

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

DISEÑO Y GESTIÓN DE PAVIMENTOS PORTUARIOS EN COSTA RICA

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Civil para optar al grado y título de Maestría Profesional en Ingeniería de Transportes y Vías

DANNY CHACÓN RAMÍREZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica
2021

DEDICATORIA

A mi hermana, por darme el más claro ejemplo de fortaleza y valentía.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por creer siempre en mí.

A mi hermana, que aunque no estás en cuerpo con nosotros, estas en mi corazón.

A mi esposa, por apoyarme de todas las maneras posibles y confiar en mí siempre.

A mi padre, por darme su apoyo durante tantos años de preparación.

A mi hijo Javier, por darme lecciones día a día.

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Postgrado en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Ingeniería de Transportes y Vías.”

M.Sc. Henry Hernández Vega
Representante del Decano Sistema de Estudios de Postgrado

M.Sc. Josué Quesada Campos
Profesor Guía

M.Sc. Tania Ávila Esquivel
Lectora

M.Sc. Wendy Sequeira Rojas
Lectora

M.Sc. Javier Zamora Rojas
Representante Director Programa de Estudios de Postgrado

Danny Chacón Ramírez
Sustentante

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	ii
HOJA DE APROBACION	iii
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Objetivo general.....	3
1.3. Objetivos específicos	4
1.4. Importancia	4
1.5. Alcance	4
1.6. Limitaciones	4
1.7. Metodología	5
1.7.1. Fase 1.....	5
1.7.2. Fase 2.....	5
1.7.3. Fase 3.....	5
1.7.4. Fase 4.....	5
1.7.5. Fase 5.....	5
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Zonificación para la pavimentación de obras portuarias.....	8
2.3. Tipos y caracterización de cargas en pavimentos portuarios	10
2.3.1. Cargas de estacionamiento o almacenamiento.....	11
2.4. Operaciones en terminales de contenedores	22
2.4.1. Operaciones en patio de contenedores con equipo tipo pórtico con neumáticos de goma (RTG, por sus siglas en ingles).....	23
2.4.2. Operaciones en patio de contenedores con equipo tipo cargador frontal	24
2.4.3. Operaciones en patio de contenedores con equipo tipo carretilla pórtico	25
2.4.4. Operaciones en patio de contenedores con equipo de ruedas / camiones..	26

2.5.	Análisis y diseño de pavimentos portuarios.....	27
2.5.1.	Periodo de diseño	27
2.5.2.	Crecimiento del trafico	27
2.5.3.	Trafico - demanda – repeticiones de carga	28
2.6.	Materiales para pavimentos	30
2.6.1.	Subrasante (suelo nativo)	30
2.6.2.	Materiales granulares – bases y subbases.....	31
2.6.3.	Mezcla asfáltica en caliente (MAC)	32
2.6.4.	Concreto hidráulico	33
2.6.5.	Adoquines.....	35
2.7.	Metodologías para diseño de pavimentos para cargas pesadas	36
2.7.1.	Pavimentos asfálticos	36
2.7.2.	Pavimentos de concreto.....	38
2.7.3.	Pavimentos de adoquines	38
2.8.	Gestión de pavimentos.....	39
2.8.1.	Generalidades.....	39
2.8.2.	Conceptos del Sistema de Gestión de Pavimentos	39
2.8.3.	Componentes básicos de un SGP	41
2.8.4.	Base de datos de un SGP	42
2.8.5.	Políticas y costos de mantenimiento	42
CAPITULO 3: GUÍA DE DISEÑO		43
3.1.	Generalidades.....	43
CAPITULO 4: APLICACIÓN.....		45
4.1.	Introducción	45
4.2.	Caso de análisis y diseño: Terminal de Contenedores de Moín	45
4.3.	Parámetros físico – mecánicos de diseño	48
4.4.	Equipos, cargas y logística.....	50
4.4.1.	Detalles generales del equipamiento.....	50
4.4.2.	Equipos de muelle.....	50
4.4.3.	Equipos de patio y movilización	51
4.4.4.	Equipos complementarios	53
4.4.5.	Cargas por almacenamiento de contenedores	53
4.5.	Diseño de estructuras de pavimento	57
4.5.1.	Generalidades.....	57

4.5.2.	Diseño preliminar	58
4.5.3.	Diseño de estructura de concreto asfáltico (Full Deph)	58
4.5.4.	Diseño de estructura de concreto hidráulico.....	59
4.5.5.	Diseño de estructura de adoquines.....	59
4.5.6.	Resumen de resultados y comparativa	60
4.5.7.	Comparativa estructura diseñada y construida en la TCM	62
4.6.	Especificaciones técnicas	63
4.6.1.	Generalidades.....	63
4.6.2.	Especificaciones material de base y subbase granular	63
4.6.3.	Especificaciones material de base tratada	64
4.6.4.	Especificaciones material de concreto estructural.....	64
4.6.5.	Especificaciones material de mezcla asfáltica en caliente.....	64
4.6.6.	Especificaciones adoquines de concreto.....	64
4.6.7.	Resumen general de especificaciones	65
4.7.	Presupuestos y comparativo técnico – económica	65
CAPITULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		70
5.1.	Respecto a la guía de diseño desarrollada.....	70
5.2.	Respecto a la aplicación de la guía al proyecto Terminal de Contenedores de Moín 71	
CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		73
6.3.	Conclusiones	73
6.4.	Recomendaciones	73
CAPITULO 7: Bibliografía.....		74
CAPITULO 8: ANEXOS		77
8.1.	Ejemplo de aplicación de Guía en el proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín (Memorias de cálculo).....	77
CAPITULO 9: APÉNDICES.....		78
9.1.	Apéndice 1: Guía de diseño de pavimentos portuarios en Costa Rica	78

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló una propuesta de guía para el diseño de pavimentos portuarios. La guía de diseño desarrollada presenta generalidades respecto a la tipología de equipos que comúnmente operan dentro de una terminal portuaria, así como cargas típicas de almacenaje y de equipos, que pueden ser empleadas en caso de no contar con información específica del caso bajo análisis.

La guía de diseño contempla un flujo de diseño que parte de la recopilación de datos del proyecto, determinación de cargas, definición de propiedades físico-mecánicas de los materiales para diseño, un procedimiento de diseño preliminar y posteriormente la evaluación mediante metodologías de diseño específicas para cada tipología de estructura de pavimento.

