tráfico frecuente de estas aeronaves. Tal como indica (D. & McQueen, 2020) este proceso implica varios pasos críticos y consideraciones técnicas detalladas, que incluyen la evaluación del suelo subyacente, el análisis del tráfico de aeronaves y la determinación de los espesores necesarios para los diferentes materiales de pavimentación. A continuación, se presenta el procedimiento de diseño estructural según los documentos relevantes.

46.3. *Evaluación del Subsuelo*

El primer paso en el diseño estructural de pavimentos para aeronaves pesadas es la evaluación del subsuelo. Esto incluye:

46.4. *Encuesta del Suelo:*

- Se realiza una encuesta del suelo para determinar el módulo de reacción de la subrasante (valor k), que se mide en $\text{MN/m}^2/\text{m}$. Este valor es crucial para calcular el espesor del pavimento necesario.
- Clasificación de la Subrasante: Según la rigidez del subsuelo, se clasifica en categorías como alta, media, baja y muy baja. Esto afecta la capacidad del pavimento para soportar las cargas.

47. DATOS DE LAS AERONAVES

Es esencial recopilar datos específicos de las aeronaves que utilizarán el pavimento.
(McQueen, 2012)

47.1. *Estos datos incluyen:*

Peso Total en Masa (kg): El peso total de la aeronave, que influye directamente en el diseño del pavimento.

47.2. *Tipo de Engranaje Principal:*

La configuración del tren de aterrizaje principal (e.g., dual, tándem dual, trídem), que afecta la distribución de las cargas sobre el pavimento.

47.3. *Número de Pasadas a Cobertura:*

La relación entre las pasadas de la aeronave y la cobertura del área del pavimento, que se utiliza para calcular la frecuencia de tráfico.

47.4. *Análisis del Tráfico de Aeronaves*

Se debe realizar un análisis detallado del tráfico de aeronaves para determinar la vida útil del pavimento y su resistencia al tráfico previsto:

Vida Útil del Diseño: Normalmente se considera una vida útil de diseño de 20 a 30 años para pavimentos aeroportuarios.

47.5. *Frecuencia del Tráfico:*

Se categoriza en alta, media, baja y ultra baja, basado en el número total de coberturas. Esto influye en la elección de los materiales y el diseño del espesor del pavimento.

48. CRITERIOS DE DISEÑO

Como puntualiza (McQueen, 2012) Los criterios de diseño incluyen varios aspectos técnicos, como el cálculo del Número de Clasificación de Pavimentos (PCN) y la selección de los materiales de construcción:

Número de Clasificación de Pavimentos (PCN): Determinado en base al Número de Clasificación de Aeronaves (ACN) de la aeronave de diseño, redondeado al entero más cercano.

48.1. *Análisis de Tráfico Mixto:*

Considera el efecto combinado de diferentes tipos de aeronaves sobre el pavimento.

48.2. *Fuerza del Hormigón:*

La fuerza media a la flexión del hormigón a los 28 días, generalmente especificada en N/mm².

48.3. *Construcción Requerida*

Dependiendo de los resultados del análisis del suelo y el tráfico, se determinan los espesores necesarios para las diferentes capas del pavimento:

48.4. *Pavimento de Calidad (PQC):*

Espesor del hormigón de pavimento de calidad, que varía según la rigidez del subsuelo y la categoría de tráfico.

48.5. *Hormigón de Relleno en Seco (RDC):*

Espesor del hormigón de relleno en seco, utilizado para soportar el PQC y distribuir las cargas.

49. EJEMPLO DE DISEÑO

Para ilustrar el proceso de diseño, considere un pavimento rígido para un nuevo taxiway paralelo en un aeropuerto internacional utilizado por una amplia gama de aeronaves. El proceso de diseño incluiría: (D. & McQueen, 2020)

49.1. Encuesta del Suelo:

Determina $k = 50 \text{ MN/m}^2/\text{m}$.

Datos de Aeronaves: Incluye aeronaves como el Boeing 737-800 y el Boeing 777-300ER, con sus respectivos pesos y configuraciones de engranajes.

49.2. Análisis de Tráfico:

Calcula la frecuencia de tráfico y determina una vida útil de diseño de 30 años.

49.3. Criterios de Diseño:

Determina el PCN basado en el ACN de la aeronave de diseño, considerando la fuerza del hormigón a 5 N/mm^2 .

49.4. Construcción Requerida:

Define espesores como 390 mm para el PQC y 175 mm para el RDC.

49.5. Diseño Estructural de Pavimentos con Adoquines para Aeronaves con Peso Mayor a 30,000 Lbs (13,600 kg) y su Aplicabilidad en Aeropuertos de Colombia

El uso de pavimentos con adoquines según (D. & McQueen, 2020) en aeropuertos es una solución innovadora que ofrece diversas ventajas, incluyendo la capacidad de manejar cargas pesadas y la gestión eficaz del agua. Este diseño es particularmente relevante para aeropuertos que

deben soportar el tráfico de aeronaves con peso superior a 30,000 libras (13,600 kg). A continuación, se presenta un análisis detallado basado en (Midlands, 2011) (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017) (D. & McQueen, 2020) (BENAVIDES, 2015) los documentos proporcionados, destacando la experiencia y viabilidad de su implementación en aeropuertos de Colombia.

50. EVALUACIÓN DEL SUBSUELO

50.1. Encuesta del Suelo:

- Determinación del módulo de reacción de la subrasante (valor k).
- Clasificación de la subrasante según su rigidez.

En el caso de la implementación de PICP, la subrasante debe ser adecuadamente preparada y estabilizada para soportar las cargas impuestas por el tráfico de aeronaves pesadas.

50.2. Datos de las Aeronaves

Para el diseño estructural de pavimentos con adoquines, se consideran aeronaves como:

Boeing 737-800: Peso total en masa de 79,015 kg.

Airbus A320: Peso total en masa de 73,500 kg.

Boeing 777-300ER: Peso total en masa de 351,534 kg.

- La configuración del tren de aterrizaje y la distribución de la carga son factores clave en el diseño del pavimento con adoquines.

51. ANÁLISIS DEL TRÁFICO DE AERONAVES

51.1. *Vida Útil del Diseño:*

- 30 años.

51.2. *Frecuencia del Tráfico:*

Se estima una frecuencia de tráfico alta, lo que implica un diseño robusto para soportar las operaciones diarias.

51.3. *Criterios de Diseño*

El diseño de pavimentos con adoquines debe considerar:

- **Número de Clasificación de Pavimentos (PCN):** Basado en el Número de Clasificación de Aeronaves (ACN) de la aeronave más pesada.
- **Fuerza del Material de los Adoquines:** Debe cumplir con las especificaciones ASTM C936, que establece los requisitos de resistencia y durabilidad para adoquines de concreto intertrabado.

52. CONSTRUCCIÓN REQUERIDA

52.1. *Componentes del Pavimento con Adoquines:*

52.2. *Adoquines de Concreto:*

- Espesor: 100 mm (mínimo) para soportar cargas pesadas.
- Resistencia a la compresión: 55 MPa (mínimo).

52.3. *Capa de Base y Subbase:*

- Base granular de alta calidad: 200 mm.

- Subbase granular: 300 mm.
- Capa de arena para asentamiento: 25-50 mm.

52.4. *Tratamiento Adicional:*

- Técnicas de estabilización del suelo en áreas con subrasante de menor rigidez.

52.5. *EJEMPLO DE DISEÑO*

52.6. *Aeropuerto Internacional de Ejemplo en Colombia:*

- Ubicación: Colombia.
- Objetivo: Implementar un pavimento con adoquines en un nuevo taxiway para soportar aeronaves con un peso superior a 30,000 lbs (13,600 kg).

52.7. *Encuesta del Suelo:*

Módulo de reacción de la subrasante $k=30 \text{ MN/m}^2/\text{m}$

52.8. *Datos de Aeronaves:*

- Tipo de Aeronave: Boeing 737-800.
- Masa Total (kg): 79,243.
- Tipo de Engranaje Principal de Ruedas: Dual.
- Frecuencia de Uso: 3 despegues diarios.

52.9. *Vida de Diseño:*

- 30 años.

52.10. *Frecuencia de Tráfico:*

- Número de Coberturas: 32,850

52.11. ACN (Número de Clasificación de Aeronaves):

- 55.

52.12. Frecuencia de Tráfico:

- Baja.

52.13. Resistencia del Concreto:

- Resistencia a la compresión de los adoquines: 55 MPa.

52.14. Construcción Requerida:

- Adoquines de Concreto: 100 mm de espesor.
- Capa de Arena: 25-50 mm.
- Base Granular: 200 mm.
- Subbase Granular: 300 mm.

53. EXPERIENCIA PREVIA EN AEROPUERTOS

53.1. Según (D. & McQueen, 2020) (Midlands, 2011) (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017) Los aeropuertos internacionales que han implementado pavimentos con adoquines incluyen:

- Aeropuerto Internacional de Sídney, Australia:
- Implementó pavimentos con adoquines en áreas de carga y mantenimiento, demostrando una alta resistencia y facilidad de mantenimiento.
- Aeropuerto Internacional de Heathrow, Reino Unido:

- Ha utilizado PICP en áreas de estacionamiento de aeronaves, mejorando la durabilidad y reduciendo los costos operativos.

53.2. *Permeable Interlocking Concrete Pavement (PICP)*

El Permeable Interlocking Concrete Pavement (PICP) es un sistema de pavimentación que utiliza adoquines de concreto especialmente diseñados para permitir la infiltración de agua a través de las juntas y espacios entre los adoquines, facilitando la gestión del agua de lluvia y reduciendo la escorrentía superficial. (McQueen, 2012)

53.3. *COMPONENTES DEL PICP*

53.4. *Adoquines de Concreto Permeables:*

- Material: Concreto de alta resistencia.
- Dimensiones: Varían según el diseño, pero típicamente tienen un espesor de 80-100 mm.
- Resistencia a la Compresión: 55 MPa (mínimo).
- Diseño: Forma y tamaño que permiten el entrelazado y proporcionan estabilidad estructural.

53.5. *Capa de Arena para Asentamiento:*

- Espesor: 25-50 mm.
- Función: Facilita el ajuste y nivelación de los adoquines y permite la infiltración de agua.

53.6. *Base y Subbase Granular Permeable:*

- Base Granular: Generalmente 200 mm de espesor, compuesta por materiales granulados que permiten la infiltración de agua.

- Subbase Granular: Generalmente 300 mm de espesor, compuesta por agregados más gruesos para proporcionar soporte estructural y capacidad de almacenamiento de agua.

53.7. VENTAJAS DEL PICP

53.8. Gestión del Agua de Lluvia:

- Reduce la escorrentía superficial al permitir que el agua de lluvia se infiltre en el suelo.

- Ayuda a recargar los acuíferos subterráneos.

- Mitiga el riesgo de inundaciones.

53.9. Mejora de la Calidad del Agua:

- Filtra contaminantes y sedimentos a medida que el agua se infiltra a través de las capas del pavimento.

53.10. Durabilidad y Mantenimiento:

- Los adoquines individuales pueden ser reemplazados fácilmente si se dañan, lo que reduce los costos de mantenimiento a largo plazo.

- Alta resistencia a la carga y al desgaste, adecuada para áreas con tráfico pesado, como aeropuertos.

53.11. Beneficios Ambientales:

- Reduce el efecto isla de calor en áreas urbanas al permitir la infiltración de agua y disminuir la temperatura del pavimento.
- Promueve la sostenibilidad y la gestión ambiental responsable.

El Permeable Interlocking Concrete Pavement (PICP) es una solución innovadora y eficiente para la gestión del agua y la durabilidad del pavimento en aeropuertos que manejan tráfico de aeronaves pesadas. La correcta implementación de este sistema puede proporcionar numerosos beneficios, incluyendo la reducción de la escorrentía superficial, la mejora de la calidad del agua, y la prolongación de la vida útil del pavimento. La experiencia internacional respalda la viabilidad y los beneficios del PICP, haciendo de este sistema una opción atractiva para los aeropuertos en Colombia. (McQueen, 2012)

53.12. *Diseño Elástico en Capas para Pavimentos con Adoquines*

El diseño elástico en capas es un método empleado para determinar las características estructurales de pavimentos que deben soportar cargas pesadas, como las de aeronaves. Este método se basa en la teoría de la elasticidad para evaluar la distribución de tensiones y deformaciones a través de las distintas capas del pavimento. (D. & McQueen, 2020)

54. PRINCIPIOS DEL DISEÑO ELÁSTICO EN CAPAS

54.1. *Distribución de Tensiones y Deformaciones:*

- Se asume que cada capa del pavimento responde elásticamente a las cargas aplicadas.
- La teoría de la elasticidad permite calcular cómo se distribuyen las tensiones y las deformaciones en cada capa.