Una vez planteada la guía de diseño, se aplicó al proyecto de la Terminal de Contenedores de Moín, preliminarmente se obtuvo que una estructura en losas de concreto o una estructura de adoquines sobre base tratada son las opciones recomendadas. Posteriormente se procedió a aplicar las secciones de la guía de diseño para metodologías específicas según la tipología. En términos generales se obtuvo que para el caso de losas de concreto, se dio un incremento del espesor de losa al aplicar la metodología de diseño específica. En el caso de la estructura de adoquines, al aplicar la metodología específica de diseño, se obtuvo una reducción en el espesor de adoquín requerido en general. No obstante se requirió de un espesor mayor de base tratada y una capa de subbase.

Se realizó una comparativa económica del costo por metro cuadrado de cada tipo de estructura, en general se obtuvo que económicamente la estructura de adoquines con base tratada es la de menor costo.

Palabras clave: puertos, pavimento, losas, concreto, adoquines

ABSTRACT

In this paper, a proposal for a guide for the design of port pavements was developed. The design guide developed presents generalities regarding the typology of equipment that commonly operates within a port terminal, as well as typical storage and equipment loads, which can be used in case of not having specific information of the case under analysis.

The design guide contemplates a design flow that starts from the collection of project data, determination of loads, definition of physical-mechanical properties of the materials for design, a preliminary design procedure and subsequently the evaluation of using specific design methodologies for each type of pavement structure.

Once the design guide was raised, it was applied to the project of the Moin's Container Terminal, preliminarily it was obtained that a structure in concrete slabs or a structure of cobblestones on a treated basis are the recommended options. Subsequently, the sections of the design guide were applied to specific methodologies according to the typology. In general terms it was obtained that in the case of concrete slabs, there was an increase in the thickness of the slab when applying the specific design methodology. In the case of the cobblestone structure, by applying the specific design methodology, a reduction in the required cobblestone thickness was obtained in general. However, a greater thickness of treated base and a layer of subbase were required.

An economic comparison of the cost per square meter of each type of structure was made, in general it was obtained that economically the structure of cobblestones with treated base is the one with the lowest cost.

Keywords: ports, pavement, slabs, concrete, cobblestones

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Usos de las superficies portuarias	10
Cuadro 2. Distribución de alturas de contenedores	15
Cuadro 3. Cargas y presiones.....	17
Cuadro 4. Factor de crecimiento acumulativo (FCA)	28
Cuadro 5. Propiedades físicas mecánicas empleadas en el modelo geotécnico y para modelación numérica estática/dinámica.	49
Cuadro 6. Resumen de equipo proyecto TCM.....	50
Cuadro 7. Cargas y repeticiones de grúa RTG.....	52
Cuadro 8. Cargas y repeticiones de grúa Straddle Carrier (Cargador de contenedores) ..	52
Cuadro 9. Cargas por eje Tractor de Patio (Tipo Camión).....	53
Cuadro 10. Resumen de equipo proyecto TCM.....	54
Cuadro 11. Resumen de parámetros para diseño de pavimentos	57
Cuadro 12. Resumen de diseño preliminar – Superficie de concreto	58
Cuadro 13. Resumen de diseño preliminar - Adoquines.....	58
Cuadro 14. Resumen de diseño espesor completo Mezcla Asfáltica en Caliente.....	58
Cuadro 15. Resumen de diseño de pavimento de concreto	59
Cuadro 16. Resumen de diseño de pavimento de adoquines.....	59
Cuadro 17. Resumen de resultados obtenidos según tipo de estructura y metodología...	60
Cuadro 18. Resumen de especificaciones recomendadas, basadas en el CR2010 y sus actualizaciones.....	65
Cuadro 19. Precios unitarios de materiales	66
Cuadro 20. Costo unitario (/ m2) por tipología de estructura	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zona típica de descarga de una terminal de contenedores.	3
Figura 2. Equipos y terminal de contenedores típica.	3
Figura 3. Metodología del proyecto	6
Figura 4. Zona de almacenamiento de contenedores típica	9
Figura 5. Zona de puertas de acceso	9
Figura 6. Contenedores de 53' 48' 45' 40' y 20' apilados	14
Figura 7. Grúas pórtico.....	18
Figura 8. Grúas porta contenedores.....	18
Figura 9. Portal de almacenamiento.....	19
Figura 10. Caretillo pórtico.	20
Figura 11. Cargador frontal.	20
Figura 12. Cargador lateral.....	21
Figura 13. Grúa móvil.....	22
Figura 14. Semirremolque.....	22
Figura 15. RGT en operación	23
Figura 16. Accesos de camiones en operación de RTG.....	24
Figura 17. Cargadores frontales en operación.....	24
Figura 18. Accesos de camiones en operación de cargadores frontales	25
Figura 19. Grúa pórtico	25
Figura 20. Accesos de camiones en operación de carretillas pórtico.....	26
Figura 21. Camiones portacontenedores típicos	26
Figura 22. Dimensiones de un patio de almacenamiento.	30
Figura 23. Comportamiento resiliente del suelo.....	31
Figura 24. Componentes de la Mezcla Asfáltica en Caliente	33
Figura 25. Componentes del concreto hidráulico.....	33
Figura 26. Comportamiento elástico no lineal del concreto hidráulico.....	34
Figura 27. Generación de resistencia con la edad.....	35
Figura 28. Clasificación de los adoquines	35
Figura 29. Localización de las respuestas críticas.....	37
Figura 30. Ciclo de vida típico de un pavimento	40
Figura 31. Concepto de mantenimiento preventivo	41
Figura 32. Diagrama de flujo para la Guía de Diseño de Pavimentos Portuarios.....	45
Figura 33. Ubicación general del proyecto. Fuente: APM Terminals (2016)	46

Figura 34. Vista en planta general del proyecto de reclamación. Fuente: Modificado de APM Terminals (2016)	46
Figura 35. Zonificación de arenas en la TCM y vías de comunicación. Fuente: (CH2MHill, 2013).....	47
Figura 36. Ejemplo de obra construida mediante rellenos de reclamación / hidráulicos. Fuente: Hoff (2012)	48
Figura 37. Perfil de análisis longitudinal.	48
Figura 38. Perfil de análisis transversal.	49
Figura 39. Grúas Pórtico de Patio sobre Neumáticos RTG (Rubber Tyred Gantry Cranes). Fuente: (APM Terminals S.A., 2013)	52
Figura 40. Straddle Carrier. Fuente: (APM Terminals S.A., 2013)	53
Figura 41. Distribución de planta, capacidad almacenaje y altura. Fuente: Modificado de (APM Terminals S.A., 2013).....	55
Figura 42. Grúas STS y RTG en Terminal Laem Chabang, Tailandia. Fuente: (APM Terminals S.A., 2013).....	55
Figura 43. Grúas STS y RTG en Terminal Tangier, Marruecos.	56
Figura 44. Grúa STS en Muelle 400 Los Angeles, EUA. Fuente: (APM Terminals S.A., 2013).....	56
Figura 45. Variación de espesor de mezcla asfáltica según tipo de equipo	61
Figura 46. Variación de espesor de estructura rígida según tipo de equipo / Comparación con diseño preliminar	61
Figura 47. Variación de espesor de estructura de adoquín según tipo de equipo / Comparación con diseño preliminar	62
Figura 48. Estructura de pavimento diseñada y construida en la TCM	63
Figura 49. Variación de costo según tipo de equipo / Estructura de mezcla asfáltica en espesor completo.....	68
Figura 50. Variación de costo según tipo de equipo / Estructura de concreto.....	68
Figura 51. Variación de costo según tipo de equipo / Estructura de adoquines	69

LISTA DE ABREVIATURAS

1. FHWA: Federal Highway Administration
2. ASTM: American Society for Testing and Materials
3. AASHTO: American Association of State Highway Transportation Officials
4. CR2010: Especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes
5. TCM: Terminal de Contenedores de Moín
6. APMT: APM Terminals
7. TEU: Twenty Tonns Equivalent Unit
8. PIANC: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Danny Mauricio Chacón Ramírez, con cédula de identidad 206030250, en mi condición de autor del TFG titulado DISEÑO Y GESTIÓN DE PAVIMENTOS PORTUARIOS EN COSTA RICA

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Danny Mauricio Chacón Ramírez

Número de Carné: A81649 Número de cédula: 206030250

Correo Electrónico: dannychacon27@gmail.com

Fecha: 21/10/2021 Número de teléfono: +506 6101 4589

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Ing. Josue Quesada Campos, MSc

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

Las estructuras de pavimentos para terminales portuarias están sometidas a cargas sustancialmente superiores en comparación a las cargas aplicadas a una carretera. En el caso particular, en puertos se distinguen al menos tres tipos de cargas sobre el pavimento:

- Las que transmiten al pavimento los materiales o mercancías acopiadas o almacenadas en una determinada superficie.
- Las que aplican los equipos que se emplean en la manipulación de dichos materiales o mercancías.
- Las que corresponden a cargas de tráfico pesado convencional, vehículos de carretera.

Las magnitudes en términos de esfuerzos generados por cargas acopiadas alcanzan como mínimo 0.15 MPa. Debe considerarse que pueden presentarse cargas concentradas apoyadas sobre durmientes que en el caso de cargas pesadas alcanzan valores de al menos 1200 kN. Para el caso de los contenedores, las cargas se transmiten por elementos de apoyo en las esquinas de estos. La unidad de medida en el argot portuario es el TEU (Twenty-Foots Equivalent Unit) o contenedor equivalente de 6.1 m (20 pies) de longitud. Los más habituales en la actualidad son los de 6.1 m (1 TEU) y 12.2 m (2 TEU).

Propiamente dentro de las terminales de contenedores, existen equipos especializados para la manipulación de los TEU, por ejemplo: grúas pórtico, cargadores frontales, grúas móviles etc. Estos equipos pueden transmitir cargas desde 30 kN hasta 1100 kN, presiones de contacto de 0.8 MPa y 2.6 MPa respectivamente.

En contraste, la carga empleada para el análisis de estructuras de pavimentos en carreteras es un eje equivalente de 80 kN (18 000 lb) que se distribuye en dos cargas (eje simple o dual) con 45 kN. Otro factor diferenciador es la velocidad o frecuencia de aplicación de las cargas, en carreteras las cargas se aplican a la velocidad de operación de la vía (100 km/h, por ejemplo) en puertos las cargas son estacionarias (velocidad 0) por periodos definidos. Ese último aspecto tiene un efecto significativo en los módulos de rigidez de materiales con comportamiento visco elástico (como la mezcla asfáltica en caliente).

Para terminales portuarias se aplican todos los tipos de pavimentos usualmente aplicado en vías, a saber:

- Flexibles: con capa de ruedo constituida por mezcla asfáltica en caliente.
- Rígidos: estructura de concreto con o sin refuerzo, continuo o con juntas.
- Semirrígido: con capa de ruedo constituida de mezcla asfáltica en caliente y base granular estabilizada o mejorada.
- Adoquines: elementos individuales de concreto prefabricado.

En la actualidad en Costa Rica no existen estudios, guías o especificaciones técnicas relacionadas al diseño de pavimentos para obras portuarias (pavimentos para cargas pesadas en general), por lo que se debe acudir a normativa y bibliografía extranjera.

Se pretende mediante este trabajo establecer una guía que permita diseñar, especificar y gestionar estructuras de pavimentos para obras portuarias y terminales de contenedores siguiendo las practicas aceptables según el estado del arte actual, de tal manera que pueda ser empleada por instituciones del ámbito portuario como herramienta de consulta para el diseño de estructuras de pavimento desde su planeación y construcción hasta su gestión como activo.

En este trabajo se aplicará la guía desarrollada en el proyecto de la Terminal de Contenedores de Moín con el fin de realizar un análisis comparativo de tipos de pavimentos, tipos de análisis, cargas involucradas y otros factores, en un caso de análisis aplicado real.

1.1. Planteamiento del Problema

Los pavimentos para obras portuarias se deben diseñar para asegurar un buen desempeño durante su vida útil, ante deterioros del tipo: agrietamiento por fatiga y térmico, deformación permanente, daño por humedad, fracturas, deflexiones entre otros, acorde al tipo de pavimento empleado.

En Costa Rica no existe documentación relacionada al diseño de pavimentos para obras portuarias, por lo que se desconocen los tipos de cargas, tipos de equipos, la logística dentro de una terminal portuaria y por tanto se desconoce el proceder correcto para diseñar un pavimento ante cargas pesadas en una terminal portuaria. La Figura 1 ejemplifica una de las etapas de transporte de cargas, esto es la carga o descarga de

contenedores desde los barcos, desde o hacia los patios de almacenaje. Lo anterior se asocia casos de carga y descarga de las estructuras de pavimento.



Figura 1. Zona típica de descarga de una terminal de contenedores.

Nota: Tomado de (PIANC, 2015)

La variedad de equipos que intervienen en la movilización de cargas es muy diversa, la Figura 2 muestra equipos como: grúas pórtico, cargadores y equipos convencionales de transporte como camiones.



Figura 2. Equipos y terminal de contenedores típica.

Nota: Tomado de (PIANC, 2015)

1.2. Objetivo general

Desarrollar una guía para el diseño y gestión de estructuras de pavimento en obras portuarias en Costa Rica

1.3. Objetivos específicos

- Sugerir una metodología de diseño de pavimentos en obras portuarias.
- Generar una guía de diseño y gestión de pavimentos para obras portuarias en Costa Rica.
- Aplicar la guía en un caso nacional (Terminal de Contenedores de Moín - TCM) realizando un análisis técnico-económico.