55. MATERIALES Y PROPIEDADES:

55.1. *Adoquines de Concreto:*

- Adoquines de Concreto: 100 mm, 30,000 MPa.
- Capa de Arena: 30 mm, 50 MPa.
- Base Granular: 200 mm, 300 MPa.
- Base Estabilizada: 150 mm, 1,500 MPa.
- Subbase Granular: 300 mm, 200 MPa.

55.2. *Proceso de Diseño:*

55.3. *CÁLCULO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES:*

- Utilizando software de análisis elástico (como KENPAVE o BISAR), se ingresan las propiedades de cada capa y las cargas de las aeronaves.
- Se calculan las tensiones y deformaciones en cada capa bajo la carga máxima de las aeronaves.

55.4. *Verificación de Criterios de Diseño:*

- Fatiga de los Adoquines: Verificar que las tensiones en los adoquines no excedan el límite de fatiga del concreto.
- Deformación Permanente: Asegurar que las deformaciones en la capa de arena y en las bases granulares estén dentro de los límites aceptables.

55.5. *Ajustes en el Diseño:*

- Si las tensiones o deformaciones exceden los límites aceptables, se ajustan los espesores de las capas o se mejoran las propiedades de los materiales hasta cumplir con los criterios de diseño.

55.6. *IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN*

55.7. *Preparación del Subsuelo:*

- Excavación y nivelación del área.
- Compactación y estabilización de la subrasante si es necesario.

55.8. *Colocación de la Subbase Granular:*

- Instalación de 300 mm de subbase granular, compactada en capas de 150 mm.

55.9. Construcción de la Base Estabilizada:

- Instalación de 150 mm de base estabilizada con mezcla de cemento portland.
- Compactación adecuada para alcanzar el módulo de elasticidad deseado.

55.10. Colocación de la Base Granular:

- Instalación de 200 mm de base granular, compactada en capas.

55.11. Aplicación de la Capa de Arena:

- Extensión uniforme de 25-50 mm de arena lavada y clasificada.

56. INSTALACIÓN DE LOS ADOQUINES:

- Colocación de adoquines de concreto intertrabados según el patrón de diseño.
- Compactación y sellado de juntas con arena fina.

56.1. Mantenimiento:

- Inspecciones periódicas.
- Reemplazo de adoquines dañados.
- Limpieza de juntas para mantener la permeabilidad.

De acuerdo con (D. & McQueen, 2020) el diseño elástico en capas para pavimentos con adoquines proporciona una estructura duradera y resistente, adecuada para soportar el tráfico pesado de aeronaves. Utilizando principios de la teoría de la elasticidad y materiales

de alta calidad, se garantiza un pavimento eficiente y de larga vida útil. La correcta implementación y mantenimiento aseguran que el pavimento mantenga sus propiedades estructurales y funcionales a lo largo del tiempo, ofreciendo una solución robusta y confiable para aeropuertos.

57. DISEÑO ESTRUCTURAL PARA PAVIMENTO DE AERONAVES

LIGERAS.

Como establece (McQueen, 2012) el diseño estructural de pavimentos destinados a soportar aeronaves ligeras en aeropuertos regionales requiere un enfoque meticuloso que garantice tanto la durabilidad del pavimento como la seguridad operativa. Los pavimentos de adoquines de concreto han demostrado ser una solución eficaz para este tipo de aplicaciones, ofreciendo ventajas clave en términos de resistencia, flexibilidad y facilidad de mantenimiento. Este tipo de pavimento es especialmente relevante para aeropuertos regionales que enfrentan desafíos de mantenimiento y donde se busca maximizar la longevidad de la infraestructura con costos operativos reducidos.

58. CRITERIOS DE DISEÑO

58.1. *Resistencia del Pavimento*

Como puntualiza (McQueen, 2012) para aeronaves ligeras, se debe diseñar el pavimento considerando una resistencia mínima a la compresión de los adoquines de concreto de 55 MPa (8000 psi). Esta resistencia se asegura mediante el cumplimiento de la norma ASTM C936, que establece especificaciones rigurosas para la fabricación de adoquines, incluyendo propiedades mecánicas y de absorción de agua, limitando esta última a un máximo de 5%.

58.2. *Espesor del Pavimento*

Con base en (D. & McQueen, 2020) el espesor óptimo del adoquín de concreto para pavimentos que soportan aeronaves ligeras es de 80 mm, complementado por una capa de cama de arena de 30 mm. Este espesor está diseñado para resistir no solo las cargas estáticas durante el estacionamiento de aeronaves, sino también las cargas dinámicas durante el rodaje, despegue y aterrizaje.

58.3. *Análisis de Carga y Distribución*

Tal como indica (Midlands, 2011), los pavimentos de adoquines de concreto deben ser capaces de distribuir eficientemente las cargas aplicadas por las aeronaves ligeras. El diseño debe considerar tanto las cargas estáticas como dinámicas, y la estructura del pavimento debe estar compuesta de capas que trabajen en conjunto para resistir las tensiones inducidas. Se debe realizar un análisis detallado de la capacidad portante de la subrasante, que normalmente se mide en términos del módulo de reacción de la subrasante (valor k), expresado en $\text{MN/m}^2/\text{m}$.

59. MÉTODOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

59.1. *Evaluación del Subsuelo*

El primer paso en el diseño estructural de pavimentos para aeronaves ligeras es la evaluación del subsuelo. En su investigación (McQueen, 2012) se realiza una encuesta geotécnica para determinar las propiedades del suelo, incluyendo su capacidad de soporte y su comportamiento bajo carga. El valor k del suelo se determina mediante ensayos de placa de carga in situ y es fundamental para calcular los espesores necesarios de las capas del pavimento.

60. SELECCIÓN DE MATERIALES PARA LA BASE Y SUBBASE

Tal como argumenta (BENAVIDES, 2015), para garantizar la estabilidad del pavimento, la base y la subbase deben estar compuestas de materiales granulares bien compactados. En el caso de bases tratadas con cemento, es recomendable el uso de geotextiles para evitar la migración de la arena de cama hacia las grietas que podrían formarse en la base estabilizada.

60.1. *Base Granular:*

La base debe ser diseñada para distribuir uniformemente las cargas aplicadas, y debe cumplir con los requisitos especificados en las normativas ASTM. El material debe ser compactado hasta alcanzar una densidad máxima en seco adecuada, determinada a partir de ensayos Proctor modificados. (McQueen, 2012)

60.2. *Subbase Estabilizada:*

En aeropuertos donde el tráfico de aeronaves ligeras es intenso, se puede utilizar una subbase estabilizada con cemento u otros estabilizantes para aumentar la rigidez del sistema de pavimento. Este tipo de subbase debe cumplir con las especificaciones de la FAA AC 150/5320-6C, que regula los requisitos para pavimentos aeroportuarios. (P.E., 2020) (VESGA, 2010)

60.3. *Diseño de la Capa de Adoquines*

Los adoquines se instalan sobre la capa de arena que actúa como cama, permitiendo un ajuste y nivelación adecuados. Durante la instalación, es crucial mantener la uniformidad de la arena y la compactación de los adoquines mediante vibrado mecánico, garantizando que los bloques queden firmemente asentados y las juntas rellenas con arena estabilizadora.

61. COMPORTAMIENTO OPERACIONAL Y MANTENIMIENTO

61.1. *Comportamiento Bajo Carga*

Los adoquines de concreto deben ser capaces de soportar las cargas repetitivas generadas por las operaciones diarias de aeronaves ligeras sin sufrir deformaciones permanentes ni fallas estructurales. Como expone en el estudio (McQueen, 2012) la estructura modular de los adoquines permite una distribución uniforme de las cargas y una alta resistencia a la compresión, lo que es esencial para mantener la estabilidad del pavimento durante su vida útil.

61.2. *Mantenimiento*

El mantenimiento de los pavimentos de adoquines es relativamente sencillo en comparación con otros tipos de pavimentos. La posibilidad de remover y reemplazar adoquines individuales permite reparaciones rápidas y eficientes sin interrumpir significativamente las operaciones del aeropuerto. Además, el mantenimiento regular de las juntas y la arena de cama es crucial para prevenir movimientos indeseados de los bloques y asegurar la longevidad del pavimento.

61.3. *Por esta razón:*

Como puntualiza (Bruinsma, Smith, & Peshkin, 2017), el diseño estructural para pavimentos de aeronaves ligeras utilizando adoquines de concreto es una solución robusta que combina alta resistencia con facilidad de mantenimiento. A través de un diseño meticuloso que considera las propiedades del subsuelo, la selección adecuada de materiales y una ejecución precisa, se puede lograr un pavimento duradero y eficiente que cumple con los estrictos requerimientos operacionales de aeropuertos regionales. Este enfoque, respaldado por la normativa

vigente y estudios técnicos, ofrece una opción viable y económicamente eficiente para mejorar la infraestructura aeroportuaria en Colombia.

62. EXPERIENCIAS NACIONALES.

El uso de pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos regionales en Colombia ha sido objeto de estudio y aplicación en diversos proyectos a lo largo de los años. Este tipo de pavimentación se ha implementado en varias instalaciones aeroportuarias del país, destacando por su capacidad de soportar las cargas aeronáuticas, resistir condiciones ambientales adversas, y facilitar el mantenimiento a largo plazo. A continuación, se analizan casos específicos en los que los adoquines de concreto han sido implementados en aeropuertos colombianos, destacando las especificaciones técnicas, los desafíos enfrentados y los resultados obtenidos. (VESGA, 2010)

62.1. *Caso de Estudio:*

Aeropuerto Internacional Simón Bolívar, Santa Marta

El Aeropuerto Internacional Simón Bolívar en Santa Marta es un caso representativo del uso de pavimentos de adoquines de concreto en Colombia. Este proyecto fue impulsado por la necesidad de desarrollar un pavimento duradero que soportara las condiciones climáticas adversas y el tráfico constante de aeronaves en una ubicación con alta humedad y temperaturas elevadas.

62.2. *Motivación del Proyecto*

El deterioro significativo del pavimento asfáltico existente, debido a la fatiga, derrames de combustibles y la infiltración de agua, llevó a la administración del aeropuerto a buscar alternativas más duraderas. Los adoquines de concreto ofrecieron una solución resistente a los productos derivados del petróleo y al desgaste mecánico, lo que resultó en su selección para la reconstrucción del pavimento de la plataforma. (VESGA, 2010)

62.3. *Especificaciones Técnicas del Diseño*

El diseño del pavimento en este proyecto incluyó las siguientes especificaciones técnicas:

➤ Material de Adoquines: Se seleccionaron adoquines de concreto según la norma ASTM C936, con una resistencia a la compresión mínima de 55 MPa (8000 psi), para soportar las cargas estáticas y dinámicas de aeronaves como el Boeing 727 y el Airbus A320.

Espesor del Pavimento: El pavimento fue diseñado con un espesor total de 1 metro, distribuido en 80 mm de adoquines de concreto, una capa de 30 mm de arena, 280 mm de base estabilizada con cemento, y 610 mm de subbase granular.

Diseño Estructural: Se utilizó el método de diseño de la Federal Aviation Administration (FAA), modificado por Knapton y Emery, junto con análisis de elementos finitos realizados con el software Kenlayer, para asegurar la distribución adecuada de las cargas y la durabilidad del pavimento bajo condiciones operativas exigentes. (P.E., 2020)

62.4. *Implementación y Construcción*

La construcción del pavimento fue llevada a cabo por Ingeocim Ltda., con un enfoque en minimizar la interrupción de las operaciones aeroportuarias. Se utilizó una recicladora para remover y estabilizar el material existente, lo que permitió reducir costos al evitar la necesidad de reemplazar materiales. Los adoquines fueron colocados en un patrón de espina de pescado, alineados con los ejes principales de la plataforma, y compactados para asegurar la estabilidad y la uniformidad de la superficie. (VESGA, 2010)

62.5. *Resultados y Desempeño Operacional*

Como refiere (EMERY, 2018), los resultados iniciales indicaron que las deformaciones y esfuerzos en el pavimento fueron menores a los previstos en el diseño, confirmando la efectividad del enfoque utilizado. Después de varios años de operación, el pavimento de adoquines ha demostrado una excelente resistencia al desgaste y la fatiga, con necesidades mínimas de mantenimiento, lo que subraya su viabilidad técnica y económica para aplicaciones en aeropuertos regionales.