1.4. Importancia

La importancia del proyecto radica en solventar un vacío existente en el área de pavimentos, específicamente en el área de puertos. El desarrollo de investigación, guías y especificaciones gira en torno a pavimentos para carreteras, por tanto, cuando existe la necesidad de diseñar, analizar o gestionar pavimentos para obras portuarias, no se tiene un panorama claro de los pasos y aspectos a considerar dentro del diseño de una estructura de pavimento para puertos.

1.5. Alcance

En el desarrollo del presente proyecto se considerará el diseño específico de pavimentos para puertos. El alcance del proyecto se establece acorde a:

- La guía de diseño se basará en fuentes bibliográficas únicamente.
- Para la aplicación al proyecto de Nueva Terminal de Contenedores de Moín, el estudio se limita al uso de la información geotécnica disponible, obtenida de los ensayos in situ y pruebas de laboratorio realizadas durante la campaña de exploración específica para el proyecto en cuestión.
- El estudio no contempla la ejecución de algún tipo de ensayo de laboratorio o en sitio adicional.
- El estudio económico se realiza sustentado en costos aproximados del mercado.

1.6. Limitaciones

- La ausencia de normativa nacional para el diseño y construcción de pavimentos en obras portuarias y terminales de contenedores.
- Las modelaciones mecánicas se realizan mediante software para análisis multicapa elástico, en aquellos tipos de pavimentos que lo permitan.

- Las propiedades mecánicas utilizadas en los diseños de las estructuras de pavimento aplicados a la Nueva Terminal de Contenedores serán estimadas acorde a valores típicos de materiales locales.

1.7. Metodología

La metodología planteada para la ejecución de este trabajo de investigación aplicado se observa en la Figura 3, a continuación, se describen de manera general las fases planteadas para la consecución de objetivos:

1.7.1. Fase 1

Se inicia esta fase realizando una revisión bibliográfica de fuentes de información disponible. De esta revisión y análisis se determina la información esencial para el desarrollo del trabajo de investigación aplicada. El resultado de esta fase será el método de análisis y diseño que sea más conveniente dadas las circunstancias nacionales.

1.7.2. Fase 2

Se desarrolla la guía para el diseño y gestión de pavimento portuarios. Se realiza un análisis de la información y fuentes disponibles, se establece el flujo de información necesaria para realizar un diseño de pavimentos en puertos.

1.7.3. Fase 3

Esta fase consiste en la aplicación de la guía definida a un proyecto portuario real. En este caso se aplica al proyecto de la Nueva Terminal de Contenedores de Moín, se realizan diseños de estructuras de pavimentos considerando varias opciones de tipológicas. Se realiza un análisis técnico - económico comparativo de los resultados, de tal manera que se logren establecer ventajas y desventajas de la aplicación de cada tipología de pavimento en obras portuarias.

1.7.4. Fase 4

Finalmente, con el problema planteado y resuelto, se realiza el análisis de resultados obteniéndose las conclusiones y recomendaciones del caso.

1.7.5. Fase 5

Generación del documento final.

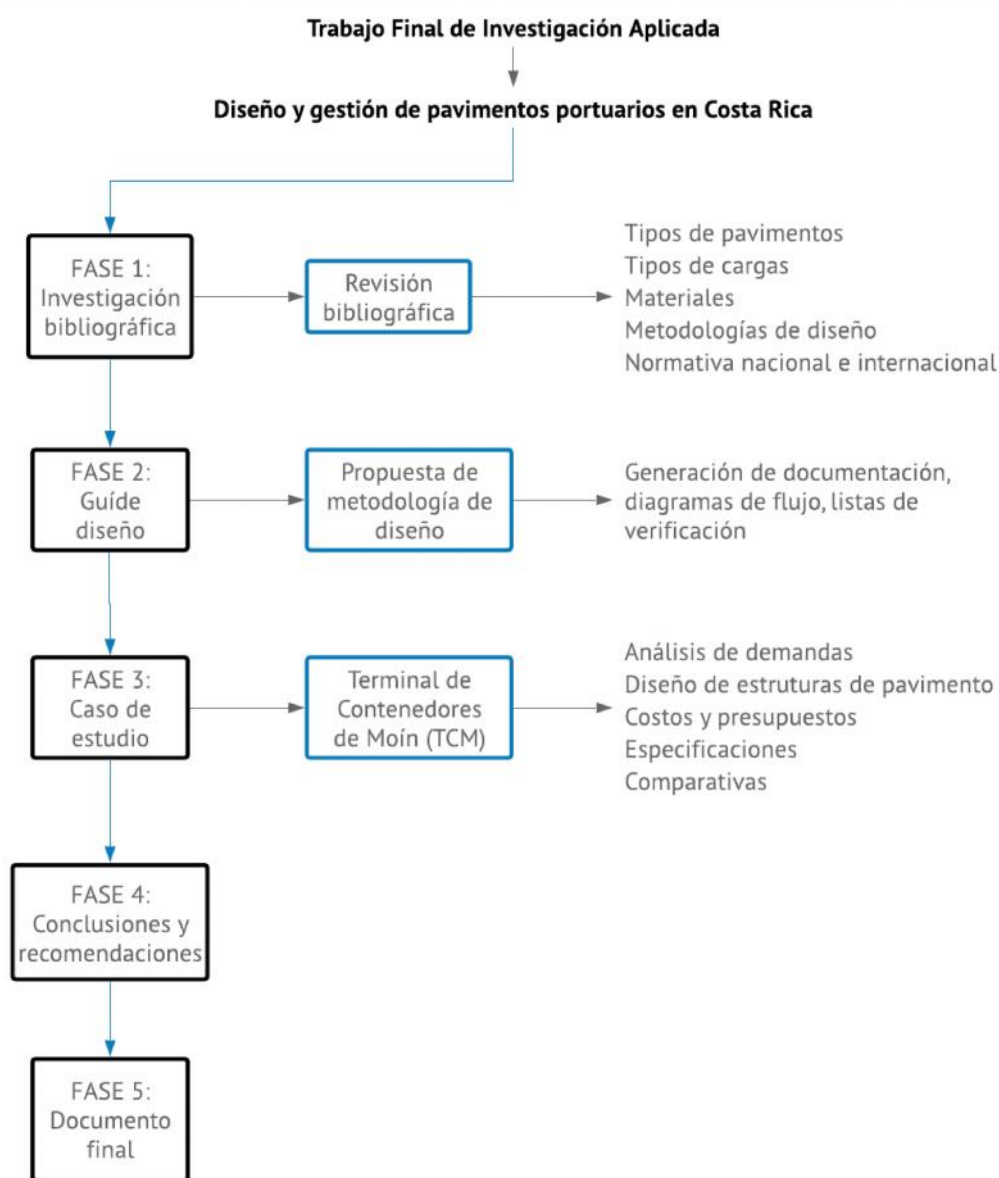


Figura 3. Metodología del proyecto

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Se realiza una exposición general relacionada a las fuentes bibliográficas disponibles actualmente asociadas específicamente a guías de diseño de pavimentos para obras portuarias. Producto de la investigación bibliográfica realizada, se consultaron algunas guías existentes y que se pueden considerar como las principales fuentes de consulta a nivel mundial:

1. **British Port Association (BPA), Reino Unido:** El manual de BPA se basa en la producción inicial de un diseño para la siguiente estructura de pavimento: bloques de pavimento de concreto de 8 cm + capa arena de 3 cm + mínimo 20 cm de base mejorada + roca triturada de sub-base de 15 cm (Foundation Class 2 en BPA) + capa de cobertura si CBR < 5%. El diseño inicial se puede usar como base para producir diseños usando muchas combinaciones de materiales mediante "Factores de Equivalencia de Materiales" (MEF). Utiliza diagramas de diseño que fueron producidos mediante el análisis de elementos finitos axi-simétricos de una amplia gama de tipos de pavimento bajo diferentes cargas.
2. **ROM 4.1-94 Proyecto y construcción de pavimentos portuarios / Puertos del Estado, España:** Incluye un catálogo que comprende 15 estructuras para cinco categorías de puertos: comercial, industrial, militar, pesquero y de ocio. Abarca una amplia gama de tipos de pavimentos portuarios, no solo pavimentos de terminales de contenedores. Este método no requiere software y se basa en la determinación de: clase de subrasante, clase de uso, tipo de área (para uso comercial las opciones son: operación, almacenamiento a granel sólido, almacenamiento de mercadería general, almacenamiento de contenedores, estacionamiento de remolques, otro estacionamiento) y la clase de tráfico. La clasificación del tráfico se basa en la intensidad de la carga y la presión. En los casos en que la carga excede las 140 t y la presión excede los 2.6 MPa, el documento recomienda que se realice un estudio específico del sitio.
3. **Guía de diseño de pavimentos industriales de servicio pesado – MINCAD, Australia:** Este método aborda el diseño de pavimentos de asfalto de alta resistencia solamente. Los cálculos se realizan para una carga equivalente que tiene en cuenta los efectos de proximidad de la rueda. La vida de diseño se considera entre 15 y 25 años. Los efectos dinámicos se toman del manual BPA del

Reino Unido. Los pesos de los contenedores son de 4 toneladas a 5 toneladas mayores que los que se muestran en el Manual de BPA. Las características del material están adaptadas al ambiente australiano. Por ejemplo, los valores de la relación de Poisson y el módulo elástico se basan en la alta temperatura y la baja velocidad, es decir, se muestra que los asfaltos tienen valores de rigidez más bajos que los recomendados por las guías de pavimento del hemisferio norte, aunque la guía no proporciona las leyes de fatiga.

- 4. Container Terminal and Intermodal Rail Yard Operational Area Consideration for Pavement Design, Puerto de Los Angeles, Estados Unidos:** esta guía contempla conceptos de operación de terminales, tipos de equipos y determinación de repeticiones de carga. Se enfoca en pavimentos flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos de concreto compactado con rodillo.

2.2. Zonificación para la pavimentación de obras portuarias

En esta sección presenta brevemente las distintas zonas en las que se subdivide un patio para almacenaje de contenedores. Según se lee en el ROM 4.1 (Reglamento de Obras Marítimas de España, 1994), el diseño de pavimentos portuarios requiere de realizar una clasificación de las superficies acorde al uso de estas y posteriormente acorde a la actividad que se va a desarrollar.

Dentro de las terminales se suele distinguir tres zonas en función de las actividades que en ellas se realizan:

- 1. Zona de operación:** Donde se realiza el intercambio modal tierra-mar y donde es posible realizar un almacenamiento transitorio de la mercancía.
- 2. Zona de almacenamiento:** Soporta las operaciones de transporte, almacenamiento y entrega/recepción los contenedores. Su disposición en planta depende fundamentalmente de la forma de explotar la terminal, y de las características del tráfico portuario de los contenedores. Es fundamental la elección de los equipos de manipulación que se utilicen. La **Figura 4** muestra un ejemplo de zona de almacenamiento real:



Figura 4. Zona de almacenamiento de contenedores típica
Nota: Tomado de (Nichol & Moffat, 2010)

3. **Zona de servicio:** Donde se ubican las dependencias del personal, parqueos, talleres, etc.
4. **Zona de puertas de acceso a camiones:** Se utilizan para obtener información respecto a la entrada y salida de camiones con contenedores. Un ejemplo se muestra en la **Figura 5:**



Figura 5. Zona de puertas de acceso
Nota: Tomado de (Nichol & Moffat, 2010)

El **Cuadro 1** resume de manera general la clasificación aplicable a las diferentes zonas dentro de una misma superficie portuaria:

Cuadro 1. Usos de las superficies portuarias

Usos	Zonas	Situaciones
		Por rodadura
		Por elevación
COMERCIAL	OPERACIÓN	Por rodadura y elevación
Graneles líquidos		Por sistemas continuos
Graneles sólidos ordinarios		Depósito
Graneles sólidos pesados		Circulación de equipos de
Mercancía general convencional	ALMACENAMIENTO	movilidad no restringida
Mercancía general pesada		Circulación de equipos de
Mercancía general unificada		movilidad restringida
• Contenedores	VÍAS DE COMUNICACIÓN	Vías de maniobra
• Semirremolques		Viales de acceso
Otros tráficos	COMPLEMENTARIAS	estacionamiento
INDUSTRIAL	Análogo a uso comercial para mercancía general pesada	
MILITAR	Análogo a uso comercial para mercancía general convencional	
	OPERACIÓN	Clasificación y preparación
	CLASIFICACIÓN,	Depósitos
	PREPARACIÓN Y VENTA	
PESQUERO	VÍAS DE COMUNICACIÓN	Vías de acceso
		Vías de maniobra
	COMPLEMENTARIAS	Circulación
		Estacionamiento
DEPORTIVO O DE	OPERACIÓN O VARADA	Grandes embarcaciones
RECREO		Pequeñas embarcaciones
	COMPLEMENTARIAS	Circulación
		Estacionamiento

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

2.3. Tipos y caracterización de cargas en pavimentos portuarios

Para cada una de las zonas definidas en la sección 2.1 se definen diferentes clasificaciones de cargas actuantes. Las cargas se clasifican en primer lugar por el efecto sobre el pavimento y en segundo lugar por la intensidad de uso con que se aplican durante la vida útil de cada estructura de pavimento.