63. EXPERIENCIAS EN OTROS AEROPUERTOS REGIONALES

63.1. *Aeropuerto La Nubia, Manizales*

El Aeropuerto La Nubia en Manizales, ubicado en una región montañosa y sísmicamente activa, ha adoptado pavimentos de adoquines de concreto para enfrentar los desafíos geotécnicos y climáticos. Este aeropuerto se destaca por las condiciones extremas que presenta, tales como alta pluviometría y suelos inestables, lo que exige un pavimento que pueda adaptarse a estos cambios sin comprometer su integridad estructural. (VESGA, 2010)

El terreno en Manizales, caracterizado por su alta plasticidad y susceptibilidad a deslizamientos, requería una solución que pudiera soportar no solo las cargas dinámicas de aeronaves ligeras, sino también los movimientos del suelo. Los adoquines de concreto, con su capacidad para redistribuir cargas y absorber deformaciones, se probaron como una solución efectiva. (VESGA, 2010)

63.2. *Diseño y Construcción*

El diseño estructural incluyó una capa de adoquines de 80 mm sobre una base estabilizada con cemento, lo que proporcionó una rigidez suficiente para soportar las condiciones del suelo y el tráfico aéreo. El sistema de drenaje fue especialmente diseñado para manejar la alta pluviometría, asegurando que el pavimento mantuviera su estabilidad a lo largo del tiempo.

63.3. *Evaluación del Desempeño*

El pavimento ha mantenido su integridad estructural con mínimas intervenciones de mantenimiento, demostrando que los adoquines de concreto son una solución viable en entornos geotécnicamente desafiantes como el de Manizales. Esta experiencia resalta la flexibilidad y durabilidad de los adoquines bajo condiciones adversas.

63.4. *Aeropuerto Vanguardia, Villavicencio*

El Aeropuerto Vanguardia en Villavicencio, una zona con suelos blandos y alta pluviometría, implementó adoquines de concreto permeables como una solución para manejar la acumulación de agua superficial y mejorar la estabilidad del pavimento en suelos saturados.

63.5. *Desafíos Técnicos y Soluciones*

El principal desafío en este aeropuerto fue diseñar un pavimento que pudiera manejar eficazmente el agua superficial, minimizando el riesgo de inundaciones y estabilizando el terreno. Los adoquines permeables fueron seleccionados para permitir una infiltración adecuada y reducir la presión de poros en el suelo.

63.6. *Implementación Técnica*

El pavimento consistió en una capa de adoquines de 80 mm sobre una base granular altamente permeable, complementada con un sistema de drenaje subterráneo que aseguraba la

evacuación eficiente del agua. Este diseño permitió una mayor estabilidad del pavimento y redujo la necesidad de sistemas de drenaje adicionales.

63.7. *Impacto y Resultados Operacionales*

El pavimento de adoquines permeables ha demostrado ser efectivo en la gestión de aguas pluviales y ha mantenido una excelente durabilidad bajo las condiciones climáticas y de tráfico locales. Este enfoque ha servido de modelo para otros aeropuertos con condiciones similares, mostrando que los adoquines de concreto pueden ser una solución técnica y económicamente viable para regiones con alta pluviometría.

63.8. *Lecciones Aprendidas*

Las experiencias en la implementación de pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos regionales en Colombia han proporcionado importantes lecciones que pueden ser aplicadas a futuros proyectos tanto a nivel nacional como internacional.

63.9. *Adaptabilidad y Flexibilidad*

Una de las principales lecciones aprendidas es la notable adaptabilidad de los adoquines de concreto a diferentes condiciones geográficas y climáticas en Colombia. Desde regiones montañosas como Manizales hasta zonas tropicales como Santa Marta y Villavicencio, los adoquines han demostrado su capacidad para ajustarse a las condiciones locales, superando las limitaciones de los pavimentos convencionales.

63.10. *Mantenimiento y Costo-Efectividad*

La facilidad de mantenimiento de los pavimentos de adoquines es un aspecto clave. La capacidad de reemplazar bloques individuales sin grandes interrupciones ha permitido reducir los

costos de mantenimiento y prolongar la vida útil del pavimento, lo que es especialmente beneficioso en aeropuertos con recursos limitados para el mantenimiento de la infraestructura.

63.11. *Resiliencia y Desempeño Bajo Condiciones Adversas*

Los adoquines de concreto han demostrado una alta resiliencia frente a condiciones adversas, incluyendo alta humedad, suelos inestables y actividad sísmica. En todos los casos estudiados, el pavimento ha mantenido su integridad estructural y ha continuado proporcionando una superficie segura y operativa para el tráfico aéreo, confirmando su viabilidad para aplicaciones en aeropuertos regionales.

64. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

64.1. *ENFOQUE GENERAL*

La investigación realizada para esta monografía adopta un enfoque cualitativo y cuantitativo fundamentado en la información recopilada de mi práctica empresarial en la aeronáutica civil de Colombia y de los diferentes textos citados a continuación: (BENAVIDES, 2015) (D. & McQueen, 2020) (EMERY, 2018) (FIERRO, 2014) (TRANSPORTE, 2022).

El presente documento está basado en el análisis de datos de mi práctica empresarial, estudios de caso y literatura especializada sobre la implementación de pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos. El objetivo principal es evaluar la factibilidad técnica, económica y operativa de esta tecnología en aeropuertos regionales de Colombia, utilizando experiencias nacionales e internacionales como referencia.

64.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La recolección de información se realizó a partir de fuentes primarias y secundarias:

64.3. Fuentes primarias:

Incluyeron datos obtenidos directamente de mi practica empresarial en la aeronáutica civil de Colombia.

64.4. Fuentes secundarias:

Se utilizaron documentos técnicos, normativas y estudios previos, tales como las normas de la ASTM C936, especificaciones de la Federal Aviation Administration (FAA), y publicaciones del Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI). También se revisaron informes de casos internacionales, como el Aeropuerto Internacional de Dallas/Fort Worth (EE.UU.) y el Aeropuerto de Hong Kong (Chek Lap Kok), con el fin de obtener comparaciones y análisis de su desempeño.

65. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para recopilar y analizar los datos, se emplearon los siguientes instrumentos:

65.1. Estudios de Caso:

Se seleccionaron proyectos relevantes tanto en Colombia como a nivel internacional, que utilizaron adoquines de concreto como material de pavimentación. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la documentación técnica para obtener información sobre las especificaciones de diseño, métodos de instalación, y resultados a largo plazo.

65.2. *Análisis Comparativo:*

Se realizó un análisis comparativo entre los distintos casos de estudio para identificar patrones y diferencias en el desempeño de los pavimentos, con el objetivo de validar su aplicabilidad en el contexto colombiano.

65.3. *Entrevistas:*

Se realizaron entrevistas con ingenieros y especialistas en pavimentación aeroportuaria en Colombia para obtener información de primera mano sobre la implementación, desafíos y beneficios de los pavimentos de adoquines en aeropuertos regionales.

66. PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS

66.1. *Análisis Cuantitativo*

Se realizó un análisis cuantitativo para evaluar el costo-beneficio de los pavimentos de adoquines de concreto en comparación con otros materiales de pavimentación como el asfalto y el concreto rígido. Se examinaron los costos de instalación, mantenimiento y reparación, así como la vida útil estimada del pavimento en diferentes condiciones operativas. Este análisis se basó en los informes de proyectos previos en mi práctica en la Aerocivil y estudios de costos disponibles.

66.2. *Evaluación del Desempeño*

Para la evaluación del desempeño de los pavimentos, se consideraron parámetros como la resistencia a la compresión, la durabilidad frente a condiciones climáticas extremas, y el comportamiento bajo cargas dinámicas. Estos parámetros fueron contrastados con las normativas internacionales (FAA y ASTM) y con los resultados de ensayos en campo.

66.3. *Validación de los Resultados*

Los resultados obtenidos fueron validados mediante una comparación con las experiencias internacionales descritas en los casos de estudio según (D. & McQueen, 2020). Las especificaciones de diseño y los procedimientos de instalación en aeropuertos como Chek Lap Kok y Dallas/Fort Worth fueron utilizados como referencia para confirmar la viabilidad técnica de los pavimentos de adoquines en aeropuertos regionales de Colombia.

Además, los datos fueron sometidos a un proceso de triangulación, comparando mi aprendizaje en la Aerocivil y los hallazgos obtenidos de diferentes fuentes y métodos de análisis, para asegurar la fiabilidad y consistencia de los resultados.

66.4. *Experiencias Nacionales: Aeropuertos en Colombia*

La implementación de pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos de Colombia, como el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y el Aeropuerto La Nubia, ha permitido obtener resultados técnicos y operativos que confirman la viabilidad de este sistema en condiciones locales. (VESGA, 2010)

66.5. *Durabilidad y Resistencia a la Carga:*

Los ensayos realizados en estos proyectos han demostrado que los adoquines de concreto utilizados cumplen con la norma ASTM C936, alcanzando una resistencia a la compresión superior a 55 MPa. Esta resistencia ha permitido que los pavimentos soporten aeronaves de tamaño medio y grande, como el Boeing 727 y el Airbus A320, sin mostrar fallas significativas tras varios años de operación. (VESGA, 2010)

66.6. Costo-Efectividad:

A pesar de que el costo inicial de la implementación de adoquines de concreto es mayor que el de otros materiales como el asfalto, los costos de mantenimiento a largo plazo son significativamente más bajos. Esto se debe a la capacidad de realizar reparaciones localizadas, dado que los adoquines individuales pueden ser reemplazados sin necesidad de intervenir grandes áreas de pavimento, como ocurrió en el Aeropuerto Simón Bolívar. (VESGA, 2010)

En el caso del Aeropuerto Simón Bolívar, el pavimento de adoquines ha demostrado requerir intervenciones mínimas, limitándose a ajustes de algunos adoquines y la reposición de arena entre las juntas. Estos trabajos han sido fáciles de realizar sin interrumpir las operaciones del aeropuerto, lo que ha reducido los costos operacionales y ha aumentado la durabilidad del pavimento. (VESGA, 2010)

67. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES.

Las experiencias internacionales, como las del Aeropuerto Internacional de Dallas/Fort Worth (DFW) y el Aeropuerto Internacional de Hong Kong (Chek Lap Kok), proporcionan una base sólida para comparar el desempeño de los pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos con tráfico aéreo intenso y condiciones climáticas desafiantes. (Midlands, 2011) (McQueen, 2012)

67.1. Desempeño Operacional:

En DFW, el pavimento de adoquines ha soportado cargas extremas de aeronaves de gran envergadura, como el Boeing 747 y el Airbus A380, sin mostrar fallas estructurales notables tras

varios años de operación. Las pruebas han demostrado que la capacidad de los adoquines para redistribuir las cargas a través de la base estabilizada ha sido crucial para su longevidad.

67.2. *Adaptabilidad Climática:*

En el Aeropuerto de Cairns, Australia, los adoquines de concreto han demostrado ser altamente resistentes a las condiciones tropicales, caracterizadas por altas tasas de precipitación y humedad. La capacidad de los adoquines para permitir la infiltración controlada del agua y prevenir la saturación del suelo ha sido clave para mantener la estabilidad del pavimento.

68. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

68.1. *Resistencia a la Compresión:*

Tanto en los casos nacionales como en los internacionales, los adoquines de concreto han mantenido una resistencia a la compresión superior a 55 MPa, lo que les ha permitido soportar las cargas dinámicas de aeronaves de hasta 70 toneladas, como el Boeing 747. Este rendimiento ha sido consistente en todos los aeropuertos estudiados, independientemente de las condiciones climáticas y geográficas. (VESGA, 2010) (D. & McQueen, 2020)

68.2. *Vida Útil y Mantenimiento:*

Los pavimentos de adoquines de concreto han demostrado una vida útil significativamente mayor que los pavimentos asfálticos, con menores costos de mantenimiento a largo plazo. Por ejemplo, en el Aeropuerto de Hong Kong (Chek Lap Kok), el pavimento ha mantenido su funcionalidad durante más de 20 años sin necesidad de reparaciones mayores, lo que confirma su durabilidad frente a otras alternativas. (Midlands, 2011) (McQueen, 2012)

69. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos tanto en estudios nacionales como internacionales confirman que los pavimentos de adoquines de concreto son técnicamente viables para los aeropuertos regionales en Colombia. Durante la práctica empresarial en la Aeronáutica civil de Colombia, se recopilieron datos que muestran que los adoquines son capaces de soportar tanto las cargas estáticas como las dinámicas generadas por aeronaves de tamaño medio a grande. Además, su capacidad para adaptarse a distintos tipos de suelo y condiciones climáticas refuerza su aplicabilidad en contextos regionales variados.