Se diferencian por un lado las cargas que transmiten al pavimento los materiales o mercancías acopiados o almacenados y por otro lado las cargas que aplican los equipos que se emplean en la manipulación de dichos materiales o mercancías.

2.3.1. Cargas de estacionamiento o almacenamiento

En ROM 4.1, se definen como cargas de naturaleza variable, debidas fundamentalmente al peso de mercancías almacenadas o apiladas, ya sea directamente sobre la superficie o en el interior de elementos auxiliares para su transporte y manipulación.

El valor de la acción se determina teniendo en cuenta el uso previsto para la superficie, la zona de esta en que actúa y la forma en que solicita al firme, tomando en consideración los siguientes factores:

- Naturaleza de la mercancía depositada o apilada, con sus características físicas como pueden ser en su caso el peso específico y el ángulo de rozamiento interno.
- Forma de presentación de la mercancía (mercancía general, graneles sólidos, contenedores, semirremolques, etc.).
- Forma y dimensiones de los acopios y apilamientos.
- Cantidad máxima que puede manipularse.
- Métodos y equipos de manipulación.

Estas cargas se consideran verticales, repartidas o concentradas según la naturaleza de los materiales apilados o almacenados y su forma de actuación o apoyo; son cargas cuya actuación no supone aceleraciones significativas en los firmes. A los efectos del dimensionamiento de éstos, se consideran cargas repartidas las debidas al almacenamiento de graneles sólidos y, salvo algunos casos, de mercancía general; por el contrario, se consideran como concentradas las cargas aplicadas por contenedores y semirremolques, así como también las debidas a productos manufacturados apoyados sobre durmientes.

2.3.1.1. Cargas de almacenamiento de graneles solidos

Se considera el máximo peso de los materiales por unidad de superficie, transitoriamente estacionados en la zona de operación o almacenados en la zona de almacenamiento en las condiciones de acopio previstas.

Para cada material el esfuerzo unitario se determina como:

$$q_{v1} = \gamma + N_0$$

Ecuación 1

Donde:

γ : peso unitario del material almacenado, en kN/m³.

H_a : altura máxima de almacenamiento o estacionamiento, en m.

A falta de criterios específicos de proyecto o de explotación se tomarán las siguientes presiones de contacto de almacenamiento de graneles sólidos:

En zonas de operación:

- Graneles sólidos ordinarios: 0.04 MPa
- Graneles sólidos pesados: 0.07 MPa

En zonas de almacenamiento o estacionamiento:

- Graneles sólidos ordinarios: 0.08 MPa
- Graneles sólidos pesados: 0.15 MPa

Por último, hay que señalar, que todas estas sobrecargas fijas de almacenamiento o estacionamiento serán únicamente aplicables a la fase de servicio del pavimento que se esté considerando en cada momento.

2.3.1.2. Cargas de almacenamiento de mercancía general

Se considera el máximo peso de las mercancías por unidad de superficie, transitoriamente

estacionadas en la zona de operación o almacenadas en la zona de almacenamiento en las condiciones de estiba previstas. Estas cargas son las que hay que tener en cuenta no sólo en las correspondientes zonas de uso comercial (mercancía general pesada o convencional) sino también, a falta de criterios específicos de proyecto, en las de uso industrial (mercancía general pesada) y de uso militar (mercancía general convencional).

Para cada material el esfuerzo unitario se determina según la Ecuación 1.

Por otro lado, debe considerarse que pueden presentarse cargas concentradas producidas por productos manufacturados (productos siderúrgicos, prefabricados de concreto, etc.) apoyados sobre durmientes, con presiones de contacto de hasta 2.5 MPa. A falta de criterios específicos de proyecto o de explotación se tomarán las siguientes cargas y presiones de contacto de almacenamiento de mercancía general:

En zonas de operación:

- Mercancía general convencional: 400 kN y 0.8 MPa
- Mercancía general pesada: 900 kN y 1.8 MPa

En zonas de almacenamiento o estacionamiento:

- Mercancía general convencional: 700 kN y 1.5 MPa
- Mercancía general pesada: 1200 kN y 2.0 MPa

Por último, hay que señalar, que todas estas sobrecargas fijas de almacenamiento o estacionamiento serán únicamente aplicables a la fase de servicio del pavimento que se esté considerando en cada momento.

2.3.1.3. Cargas en zonas de almacenamiento de contenedores

Las cargas de los contenedores se transmiten al firme por elementos de apoyo de 0,178 x 0,162 m² situados en las esquinas, los cuales sobresalen de su cara inferior 0,0125 m y son empleados para aislar del suelo la mercancía y facilitar su manipulación.

En ocasiones, cuando existen apilamientos de varios contenedores en altura y sobre todo cuando se apoyan sobre una superficie flexible, se pueden producir contactos con el pavimento en otros puntos distintos de las esquinas, llamados puntos de descarga (esta situación no se da sin embargo en el caso de los contenedores frigoríficos, puesto que los largueros inferiores son más rígidos).

La unidad de medida en el transporte de los contenedores es el TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) o contenedor equivalente de 20 pies de longitud.

Las dimensiones exteriores del contenedor normalizado de 20 pies (6.1 m) son: 20 pies (6.1 m) de largo por 8 pies (2.4 m) de ancho por 8,5 pies (2.6 m) de altura. Su volumen exterior es de 1.360 pies cúbicos equivalentes a 38.51 metros cúbicos. Su capacidad es de 1165,4 pies cúbicos equivalentes a 33 metros cúbicos. Existe una carencia de estandarización en términos de alto, que va desde 4 pies y 3 pulgadas (1,30 m) a 9 pies y 6 pulgadas (2,90 m), siendo la altura más frecuente la de 8 pies y 6 pulgadas (2,59 m).

Los más habituales actualmente son los que tienen 20 pies (1 TEU) y 40 pies (2 TEU). Existen también contenedores de 10 pies (0.5 TEU) y de 30 pies (1.5 TEU) y están comenzando a utilizarse los de 50 pies (2.5 TEU). El TEU también se utiliza como unidad de medida del transporte de cajas móviles sobre semirremolques.



Figura 6. Contenedores de 53' 48' 45' 40' y 20' apilados

Las cargas totales de los contenedores son muy variables. Para un contenedor de 20 pies la carga máxima es de unos 200 kN, pero se puede estimar que la carga media no supera los 130 kN. Por su parte, para un contenedor de 40 pies la carga máxima es de unos 300 kN, pudiéndose estimar una carga media no superior a 200 kN.

Las presiones de contacto sobre el pavimento dependen de la carga, de la forma de almacenar los contenedores (aislados, en fila simple o en fila múltiple o bloque), de las alturas empleadas (de una a cinco alturas generalmente, aunque puede sobrepasar esta última altura), de la flexibilidad o rigidez del propio pavimento y de que se produzcan o no los citados puntos de descarga.