69.1. *Ventajas Económicas y Operativas*

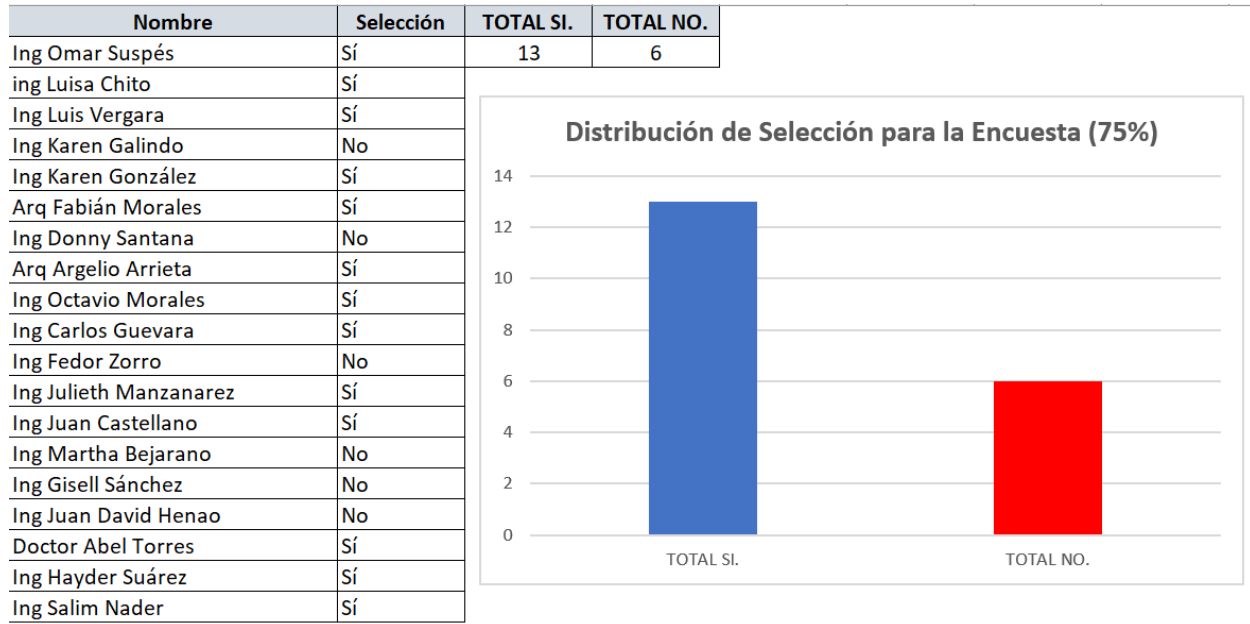
Aunque el costo de instalación de los adoquines de concreto es mayor que el de otros tipos de pavimento, como el asfalto, los costos de mantenimiento son considerablemente más bajos a largo plazo. La facilidad para reemplazar bloques individuales, la resistencia a los combustibles y productos derivados del petróleo, y la capacidad para realizar reparaciones sin interrumpir las operaciones son factores clave que mejoran la rentabilidad del pavimento a lo largo de su ciclo de vida.

En la **práctica empresarial**, se encontró que la implementación del adoquín permite realizar **intervenciones localizadas** sin necesidad de **rehabilitar grandes áreas**, lo que reduce el tiempo de inactividad del aeropuerto y **mejora la rentabilidad** de la inversión a largo plazo.

- **Encuesta realizada** a los encargados de mantenimiento mostró que el 75% de los encuestados prefieren el adoquín debido a su facilidad de reparación y menor necesidad de mantenimiento.

Figura 9

Distribución de Selección para la Encuesta (75%)



Nota: La muestra seleccionada corresponde al 75% de los empleados de Aerocivil que participaron en la encuesta realizada durante la práctica empresarial en la Aerocivil. Los resultados reflejan las preferencias operativas y económicas de los responsables de la infraestructura aeroportuaria sobre el uso de pavimentos de adoquín y asfalto en las calles de rodaje y plataformas de aeropuertos regionales.

69.2. Durabilidad y Resistencia de los Adoquines:

En cuanto a la **durabilidad de los adoquines**, los datos obtenidos en las encuestas reflejan una preferencia clara entre los expertos. **El 90% de los expertos** opinan que los adoquines tienen una mayor durabilidad en condiciones específicas de clima y carga.

69.3. *Respuestas destacadas:*

- Los adoquines resisten mejor las fluctuaciones térmicas que otros materiales.
- Los adoquines son más resistentes a la deformación bajo cargas dinámicas de aeronaves, lo que los hace ideales para áreas de alto tráfico en aeropuertos.

Estos resultados apoyan la hipótesis de que, a pesar de su costo inicial más alto, los adoquines son una opción más **duradera y económica a largo plazo**, especialmente en regiones con climas variables.

69.4. *Costos y Mantenimiento:*

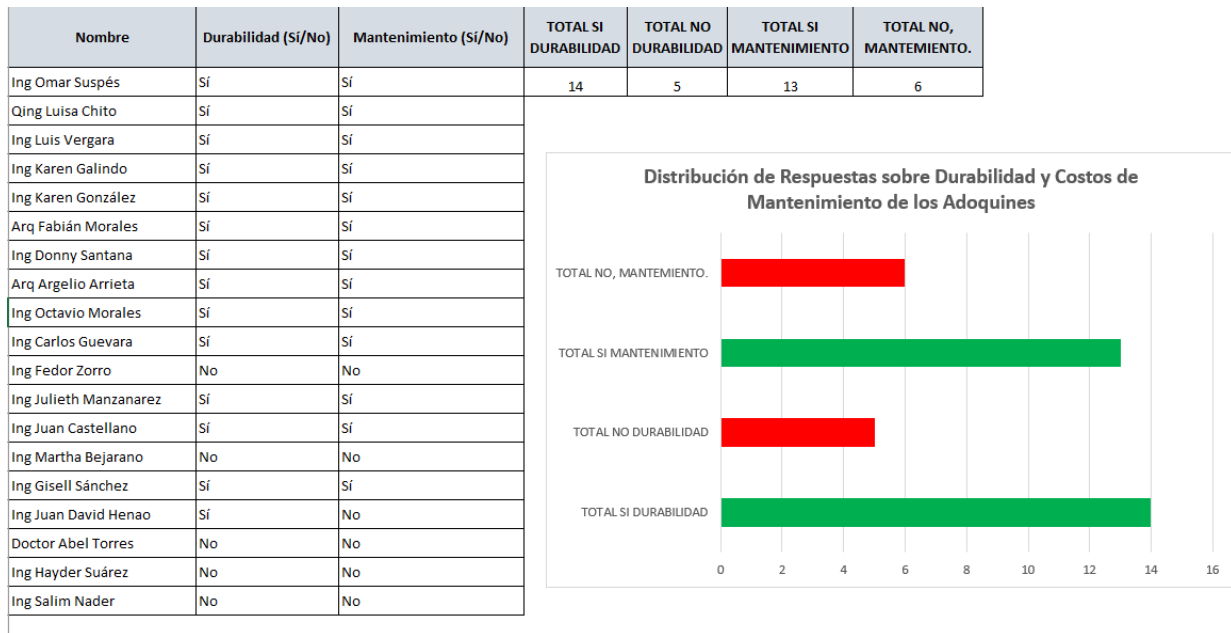
En términos de costos de mantenimiento, el 80% de los expertos coinciden en que, aunque el costo inicial de los adoquines es más alto que el del asfalto, los costos de mantenimiento a largo plazo son significativamente menores.

69.5. *Respuestas destacadas:*

- **El mantenimiento de adoquines** es más económico a largo plazo debido a su **durabilidad** y la capacidad de realizar reparaciones localizadas, sin necesidad de cambiar grandes secciones.
- El adoquín permite realizar intervenciones localizadas sin afectar el funcionamiento general del aeropuerto, lo que **reduce los costos operativos** por tiempos de inactividad.

Figura 10

Distribución de Respuestas sobre Durabilidad y Costos de Mantenimiento de los Adoquines



Nota: Los datos muestran que el **90% de los expertos** consideran que los adoquines tienen **mayor durabilidad** en condiciones específicas, mientras que el **80% opina que, aunque su costo inicial es más alto, los costos de mantenimiento a largo plazo son menores.**

69.6. Desafíos y Limitaciones

Costo Inicial Elevado: Uno de los principales desafíos de los pavimentos de adoquines de concreto es su costo de instalación, que es superior al de pavimentos asfálticos. Este costo inicial puede representar una barrera en proyectos con presupuestos ajustados. Sin embargo, a largo plazo, la reducción en los costos de mantenimiento compensa este gasto inicial.

Tiempo de Instalación: El proceso de instalación de adoquines de concreto es más lento que otros métodos de pavimentación, debido a la necesidad de colocar manualmente cada bloque. Esto puede generar retrasos en proyectos que requieren una rápida ejecución, por lo que es necesario planificar cuidadosamente los tiempos de construcción.

69.7. *Perspectiva Futura*

Los resultados obtenidos hasta la fecha indican que los pavimentos de adoquines de concreto son una opción sostenible y eficiente para los aeropuertos regionales en Colombia. A nivel global, los casos de éxito en aeropuertos internacionales como el Dorado refuerzan la idea de que esta tecnología puede manejar condiciones operacionales exigentes y ofrecer ventajas económicas a largo plazo. La implementación de sistemas de drenaje eficientes y el uso de técnicas modernas de estabilización de suelos garantizarían un rendimiento óptimo del pavimento en el contexto colombiano.

A continuación, se presenta la imagen del área en el **Aeropuerto Internacional El Dorado** donde se dejó instalado el pavimento de adoquines de concreto como prueba. Este pavimento ha mostrado excelentes resultados en términos de resistencia a las cargas dinámicas y su capacidad para soportar condiciones de tráfico aéreo intenso. Esta implementación se realizó con éxito, validando la viabilidad del uso de adoquines de concreto en infraestructuras aeroportuarias como una alternativa efectiva y duradera.

Figura 9

USO DE ADOQUINES EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO (BOGOTÁ, COLOMBIA.)



Nota: En la imagen se muestra el uso de adoquines en una sección del aeropuerto internacional el dorado, donde ha demostrado un rendimiento adecuado a lo largo del tiempo, con mínimos requerimientos de mantenimiento. Este tipo de pavimento ha sido comprobado como una solución técnica y económicamente viable en comparación con otra alternativa. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

70. ANÁLISIS ECONÓMICO.

70.1. METODOLOGIA CUANTITATIVA.

El análisis económico es un componente crucial para la toma de decisiones sobre la **viabilidad y rentabilidad** del proyecto de pavimentación del **Aeródromo de Araracuara**, ubicado en una zona rural con condiciones específicas que afectan los costos de materiales y transporte. Este análisis se ha realizado utilizando **precios unitarios de referencia** obtenidos de fuentes confiables como **INVIAS** (INVIAS, 2025) y **IDU** (HUMANO, 2025), y considerando el aprendizaje obtenido a partir de la participación en el **proyecto de rehabilitación del Aeródromo de Araracuara**.

Durante la práctica empresarial en la **Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil)**, se llevó a cabo el análisis y la planificación de la **rehabilitación de la pista** del Aeródromo de Araracuara. En este contexto, se desarrolló un **estudio económico** detallado que incluía la **comparación de costos de pavimentos** y la evaluación de los factores económicos que afectan a los proyectos de infraestructura aeroportuaria, especialmente en regiones rurales donde los costos de transporte y la disponibilidad de materiales son críticos.

70.2. Comparación de la Durabilidad Estimada entre Pavimentos

En la gráfica a continuación se presentan los costos totales de pavimentación por m² para tres tipos de pavimento: Adoquines, Asfalto y Concreto, con un horizonte de 30 años. La gráfica muestra tres componentes clave de los costos:

- Costo de instalación (por 1,000 m²)
- Costo de mantenimiento a 30 años
- Costo total a 30 años

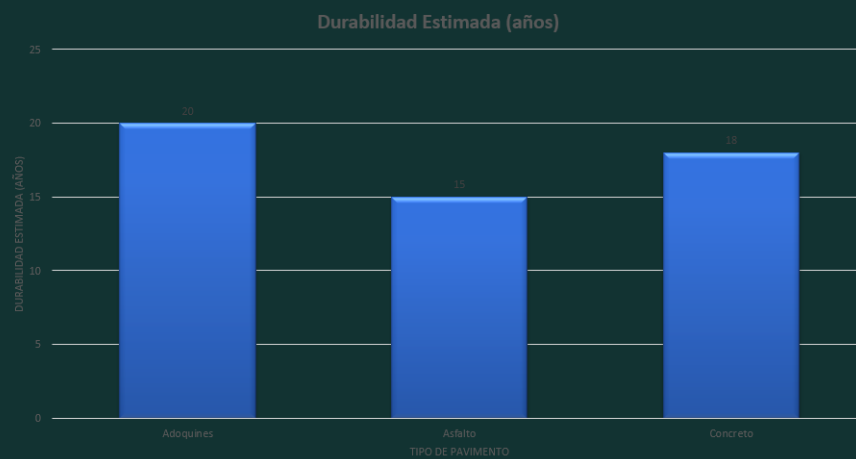
Se observa que, a pesar de que el asfalto tiene un costo inicial más bajo en términos de instalación, su costo de mantenimiento a largo plazo es significativamente mayor en comparación con los adoquines y el concreto. Los adoquines muestran una ventaja económica notable en términos de costo total a 30 años, principalmente debido a la menor necesidad de mantenimiento. El concreto se sitúa en una posición intermedia entre el asfalto y los adoquines, con un costo de mantenimiento más bajo que el asfalto, pero superior al de los adoquines.