Las formas de almacenamiento (distribución en planta y alturas) dependen directamente de criterios logísticos y de explotación de la instalación y de los equipos de manipulación empleados. A falta de criterios específicos en el **Cuadro 2** se indican las distribuciones y alturas máximas a considerar según los equipos de manipulación que se empleen. En el caso de filas o bloques, la separación o distancia libre entre dos contenedores contiguos puede variar entre ser prácticamente nula (lo que ocurre normalmente cuando se trata de contenedores vacíos) a ser de 0,40 o 0,80 m para permitir la lectura de los códigos que llevan escritos en los laterales (lo que ocurre normalmente cuando se trata de contenedores llenos).

Cuadro 2. Distribución de alturas de contenedores

Equipo de manipulación	Forma de distribución	Altura máxima Nº. Contenedores
Cargador frontal	Filas simples o dobles	4
Cargador lateral	Filas simples o dobles	4
Carretilla pórtico	Filas simples	3
Grúa automóvil	Bloque pequeño	4
Transtainer (Luz media, < 30 m)	Bloque mediano	4
Transtainer (Luz grande, > 30 m)	Bloque grande	5

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

La probabilidad de que todos los contenedores estén totalmente cargados en altura es en principio relativamente pequeño y depende de los criterios específicos de explotación de la instalación. Por esta razón, para la estimación de las cargas aplicadas algunos autores (BPA) propugnan la introducción de coeficientes reductores de peso según la altura de almacenamiento (hasta el 40 % para apilamientos en 5 alturas). Sin embargo, hay sistemas de explotación en los cuales los contenedores se agrupan por su carga, con lo cual pueden darse apilamientos de cinco contenedores totalmente cargados.

2.3.1.4. Cargas de estacionamiento de semirremolques

Una forma habitual de explotación portuaria es el almacenamiento sobre semirremolques (mercancía general movilizada en contenedores o en cajas móviles; a veces, sobre cajas abiertas, elementos de gran volumen como, por ejemplo, bobinas), que quedan de esta forma aparcados a la espera de que la cabeza tractora los traslade. Los ejes traseros de estos semirremolques (simples, tándem o trídem) no producen especiales deterioros en los firmes, ya que cumplen las condiciones para circular por carretera. Sin embargo, los distintos dispositivos de que van provistos estos semirremolques para apoyarse en el suelo en su parte delantera cuando se encuentran desenganchados del tractor pueden producir importantes deterioros. Según dicho dispositivo los semirremolques se clasifican en tres tipos:

- Los provistos en su parte delantera de dos parejas de ruedas metálicas de 0.088 m de anchura y 0.225 m de diámetro cada una de ellas; con el semirremolque a plena carga (cargas de 140 kN en su parte delantera) pueden dar presiones de contacto de hasta 40 MPa, con una superficie de contacto teórica de 0.088 x 0.010 m².

- Los que disponen para el apoyo delantero de dos placas metálicas de $0.225 \times 0.150 \text{ m}^2$, que producen una presión de contacto del orden de 2 MPa para una carga total de 140 kN en la parte delantera.
- Los que tienen un aparato de apoyo delantero consistente en una vigueta con una superficie de apoyo de $0.130 \times 2.145 \text{ m}^2$, que produce una presión de contacto sobre el pavimento de 0.5 MPa para cargas de 140 kN en la parte delantera.

En suma, y salvo en el último de los tipos descritos, se producen unas elevadas presiones de contacto. Aunque éstas pueden resultar menores en el caso de superficies de apoyo relativamente deformables, no resultan aconsejables determinados pavimentos, como por ejemplo los de mezcla bituminosa, en los que con tiempo caluroso los apoyos se incrustarían incluso varios centímetros. Sin embargo, existe la posibilidad de pavimentar de manera diferenciada una franja (con concreto, adoquines, etc.) en la que se situarían los apoyos delanteros, pavimentando todo el resto de la zona como las zonas complementarias de estacionamiento (y siendo posible así la pavimentación con mezclas bituminosas salvo en dichas franjas). A falta de datos o de criterios específicos fijados en el proyecto o en la explotación de la instalación se considerarán para el dimensionamiento de los firmes en zonas de estacionamiento de semirremolques las siguientes cargas y presiones: 70 kN y 40 MPa, respectivamente.

Estas cargas de estacionamiento de semirremolques hay que tenerlas en cuenta no sólo en las correspondientes zonas de uso comercial sino también en las de uso militar.

2.3.1.5. Cargas de los equipos e instalaciones de manipulación de mercancías

Son las cargas de naturaleza variable transmitidas al pavimento por los sistemas y equipos de manipulación de mercancías, materiales o suministros.

El proyectista debe considerar de acuerdo con los criterios preestablecidos de planificación

portuaria y los específicos del cliente o de la autoridad portuaria, las características de los equipos de manipulación de mercancías que operan en la zona, su ubicación y la forma en que solicitan al pavimento. El diseñador debe disponer de todos los datos relativos a los equipos concretos de manipulación que van a operar en la zona, los cuales deben ser suministrados por los fabricantes de dichos equipos.

A los efectos de cómo se transmiten las cargas y de la influencia en el dimensionamiento de los firmes, los equipos de manipulación se pueden clasificar en función de su movilidad:

- equipos de circulación restringida, sobre carriles o sobre vigas carril.
- equipos de circulación no restringida, sobre neumáticos o sobre orugas.

En el **Cuadro 3** se da un resumen de las características fundamentales de los distintos equipos de manipulación a efectos de dimensionamiento de los pavimentos.

Se debe considerar que posibles situaciones en las que puedan producirse cargas máximas por punto de apoyo o máximas presiones de contacto superiores a las indicadas (1100 kN y 2.6 MPa, respectivamente) requieren un análisis especial.

Por otro lado, la existencia de esfuerzos horizontales importantes (por giros, aceleraciones y frenadas, etc.) no se considera a los efectos del dimensionamiento estructural de los pavimentos, pero sí debe tenerse en cuenta al establecer las características superficiales que deben tener los pavimentos.

Cuadro 3. Cargas y presiones

Equipo de manipulación	Carga máxima por punto de apoyo (kN)	Máxima presión de contacto (MPa)
Pórtico de almacenamiento	450	1.1
Carretilla pórtico	130	1.1
Cargador frontal de 5 ton	30	0.8
Cargador frontal de 20 ton	110	0.7
Cargador frontal de 40 ton	220	0.6
Cargador lateral	230	0.6
Grúa automóvil de 10 ton	150	0.4
Grúa automóvil de 30 ton	400	0.9
Grúa automóvil de 50 ton	550	1.3
Grúa automóvil de 70 ton	750	1.8
Grúa automóvil de 140 ton	1100	2.6
Tractor más semirremolque de 40 ton	35	2.2
Tractor más semirremolque de 80 ton	70	2.2

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

A. Grúas pórtico (portal cranes)

Estos equipos son las grúas de muelle: se encuentran en la zona de operaciones y se dedican a la transferencia de las mercancías entre los modos terrestre y marítimo.