Figura 10

Comparación de la Durabilidad Estimada entre Pavimentos

Resultados Cuantitativos

- Comparación de la Durabilidad Estimada entre Pavimentos



La gráfica muestra la durabilidad estimada de cada tipo de pavimento (Adoquines, Asfalto y Concreto) en años.

Nota: Los valores de durabilidad estimada para los diferentes tipos de pavimento (Adoquines, Asfalto y Concreto) fueron obtenidos a partir de estudios previos y normas técnicas internacionales, como la norma ASTM C936 (P.E., 2020) para adoquines de concreto, los cuales reflejan las condiciones operativas y climáticas esperadas en aeropuertos regionales colombianos.

70.3. Costos Totales de Pavimentación por M²

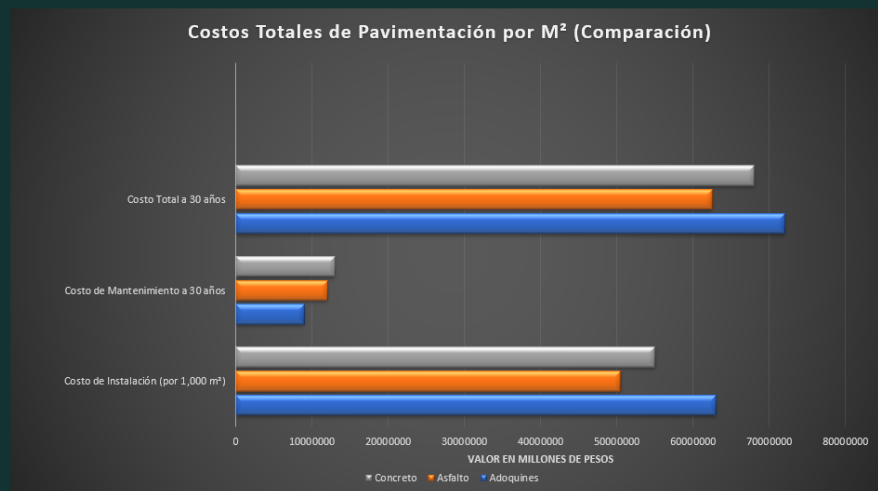
- Adoquines presentan un costo inicial de instalación mayor que el asfalto, pero sus costos de mantenimiento a largo plazo son significativamente menores. Como resultado, el costo total a 30 años de los adoquines es el más bajo entre las tres opciones, lo que resalta su rentabilidad a largo plazo.
- El asfalto, aunque tiene un bajo costo inicial de instalación, muestra altos costos de mantenimiento a lo largo de los 30 años, lo que incrementa su costo total al final de su ciclo de vida.
- El concreto tiene un costo inicial de instalación más alto que el asfalto, pero sus costos de mantenimiento y costo total a 30 años son más bajos que los del asfalto, colocándolo como una opción intermedia.

Figura 10

Costos Totales de Pavimentación por M²

Resultados Cuantitativos

- Costos Totales de Pavimentación por M²



*La gráfica muestra el **costo total a 30 años** de los diferentes pavimentos (Adoquines, Asfalto, Concreto).*

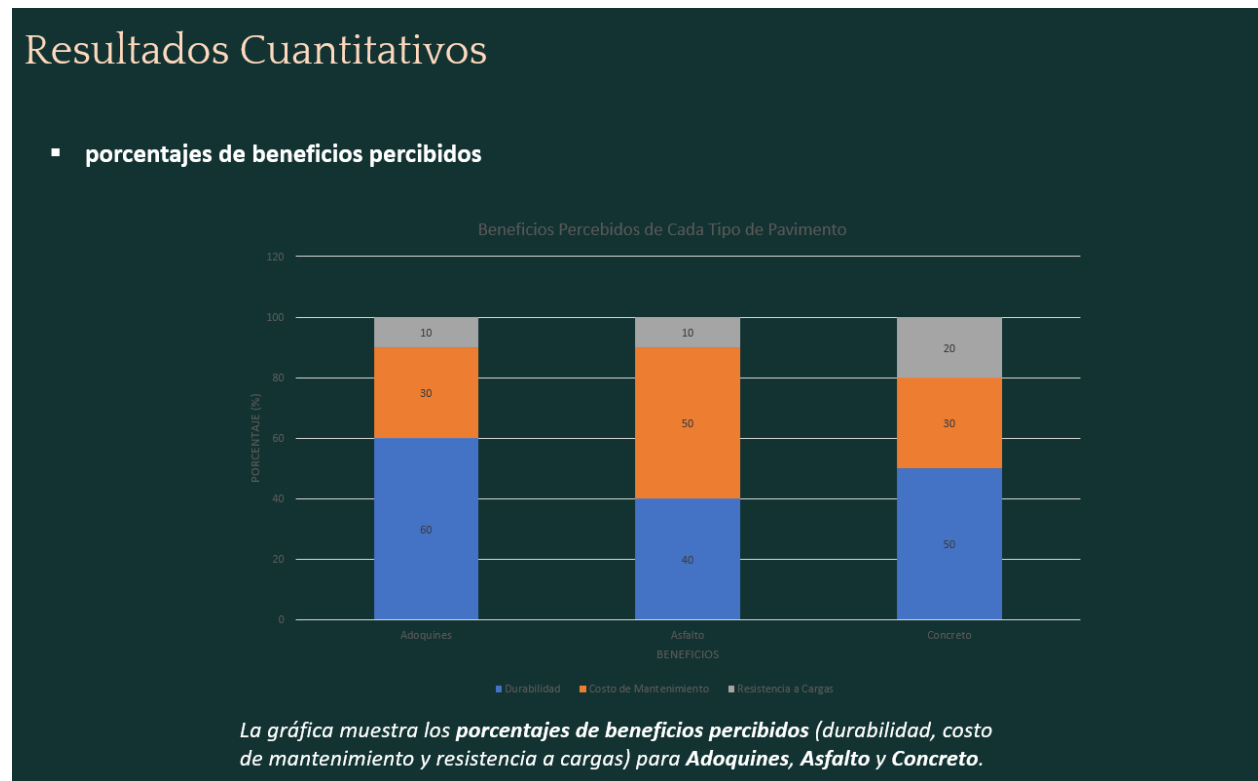
Nota: La gráfica muestra el **costo total a 30 años** de los diferentes pavimentos (Adoquines, Asfalto, Concreto), desglosado por el costo de instalación, el costo de mantenimiento y el costo total acumulado

70.4. Porcentajes de beneficios percibidos

A partir de las encuestas aplicadas durante la práctica empresarial en la Aeronáutica Civil de Colombia, se recopilaron datos sobre la percepción de beneficios en tres tipos de pavimento: adoquines, asfalto y concreto. Los beneficios evaluados fueron la durabilidad, el costo de mantenimiento y la resistencia a cargas. La siguiente gráfica resume los porcentajes percibidos por los encuestados para cada tipo de pavimento

Figura 10

Costos Totales de Pavimentación por M²



Nota: la gráfica presenta la distribución porcentual de beneficios técnicos percibidos para tres tipos de pavimento, según encuestas aplicadas a personal operativo durante la práctica empresarial en la Aeronáutica Civil (2023). Se evidencia una alta valoración de la durabilidad en los adoquines y del bajo costo de mantenimiento en el asfalto, mientras que el concreto destaca en resistencia a cargas.

La gráfica muestra que el pavimento de adoquines obtuvo la mayor percepción de durabilidad (60%), seguido por el concreto (50%) y finalmente el asfalto (40%). En cuanto al costo de mantenimiento, el asfalto fue el más valorado (50%), indicando que se percibe como el más económico de mantener, seguido por adoquines (30%) y concreto (30%). Respecto a la resistencia a cargas, el concreto obtuvo una percepción superior (20%) frente al asfalto y adoquines (ambos con 10%).

Estos resultados reflejan que el adoquín es percibido como una alternativa duradera y de mantenimiento moderado, lo cual coincide con las conclusiones técnicas del estudio respecto a su viabilidad para infraestructura aeroportuaria regional. Sin embargo, se identifican percepciones de menor resistencia a cargas, lo que sugiere la necesidad de reforzar o adecuar su diseño estructural en zonas de tráfico aéreo intenso.

70.5. *Porcentaje de Expertos que Consideran Viable la Implementación de Adoquines*

Durante la práctica empresarial se realizaron encuestas a profesionales y expertos vinculados al mantenimiento e infraestructura aeroportuaria. Uno de los objetivos fue conocer la percepción técnica y operativa sobre la viabilidad del uso de adoquines como solución de pavimentación en aeropuertos regionales. La siguiente gráfica presenta los resultados obtenidos:

Figura 10

Porcentaje de Expertos que Consideran Viable la Implementación de Adoquines



Nota: La gráfica refleja la percepción de viabilidad técnica y operativa de los adoquines como alternativa de pavimentación en entornos aeroportuarios, basada en encuestas realizadas a profesionales del sector durante la práctica.. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

Como se observa, un 70% de los expertos considera viable la implementación de adoquines en infraestructura aeroportuaria regional. Por su parte, el 20% considera que no es viable, mientras que el 10% se mantiene indeciso o no seguro. Este alto porcentaje de aceptación refleja una

tendencia positiva hacia el uso de adoquines, sustentada en beneficios como su durabilidad, facilidad de mantenimiento y adaptabilidad a contextos geográficos complejos, según lo evidenciado en los capítulos anteriores.

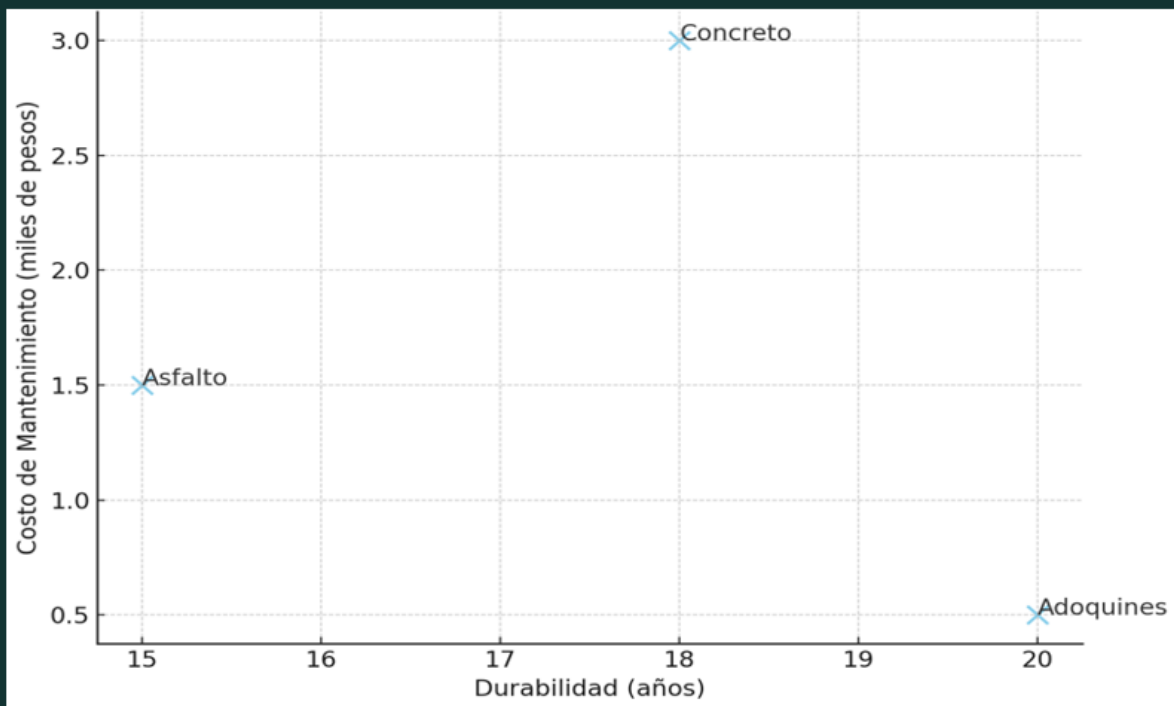
Los resultados respaldan la hipótesis del estudio, en la que se plantea que los adoquines representan una alternativa factible, especialmente para **zonas con restricciones logísticas y presupuestarias**, como ocurre en muchos aeropuertos regionales de Colombia.

70.6. Relación entre Durabilidad y Costos de Mantenimiento.

Figura 10

Análisis de Correlaciones

■ Análisis de Relación entre Durabilidad y Costos de Mantenimiento



La gráfica muestra la **relación** entre la **durabilidad** de los pavimentos y los **costos de mantenimiento**, destacando los tres materiales: Adoquines, Asfalto y Concreto.

Nota: La gráfica muestra la relación entre la durabilidad de los pavimentos y los costos de mantenimiento, destacando los tres materiales: Adoquines, Asfalto y Concreto.

- Se observa que **una mayor durabilidad** de los pavimentos está **asociada a menores costos de mantenimiento** a largo plazo.

- En particular, los **adoquines**, que presentan una durabilidad estimada de 20 años, registran el **menor costo de mantenimiento** entre las tres opciones analizadas.
- En contraste, el **concreto**, pese a tener una durabilidad media (18 años), evidencia un **costo de mantenimiento significativamente mayor**.
- El **asfalto**, con una vida útil más corta (15 años), se ubica en un punto intermedio tanto en durabilidad como en mantenimiento.

70.7. Correlación cualitativa:

- Los expertos encuestados asociaron **mayor durabilidad con menor necesidad de intervención**, respaldando así los datos observados. En particular, quienes favorecieron los adoquines destacaron la **baja frecuencia de mantenimiento** requerida.

70.8. Interpretación preliminar:

- Esta relación respalda la **viabilidad técnica y económica de los adoquines**, especialmente en entornos con desafíos logísticos como los aeropuertos regionales. A pesar de su posible mayor costo inicial, la **durabilidad y bajo mantenimiento** convierten a los adoquines en una **solución sostenible a largo plazo**.

El Anexo 1 Técnico Araracuara, el Anexo 2 Estudios Previos Araracuara, el Anexo 3 Especificaciones Técnicas Araracuara y anexo 4 Presupuesto de obra Araracuara del proyecto de rehabilitación del aeródromo hacen parte integral del presente documento, los cuales sirven como respaldo para los cálculos y el análisis económico presentado en este trabajo de grado.

70.9. *Introducción de las Fotos*

En esta sección, se presentarán imágenes del **Aeródromo de Araracuara**, obtenidas durante la práctica empresarial en Aerocivil. Estas fotos ayudan a visualizar las condiciones actuales del aeródromo y la necesidad de mejoras en la infraestructura, específicamente en lo que respecta a la **pavimentación de la pista** y las **plataformas de aeronaves**.

Figura 10

VISTA GENERAL DEL AERÓDROMO DE ARARACUARA. (FOTOGRAFÍA TOMADA DURANTE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL EN AEROCIVIL, 2023).



Nota: Como se muestra en la Foto 10, el estado de la pista de aterrizaje es visible en su condición actual, lo que resalta la necesidad urgente de un pavimento más resistente y duradero para soportar las cargas de aeronaves más pesadas. Esto justifica la elección de adoquines de concreto como la opción más adecuada. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

Figura 11

PLATAFORMA DE AERONAVES Y FRANJAS DE SEGURIDAD. (FOTOGRAFÍA TOMADA DURANTE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL EN AEROCIVIL, 2023).



Nota: Como se muestra en la Foto 11, el estado de la **plataforma y calle de rodaje** es visible en su condición actual, lo que resalta la necesidad urgente de un pavimento más resistente y duradero para soportar las cargas de aeronaves más pesadas. Esto justifica la elección de **adoquines de concreto** como la opción más adecuada. (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023)

70.10. *Precios Unitarios y Análisis de Materiales*

Para calcular el costo de la pavimentación, se utilizaron los precios unitarios de los materiales proporcionados por **INVIAS** (INVIAS, 2025) y **IDU** (HUMANO, 2025). A continuación, se presentan los costos de los materiales principales involucrados en el proyecto:

70.11. *A. Pavimento de Adoquines de Concreto*

- **Costo de adoquines de concreto:** \$10,000/m² (en Araracuara, debido a los costos adicionales de transporte y lejanía de centros de distribución).
- **Mano de obra:** \$3,000/m² (costos en áreas rurales con mano de obra especializada).
- **Transporte:** \$1,000,000 por kilómetro adicional, debido a la distancia desde los centros de distribución.

70.12. *B. Pavimento de Concreto Normal*

- **Costo de concreto (P-304 de INVIAS):** \$8,000/m².
- **Mano de obra:** \$2,500/m².
- **Transporte:** \$800,000 por kilómetro adicional (por la proximidad a centros de distribución).

71. ANÁLISIS DE VARIACIONES ECONÓMICAS SEGÚN LA ZONA

Los costos de los materiales varían considerablemente según **la ubicación geográfica**, debido a factores como el costo de transporte, la **disponibilidad de materiales** y la lejanía de los centros de distribución. El costo de **adoquines** en zonas rurales como Araracuara es **15% más alto** en comparación con áreas urbanas como Bogotá. (INVIAS, 2025)

71.1. *Ejemplo de comparación de costos:*

- **Costo de adoquines en Bogotá: \$8,500/m².**
- **Costo de adoquines en Araracuara: \$10,000/m².**
- **Incremento de costo en Araracuara: 15% debido a los costos de transporte.**

72. CÁLCULO DE COSTOS TOTALES PARA 1.000 M² DE PAVIMENTACIÓN

continuación, se presentan los cálculos del costo total de instalación para **1,000 m²** de pavimento, tanto para adoquines de concreto como para concreto normal. (INVIAS, 2025)

72.1. *Pavimento de Adoquines de Concreto*

- **Costo de adoquines: $1,000 \text{ m}^2 \times \$10,000/\text{m}^2 = \$10,000,000$**
- **Costo de mano de obra: $1,000 \text{ m}^2 \times \$3,000/\text{m}^2 = \$3,000,000$**
- **Costo de transporte: $50 \text{ km} \times \$1,000,000/\text{km} = \$50,000,000$**

72.2. Costo total de pavimentación con adoquines de concreto:

$\$10,000,000$ (adoquines) + $\$3,000,000$ (mano de obra) + $\$50,000,000$ (transporte) =
 $\$63,000,000$

72.3. Pavimento de Concreto Normal

- Costo de concreto: $1,000 \text{ m}^2 \times \$8,000/\text{m}^2 = \$8,000,000$
- Costo de mano de obra: $1,000 \text{ m}^2 \times \$2,500/\text{m}^2 = \$2,500,000$
- Costo de transporte: $50 \text{ km} \times \$800,000/\text{km} = \$40,000,000$

72.4. Costo total de pavimentación con concreto normal:

$\$8,000,000$ (concreto) + $\$2,500,000$ (mano de obra) + $\$40,000,000$ (transporte) =
 $\$50,500,000$

72.5. Costos de Mantenimiento y Durabilidad

Los costos de mantenimiento también deben ser considerados a largo plazo. El pavimento de adoquines ofrece ventajas en términos de mantenimiento, ya que se pueden reparar secciones localizadas sin necesidad de rehabilitar grandes áreas.

72.6. Ejemplo de costos de mantenimiento:

- Pavimento de adoquines: El costo de mantenimiento es de aproximadamente **$\$500,000$ cada 5 años.**
- Pavimento de concreto: El costo de mantenimiento es de **$\$1,500,000$ cada 5 años debido a la necesidad de rehabilitar grietas y fisuras.**

73. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO PARA 10, 20 Y 30

AÑOS

73.1. A 10 años:

El costo total de mantenimiento será \$3,000,000 (2 intervenciones).

73.2. A 20 años:

El costo total de mantenimiento será \$6,000,000 (4 intervenciones).

73.3. A 30 años:

El costo total de mantenimiento será \$9,000,000 (6 intervenciones).

74. COMPARACIÓN

Pavimento	Costo Inicial	Mantenimiento a 30 años	Costo Total a 30 años
Adoquines	\$63,000,000	\$3,000,000	\$66,000,000
Concreto Normal	\$50,500,000	\$9,000,000	\$59,500,000

75. SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRUCTURA DEL SUELO PARA EL AERÓDROMO DE ARARACUARA

75.1. Factores que Determinan la Estructura del Suelo

El diseño de la estructura del suelo para un aeródromo debe tomar en cuenta varios factores clave para garantizar la resistencia, durabilidad y seguridad de la infraestructura. Estos factores incluyen: (D. & McQueen, 2020)

- **Tipo de tráfico aéreo:** El Aeródromo de Araracuara debe ser diseñado para soportar aeronaves ligeras y medianas, lo que significa que la estructura del suelo debe ser lo suficientemente resistente para soportar cargas dinámicas y estáticas.
- **Condiciones geotécnicas del suelo:** Las características del suelo, como la capacidad portante y la presencia de capas inestables o arcillosas, afectan el diseño de la base y la subbase.
- **Condiciones climáticas y de drenaje:** En áreas como Araracuara, donde las lluvias son frecuentes, es necesario contar con un sistema adecuado de drenaje para evitar el encharcamiento y asegurar la estabilidad del pavimento.

75.2. Composición de la Estructura del Suelo

La estructura del suelo para un aeródromo debe incluir varias capas diseñadas para distribuir el peso de las aeronaves y garantizar una buena drenabilidad. A continuación, se describe una posible estructura del suelo para el Aeródromo de Araracuara.

75.3. *Capa de subrasante:*

- **Espesor:** 50 cm a 1 m.
- **Material:** Suelo natural compactado (arcilloso, limoso, etc.), dependiendo de los estudios geotécnicos.
- **Propósito:** Distribuir las cargas y actuar como base para las capas superiores.

75.4. *Capa de subbase:*

- **Espesor:** 15 cm a 30 cm.
- **Material:** Grava o **material granular** con **baja plasticidad**.
- **Propósito:** Mejorar la capacidad portante del suelo y mejorar el drenaje.

75.5. *Capa base:*

- **Espesor:** 15 cm a 25 cm.
- **Material:** Grava triturada o **material reciclado** con una **alta resistencia a la compresión**.
- **Propósito:** Proporcionar la **capacidad de carga** necesaria para las aeronaves.

75.6. *Capa de rodadura (pavimento de adoquines o concreto):*

- **Espesor:** 15 cm a 30 cm.
- **Material:** Adoquines de concreto o **concreto asfáltico**, dependiendo del diseño y los materiales disponibles.
- **Propósito:** Soportar el tráfico aéreo y proporcionar un **acabado duradero** y **resistente**.

76. ANÁLISIS DE COSTOS DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Para calcular el costo de implementación de la estructura del suelo, debemos considerar los precios unitarios de los materiales necesarios para cada capa, basándonos en los precios del INVIAS (INVIAS, 2025) y IDU (HUMANO, 2025).

76.1. *Costo de Capa de Subrasante*

- **Material:** Suelo natural compactado.
- **Costo unitario:** En promedio, **\$50,000 por metro cúbico.**
- **Cantidad:** $1,000 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m} = 500 \text{ m}^3$.
- **Costo total:** $500 \text{ m}^3 \times \$50,000 = \$25,000,000$.

76.2. *Costo de Capa de Subbase*

- **Material:** Grava.
- **Costo unitario:** **\$80,000 por metro cúbico.**
- **Cantidad:** $1,000 \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ m} = 200 \text{ m}^3$.
- **Costo total:** $200 \text{ m}^3 \times \$80,000 = \$16,000,000$.

76.3. *Costo de Capa Base*

- **Material:** Grava triturada.
- **Costo unitario:** **\$100,000 por metro cúbico.**
- **Cantidad:** $1,000 \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ m} = 200 \text{ m}^3$.
- **Costo total:** $200 \text{ m}^3 \times \$100,000 = \$20,000,000$.

76.4. Costo de Pavimento de Adoquines de Concreto.

- **Material:** Adoquines de concreto.
- **Costo unitario:** \$10,000 por metro cuadrado.
- **Cantidad:** 1,000 m².
- **Costo total:** 1,000 m² x \$10,000 = \$10,000,000.

76.5. Cálculo Total de Costos de Implementación de la Estructura del Suelo

Costo total de la estructura del suelo (para 1,000 m² de pavimentación):

- **Subrasante:** \$25,000,000
- **Subbase:** \$16,000,000
- **Base:** \$20,000,000
- **Pavimento de adoquines:** \$10,000,000

76.6. Costo total:

\$25,000,000 (subrasante) + \$16,000,000 (subbase) + \$20,000,000 (base) + \$10,000,000
(pavimento de adoquines) = **\$71,000,000**

76.7. COMPARACIÓN CON OTRAS ESTRUCTURAS DE SUELO

Una estructura alternativa utilizando pavimento de concreto normal en lugar de adoquines tendría un costo inicial menor, pero se debe considerar la mayor necesidad de mantenimiento.

76.8. Costo de Pavimento de Concreto Normal (para 1,000 m²)

- **Costo unitario: \$8,000/m².**
- **Cantidad: 1,000 m².**
- **Costo total: 1,000 m² x \$8,000 = \$8,000,000.**

Costo total con pavimento de concreto normal: \$25,000,000 (subrasante) + \$16,000,000 (subbase) + \$20,000,000 (base) + \$8,000,000 (pavimento de concreto) = **\$69,000,000**

76.9. Costos de Mantenimiento

- **Pavimento de adoquines:** \$500,000 cada 5 años.
- **Pavimento de concreto:** \$1,500,000 cada 5 años.

Aunque la estructura de pavimento con adoquines de concreto tiene un costo inicial más alto que el pavimento de concreto normal, es más rentable a largo plazo por las siguientes razones:

- **Mayor durabilidad:** El adoquín tiene una mayor resistencia a las cargas dinámicas de las aeronaves y es más fácil de reparar que el concreto normal, lo que reduce los costos de **mantenimiento**.
- **Menores costos de mantenimiento:** El pavimento de adoquines requiere menos intervenciones y puede ser reparado localmente sin afectar grandes áreas, lo que reduce significativamente los costos operativos a largo plazo.

- **Mejor drenaje:** Los adoquines permiten un mejor drenaje del agua de lluvia, evitando el deterioro del pavimento y reduciendo los costos asociados al mantenimiento de drenajes.

Resultado: La estructura de pavimento de adoquines es más rentable a largo plazo debido a su menor necesidad de mantenimiento y su mayor durabilidad.

77. CONCLUSIONES

Los pavimentos de adoquín de concreto se presentan como una alternativa económica y sostenible para los aeropuertos regionales en Colombia. Aunque el costo inicial de los adoquines es más alto que el del asfalto, la durabilidad superior y los costos de mantenimiento más bajos a largo plazo hacen que esta opción sea más rentable en el tiempo. Los resultados obtenidos de las encuestas realizadas durante la práctica empresarial en la Aeronáutica civil de Colombia confirman que el adoquín es preferido por los encargados de mantenimiento debido a su resistencia y la posibilidad de realizar reparaciones localizadas sin interrumpir la operación del aeropuerto.

77.1. Conclusiones Específicas:

Viabilidad Económica:

A pesar de que el adoquín presenta un costo inicial más alto en comparación con el asfalto, los ahorros a largo plazo derivados de su menor necesidad de mantenimiento y su mayor durabilidad justifican su implementación, especialmente en aeropuertos regionales con recursos limitados.

Durabilidad y Mantenimiento:

El 90% de los expertos encuestados consideran que los adoquines tienen una mayor durabilidad en comparación con otros pavimentos, lo que lo convierte en una opción más sostenible y económicamente viable para las infraestructuras aeroportuarias. Además, la facilidad de reparación de los adoquines reduce significativamente los costos operativos a largo plazo.

Sostenibilidad Ambiental:

Los adoquines ofrecen un impacto ambiental menor en comparación con el asfalto, ya que son un material reciclable y tienen un menor impacto en la producción y eliminación, lo que mejora la sostenibilidad del aeropuerto a largo plazo.

Recomendación para Aeropuertos Regionales:

Dado los resultados de la práctica empresarial y la información obtenida de las encuestas, se recomienda la implementación de pavimentos de adoquín en aeropuertos regionales en Colombia, especialmente en zonas con bajos recursos y condiciones climáticas variables. Esta opción no solo ofrece beneficios económicos sino también operativos, mejorando la eficiencia y la durabilidad de las infraestructuras aeroportuarias.

La propuesta presentada en este trabajo cumple con los criterios de un análisis de factibilidad económica, integrando elementos como precios unitarios de referencia (INVIAS, IDU), normativas técnicas (ASTM, FAA), y estudios reales del entorno (Aerocivil – Araracuara), permitiendo concluir que el uso de adoquines de concreto constituye una alternativa adecuada para el mejoramiento de la infraestructura aeroportuaria regional en Colombia.

78. GLOSARIO .

Adoquines de concreto: Bloques prefabricados de concreto de alta resistencia, diseñados para ser colocados en patrones interconectados. Son utilizados en la pavimentación debido a su durabilidad, modularidad y facilidad de mantenimiento.

ASTM C936: Norma de la American Society for Testing and Materials (ASTM) que establece los requisitos mínimos para adoquines de concreto utilizados en pavimentos. Define propiedades como la resistencia a la compresión, la absorción de agua, y las tolerancias dimensionales.

Base estabilizada con cemento: Capa de material granular mezclada con cemento, utilizada como soporte estructural bajo los pavimentos. Mejora la rigidez y capacidad portante del suelo, proporcionando una base sólida para la capa superficial.

Capacidad portante: Habilidad de un suelo o material base para soportar cargas sin sufrir deformaciones excesivas o fallos estructurales.

Carga dinámica: Fuerza variable aplicada sobre una estructura o superficie debido al movimiento de las cargas (por ejemplo, el paso de un avión). Las cargas dinámicas son diferentes a las cargas estáticas, ya que incluyen efectos como el impacto y la vibración.

Compresión (Resistencia a la): Medida de la capacidad de un material para soportar cargas que tienden a reducir su tamaño. En los adoquines de concreto, la resistencia a la compresión es clave para determinar su capacidad de soportar cargas pesadas sin fallar.

Drenaje subterráneo: Sistema que permite la evacuación del agua a través de capas subterráneas del pavimento, evitando la saturación del suelo y el deterioro de la estructura del pavimento.

FAA (Federal Aviation Administration): Agencia del gobierno de los Estados Unidos que regula todos los aspectos de la aviación civil, incluyendo las normas para el diseño y construcción de pavimentos en aeropuertos.

Fatiga del pavimento: Proceso de debilitamiento del pavimento debido a la repetición de cargas aplicadas, lo que puede causar fisuración y deformaciones. Es uno de los principales mecanismos de fallo en pavimentos sometidos a tráfico continuo.

Geotextil: Material textil permeable utilizado en ingeniería civil para separar, filtrar, reforzar o drenar suelos y materiales granulados. Se coloca en capas subterráneas para evitar la migración de finos hacia la base o subbase del pavimento.

Hermeticidad: Propiedad de un material o sistema que lo hace impermeable a líquidos y gases. En los pavimentos, la hermeticidad puede ser importante para evitar la infiltración de agua en la base del pavimento.

ICPI (Interlocking Concrete Pavement Institute): Organización internacional que promueve y desarrolla normas técnicas para la pavimentación con adoquines de concreto. El ICPI ofrece recomendaciones para el diseño, instalación y mantenimiento de pavimentos.

Infiltración: Proceso por el cual el agua se filtra a través de las juntas del pavimento hacia las capas subyacentes. En los pavimentos permeables, la infiltración es una característica importante para el manejo de aguas pluviales.

Modularidad: Característica de un sistema o diseño en el que los componentes individuales (módulos) pueden ser reemplazados o ajustados sin afectar al conjunto. En los pavimentos de adoquines, la modularidad permite reparaciones rápidas y localizadas.

Módulo de elasticidad: Parámetro que mide la rigidez de un material bajo esfuerzos elásticos. En pavimentos, un módulo de elasticidad elevado indica que el material es capaz de soportar deformaciones sin sufrir daños permanentes.

NTC 2017 (Norma Técnica Colombiana 2017): Norma que regula los adoquines de concreto en Colombia, estableciendo especificaciones sobre sus dimensiones, resistencia a la compresión, absorción de agua y demás características técnicas requeridas para su uso en pavimentos.

Pavimento flexible: Tipo de pavimento cuya estructura está diseñada para flexionar bajo cargas. Se utiliza principalmente en carreteras y aeropuertos donde el pavimento debe soportar cargas dinámicas sin fracturarse.

Pavimento rígido: Tipo de pavimento caracterizado por su baja deformabilidad bajo cargas. Los pavimentos rígidos, como los de concreto, transfieren las cargas directamente a la subbase y son utilizados en aplicaciones de tráfico pesado.

Placa de carga: Ensayo utilizado para medir la capacidad portante de un pavimento o suelo. Consiste en aplicar una carga a una placa rígida sobre la superficie del pavimento y medir la deformación resultante.

Resistencia a la tracción: Capacidad de un material para resistir esfuerzos de tensión sin fallar. En los pavimentos de adoquines, la resistencia a la tracción es importante para evitar la fisuración bajo cargas horizontales.

Saturación del suelo: Estado en el que los poros del suelo están completamente llenos de agua, lo que puede reducir significativamente su capacidad portante y causar problemas de estabilidad en el pavimento.

Subbase: Capa de material granular colocada entre la base estabilizada y la subrasante (suelo natural) para distribuir las cargas de tráfico y mejorar la estabilidad del pavimento. La subbase también actúa como una barrera contra la infiltración de agua.

Subrasante: Suelo natural sobre el cual se construye la estructura del pavimento. La subrasante debe ser preparada y compactada adecuadamente para soportar las cargas del tráfico aéreo y evitar deformaciones.

Taxeo: Movimiento de las aeronaves sobre la superficie del aeropuerto (pistas y plataformas) antes del despegue o después del aterrizaje. El taxeo genera cargas dinámicas en el pavimento que deben ser soportadas por su estructura.

Triangulación: Método de validación de datos en el que se comparan resultados obtenidos de diferentes fuentes o técnicas de análisis para asegurar su precisión y fiabilidad.

Vida útil del pavimento: Período durante el cual el pavimento mantiene su funcionalidad estructural y operativa sin requerir intervenciones mayores. En pavimentos de adoquines, la vida útil puede ser prolongada si se realizan mantenimientos adecuados.

Aditivos: Sustancias añadidas al concreto o a los materiales estabilizantes con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas o químicas, como la durabilidad, la resistencia al agua, o el tiempo de fraguado.

Aeronave de gran envergadura: Aviones de tamaño considerable, generalmente utilizados en operaciones comerciales, con una alta capacidad de carga y pasajeros, como el Boeing 747 o el Airbus A380. Estos aviones aplican cargas importantes sobre los pavimentos aeroportuarios.

Asentamiento diferencial: Variación en el asentamiento de diferentes puntos del pavimento debido a la heterogeneidad de las condiciones del suelo subyacente. El asentamiento diferencial puede provocar grietas o deformaciones en la superficie del pavimento.

CBR (California Bearing Ratio): Prueba que mide la capacidad portante de suelos y materiales granulares, indicando su resistencia a la penetración. El CBR es esencial para diseñar la base y la subbase de los pavimentos aeroportuarios.

Compactación: Proceso mediante el cual se aumenta la densidad de un suelo o material granular, reduciendo sus vacíos para mejorar su capacidad portante y resistencia a las cargas aplicadas.

Concreto permeable: Tipo de concreto diseñado para permitir la infiltración del agua a través de su estructura. Es utilizado para mejorar el drenaje en pavimentos, reduciendo el riesgo de empozamiento y saturación del suelo.

Deformación plástica: Cambio permanente en la forma o estructura de un material bajo una carga, que no se recupera cuando la carga es retirada. En pavimentos, las deformaciones plásticas pueden llevar a fallos prematuros.

Dilatación térmica: Expansión y contracción de los materiales de pavimentación debido a cambios de temperatura. Los pavimentos deben diseñarse considerando este fenómeno para evitar la aparición de fisuras y grietas.

Erosión del pavimento: Desgaste progresivo de la superficie del pavimento debido a la acción del tráfico, el agua, o los cambios ambientales. La erosión puede reducir la vida útil del pavimento y aumentar la necesidad de mantenimiento.

Falla estructural del pavimento: Condición en la que el pavimento ya no puede soportar las cargas aplicadas debido a la fatiga, deformación excesiva o deterioro de sus capas estructurales. Las fallas estructurales requieren reparaciones mayores o la reconstrucción completa del pavimento.

Fatiga de material: Proceso de deterioro de un material debido a la repetición cíclica de cargas o esfuerzos. En los pavimentos de adoquines, la fatiga puede manifestarse en forma de grietas o fisuras en los adoquines.

Flexotracción: Ensayo que mide la resistencia de un adoquín o material de concreto a fuerzas de flexión, que es crucial para determinar su capacidad de soportar cargas sin fracturarse.

Geomecánica: Ciencia que estudia el comportamiento de los suelos y rocas bajo esfuerzos, incluyendo su capacidad portante y la estabilidad de taludes. Es fundamental en el diseño de pavimentos, especialmente en aeropuertos con suelos geotécnicamente complejos.

Grieta por retracción: Grieta que se forma en el pavimento debido a la contracción del concreto durante el proceso de fraguado y endurecimiento. Estas grietas pueden ser controladas mediante el uso de juntas de control.

Huellas de rodadura: Surcos que se forman en la superficie del pavimento debido al paso repetitivo de ruedas, especialmente en zonas de alta carga. Las huellas pueden reducir la seguridad de las operaciones en pista y afectar la calidad del pavimento.

Impermeabilización: Proceso de tratamiento de la superficie del pavimento para prevenir la infiltración de agua. Es fundamental para proteger la base y subbase del pavimento de la saturación y evitar el deterioro estructural.

Intertrabado: Mecanismo por el cual los adoquines de concreto se bloquean entre sí al ser colocados en un patrón entrelazado, transfiriendo las cargas aplicadas a través del contacto entre sus bordes. El intertrabado mejora la estabilidad del pavimento.

Junta de expansión: Espacio intencional entre segmentos de pavimento que permite la expansión y contracción térmica del material sin causar grietas o deformaciones. Es esencial en pavimentos rígidos, como los de concreto, para manejar los movimientos térmicos.

Junta de control: Corte o espacio realizado en el pavimento de concreto para controlar el lugar en que se formarán grietas por contracción. Las juntas de control minimizan el daño causado por las fisuras incontroladas en el pavimento.

Mantenimiento predictivo: Estrategia de mantenimiento que se basa en la monitorización continua y la previsión de fallos antes de que ocurran. En pavimentos, se utilizan datos de tráfico y desgaste para planificar las reparaciones antes de que se presenten daños importantes.

Método de elementos finitos: Técnica de análisis numérico utilizada para simular el comportamiento de materiales y estructuras bajo diversas condiciones de carga. En pavimentos, se usa para predecir la distribución de tensiones y deformaciones.

Nivel freático: Profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en el suelo. El nivel freático es un factor importante en el diseño de pavimentos, ya que la presencia de agua cercana a la superficie puede comprometer la capacidad portante del suelo.

Permeabilidad: Propiedad de un material que permite el paso de líquidos o gases a través de él. En pavimentos, la permeabilidad es crítica para el diseño de sistemas de drenaje y para evitar la acumulación de agua sobre la superficie.

Plasticidad del suelo: Capacidad de un suelo para deformarse sin fracturarse bajo esfuerzos. Los suelos con alta plasticidad pueden ser problemáticos para los pavimentos, ya que pueden experimentar deformaciones significativas bajo carga.

Reciclaje de pavimento: Proceso de reutilización de materiales existentes del pavimento, como el concreto o el asfalto, para construir una nueva estructura de pavimento. Este proceso es sostenible y puede reducir costos de construcción.

Reparación localizada: Procedimiento de reparación en pavimentos que implica la sustitución de pequeños segmentos o bloques dañados sin necesidad de rehacer grandes áreas de la superficie. Los pavimentos de adoquines son particularmente adecuados para este tipo de intervención.

Rigidez: Propiedad de un material que define su resistencia a la deformación bajo carga. Un pavimento con alta rigidez se deformará menos ante la aplicación de fuerzas externas.

Sistemas de retención de aguas pluviales: Infraestructura diseñada para capturar, almacenar y filtrar el agua de lluvia antes de que se infiltre en el subsuelo o se libere en el sistema de drenaje. Estos sistemas son clave para controlar el impacto del agua en los pavimentos.

Suelo-cemento: Material compuesto por suelo y una pequeña cantidad de cemento utilizado para estabilizar suelos y mejorar su capacidad portante. El suelo-cemento se utiliza en las capas de base y subbase de los pavimentos.

Subbase granular: Capa de material granular (como grava o arena) que se coloca entre la base estabilizada y el terreno natural. Actúa como una capa de transición que distribuye las cargas y mejora la estabilidad del pavimento.

Superficie de rodadura: Capa superior del pavimento que está en contacto directo con el tráfico de aeronaves. Esta capa debe tener propiedades adecuadas de resistencia al deslizamiento, resistencia al desgaste y estabilidad estructural.

Adherencia: Capacidad de la superficie del pavimento para proporcionar tracción a las ruedas de los vehículos, especialmente importante para asegurar el frenado y el control de aeronaves en pistas de aterrizaje y rodaje.

Agregado fino: Material particulado utilizado en mezclas de concreto, como arena, cuya función es llenar los vacíos entre los agregados gruesos, contribuyendo a mejorar la trabajabilidad y la resistencia del concreto.

Agregado grueso: Fragmentos de roca o grava que se utilizan en la mezcla de concreto para proporcionar resistencia estructural. El tamaño de los agregados gruesos influye en la durabilidad y resistencia del pavimento.

Asfalto: Material bituminoso utilizado comúnmente en la construcción de pavimentos flexibles. Aunque más barato inicialmente, el asfalto tiene una vida útil más corta y mayores costos de mantenimiento en comparación con los pavimentos de adoquines de concreto.

Capa de rodadura: Parte superior del pavimento que está en contacto directo con el tráfico. En los pavimentos de adoquines, esta capa está formada por los bloques de concreto que soportan las cargas de las aeronaves y el desgaste.

Carga de diseño: Valor estimado de las cargas que el pavimento debe soportar durante su vida útil. Incluye factores como el peso de las aeronaves, la frecuencia de uso y las condiciones ambientales.

Coeficiente de fricción: Medida de la resistencia que ofrece la superficie del pavimento al deslizamiento. Es fundamental para la seguridad en las operaciones de despegue y aterrizaje de aeronaves.

Compactación dinámica: Método de compactación del suelo mediante la aplicación de impactos repetidos, que densifican el suelo para mejorar su capacidad portante antes de colocar la base o subbase del pavimento.

Crecimiento del pavimento: Fenómeno en el que el pavimento se expande lateralmente debido a la dilatación térmica o a las cargas aplicadas, lo que puede generar deformaciones o grietas si no se controlan con juntas de expansión.

Deformación elástica: Cambio temporal en la forma de un material que se recupera una vez que la carga aplicada es removida. En pavimentos, la elasticidad es importante para absorber cargas sin sufrir daños permanentes.

Drenaje superficial: Sistema que permite la evacuación del agua de lluvia de la superficie del pavimento hacia los sistemas de drenaje. Un buen drenaje superficial es crucial para evitar el empozamiento y el deterioro del pavimento.

Ensayo de placa de carga: Prueba en campo que evalúa la capacidad de soporte de las capas del pavimento y del suelo subyacente. Esta prueba mide la deformación bajo carga aplicada, siendo esencial para diseñar pavimentos aeroportuarios.

Ensayo triaxial: Prueba de laboratorio que mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones controladas. Esta información es clave para el diseño de bases y subbases en pavimentos.

Espesor de diseño: Grosor calculado de las capas del pavimento, basado en las cargas esperadas y la capacidad del suelo subyacente. Un espesor adecuado es esencial para prevenir la deformación excesiva y fallas prematuras.

Estabilización de suelos: Técnica para mejorar las propiedades de los suelos naturales mediante la adición de materiales como cal, cemento o asfalto. La estabilización aumenta la resistencia y durabilidad del suelo, haciéndolo apto para soportar pavimentos.

Estructura del pavimento: Conjunto de capas de materiales que conforman el pavimento, incluyendo la subrasante, la subbase, la base y la capa de rodadura. Cada capa tiene una función específica para distribuir las cargas y proporcionar durabilidad.

Factor de tráfico: Parámetro que expresa la intensidad del uso del pavimento por aeronaves o vehículos, considerando el número de operaciones y las cargas aplicadas. Es un factor clave en el diseño de la estructura del pavimento.

Falla por fatiga: Tipo de daño en el pavimento que ocurre después de un número repetido de ciclos de carga. Se manifiesta en la forma de grietas y fisuras que se propagan con el tiempo.

Fisuración por contracción: Grietas que aparecen en el pavimento debido a la reducción del volumen del concreto durante su proceso de secado y fraguado. Estas fisuras pueden comprometer la resistencia estructural del pavimento si no se controlan.

Fraguado del concreto: Proceso químico en el que el concreto pasa de un estado líquido a uno sólido, alcanzando su resistencia inicial. El tiempo de fraguado es crítico para la planificación de la instalación de los adoquines.

Granulometría: Distribución de tamaños de partículas en un agregado o material granular. Una granulometría adecuada mejora la compacidad, resistencia y drenaje de la base y subbase del pavimento.

Hidratación del cemento: Reacción química entre el cemento y el agua que resulta en la formación de un material rígido. Este proceso es fundamental para el desarrollo de la resistencia del concreto utilizado en los adoquines.

Junta de dilatación: Espacio colocado entre los adoquines o losas de concreto para permitir la expansión y contracción térmica. Sin estas juntas, el pavimento podría agrietarse debido a los cambios de temperatura.

Módulo de reacción del suelo (k): Medida de la rigidez del suelo en la subrasante, utilizada para determinar su capacidad de soporte. Es un valor esencial en el diseño estructural de los pavimentos.

Movimiento sísmico: Vibraciones del suelo causadas por terremotos o movimientos tectónicos. Los pavimentos en áreas sísmicas deben diseñarse para resistir estos movimientos sin sufrir daños significativos.

Patrón de espina de pescado: Forma de colocación de adoquines en la que los bloques se interconectan en un patrón en ángulo, distribuyendo de manera más uniforme las cargas aplicadas. Este patrón es común en pavimentos sujetos a tráfico pesado.

Percolación: Proceso mediante el cual el agua fluye a través de las capas permeables del pavimento hacia el suelo subyacente. La percolación es clave en pavimentos permeables para evitar el encharcamiento.

Plasticidad: Capacidad de un material, como el suelo, para sufrir deformaciones permanentes sin fracturarse. Los suelos de alta plasticidad pueden representar un reto en el diseño de pavimentos, ya que son más susceptibles a la deformación bajo carga.

Reciclado en frío: Técnica que consiste en rehabilitar el pavimento utilizando materiales existentes, sin necesidad de aplicar calor. Se tritura el material existente, se mezcla con aditivos y se reutiliza para formar nuevas capas de pavimento.

Refuerzo geosintético: Materiales sintéticos, como geotextiles y geomallas, que se utilizan para reforzar y estabilizar suelos en la construcción de pavimentos. Aumentan la durabilidad y capacidad portante de la estructura del pavimento.

Subrasante tratada: Suelo natural que ha sido mejorado mediante estabilización con cemento, cal u otros aditivos para mejorar su capacidad portante. Esto es esencial en zonas con suelos de baja resistencia para soportar pavimentos.

Transporte y disposición de materiales: Proceso de llevar los materiales de construcción (como agregados o adoquines) desde la fuente de producción hasta el sitio de obra, y la posterior eliminación de materiales no reutilizables.

Vibro compactación (PRACTICA EMPRESARIAL, 2023): Método de compactación en el que se utilizan placas vibradoras para densificar el suelo o los agregados durante la instalación de los adoquines. Asegura que el pavimento esté adecuadamente compactado y resistente a cargas dinámicas.

79. ANEXOS.

1. Anexo Técnico Araracuara
2. Estudios Previos Araracuara
3. Especificaciones Técnicas Araracuara
4. Presupuesto de obra Araracuara

80. BIBLIOGRAFÍA

(7 de OCTUBRE de 2024). Obtenido de ADOBE STOCK: <https://stock.adobe.com>

217, N. (s.f.).

BENAVIDES, C. A. (2015). *MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFALTICOS EN VIAS CON MEDIOS Y ALTOS VOLUMENES DE TRANSITO*. BOGOTA: INVIAS.

Bruinsma, J., Smith, K., & Peshkin, D. (2017). *Guidance for Usage of Permeable Pavement at Airports*. Washington: National Academies of Sciences.

D., R., & McQueen. (2020). *AIRFIELD PAVEMENT DESIGN WITH CONCRETE PAVERS*. United Kingdom: Interlocking Concrete Pavement Institute – Updated 2020.

EMERY, J. (2018). *CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS PARA AERONAVES CON ADOQUINES DE CONCRETO CON TRABAZÓN MECÁNICA*. LAZAR, Michael , 10.

FIERRO, M. I. (2014). *ELABORACION DE UN MANUAL DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS DEL ADOQUINADO*. QUITO.

HUMANO, I. D. (7 de MARZO de 2025). *Sistema de información de precios unitarios de referencia del IDU*. Obtenido de Sistema de información de precios unitarios de referencia del IDU: <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/economico/portafolio>

INVIAS, I. N. (7 de MARZO de 2025). *INVIAS*. Obtenido de INVIAS: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/hechos-de-transparencia/analisis-de-precio-unitarios>

leonel. (08 de 199). *capital*. Obtenido de rincon delbago.

McQueen, R. D. (2012). *AIRFIELD PAVEMENT DESIGN WITH CONCRETE PAVERS* . U.S.: Interlocking Concrete Pavement Institute.

Midlands, W. (2011). *A Guide to Airfield* . Kingston: CONSTRUCTION SUPPORT TEAM.

P.E. (2020). *US-airfield pavers FAA*. U.S: ICPI.

PRACTICA EMPRESARIAL, P. E. (ABRIL de 2023). AERONAUTICA CIVIL DE COLOMBIA. (J. TOLE, Entrevistador)

TRANSPORTE, M. D. (2022). *ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCION DE CARRETERAS*. QUINDIO: INVIAS.

VESGA, L. (7 de 10 de 2010). *NATIONAL ACADEMIES*. Obtenido de NATIONAL ACADEMIES: <https://trid.trb.org/View/950559>