Pueden trabajar con gancho para mercancía general (y excepcionalmente para contenedores) o con cuchara para graneles. Son giratorias y se pueden desplazar paralelamente al cantil. Su circulación es restringida sobre carriles que a su vez se disponen sobre vigas o sobre pilotes. Por esta razón, las cargas que transmiten no actúan sobre los pavimentos. La **Figura 7** muestra un ejemplo de este tipo de gruas:



Figura 7. Grúas pórtico.

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

B. Grúas porta contenedores (portainers)

Son equipos especializados en el movimiento de contenedores entre los diferentes modos de transporte y están también situados en la zona de operaciones. Disponen de una pluma abatible formando un largo voladizo. No son giratorias, el carretón se mueve perpendicularmente al cantil y pueden desplazarse a lo largo del muelle como las grúas pórtico. Son también de circulación restringida sobre carriles cimentados en la forma descrita en el apartado anterior. La **Figura 8** muestra un ejemplo de este tipo de equipo:



Figura 8. Grúas porta contenedores.

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

C. Pórticos de almacenamiento (transtainers)

Se dedican a la manipulación de contenedores en las zonas de almacenamiento de estos, incluso en 5 alturas en el caso de los pórticos con luces superiores a 30 m. Se desplazan sobre neumáticos o sobre carriles. Pueden resultar especialmente dañinos, pues transmiten cargas del orden de 450 kN por rueda y presiones de contacto de 1.1 MPa. Sin embargo, tienen circulación restringida a caminos de rodadura preestablecidos, diseñados normalmente en forma de viga; incluso, debido a que en la intersección de dos vigas es donde se producen los giros de los que llevan neumáticos, se suelen colocar en estos puntos planchas de acero con unas dimensiones de 1.5 x 1.5 m² en planta y 0.020 m de espesor. En resumen, el camino de rodadura debe ser sobre viga flotante, consiguiéndose así que el dimensionamiento de los firmes pueda independizarse de las características de estos equipos. La **Figura 9** esquemática este tipo de equipo:

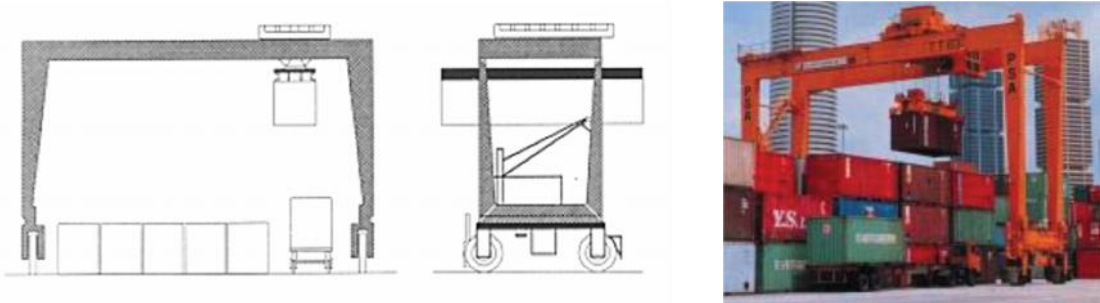


Figura 9. Portal de almacenamiento.

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

D. Carretillas pórtico (straddle carriers)

Son vehículos cargadores que circulan sin restricciones por toda la zona de maniobra y almacenamiento, destinados a la manipulación de contenedores, admitiendo almacenamientos incluso en 3 alturas. Sus ruedas pueden tomar todas las direcciones posibles, con lo que al girar ángulos rectos en muy cortos recorridos o incluso parados los grandes esfuerzos horizontales que se producen pueden causar deterioros importantes al pavimento. En el peor de los casos alcanzan hasta 260 kN por par de ruedas gemelas y presiones de contacto de hasta 1.1 MPa. La **Figura 10** esquemática este tipo de equipo:

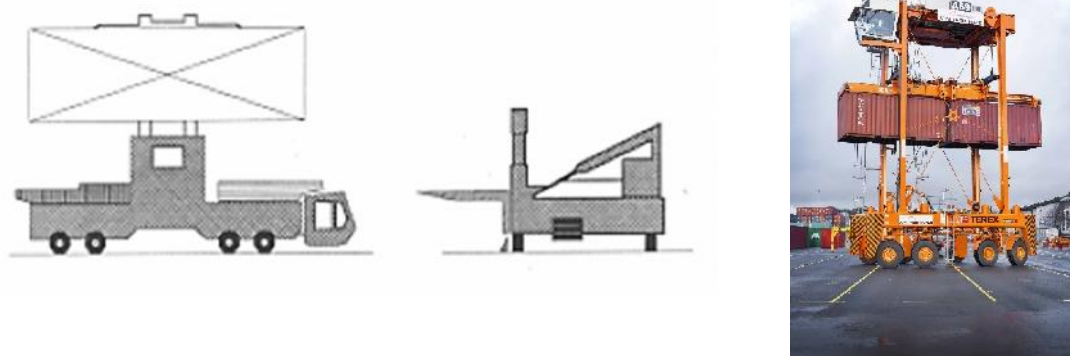


Figura 10. Caretillo pórtico.

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

E. Cargadores frontales (front lift trucks)

También de circulación no restringida, son los vehículos más agresivos frente al pavimento de cuantos se utilizan en la explotación portuaria. Se emplean para manipular contenedores, admitiendo almacenamientos incluso en 4 alturas, y también para mercancía general, en cuyo caso son mucho más pequeños y menos potentes. Todos tienen ruedas gemelas en el eje frontal y ruedas simples en el eje posterior. Entre los que se dedican a la manipulación de contenedores hay dos grandes grupos: los que sólo manejan contenedores de 20 pies y los que pueden manejar contenedores de 40 pies. En este último caso, pueden llegar a cargar sobre el eje delantero hasta 720 kN, lo que implica una carga por rueda de 120 kN. Esta carga puede llegar hasta 150 kN en el caso de que el vehículo esté dotado de una pluma telescópica. En el caso del cargador frontal de horquilla (forklift) se llegan a aplicar incluso cargas de 220 kN por rueda al manejar contenedores de 40 pies con presiones de contacto de 0.6 MPa. La **Figura 11** esquemática este tipo de equipo:

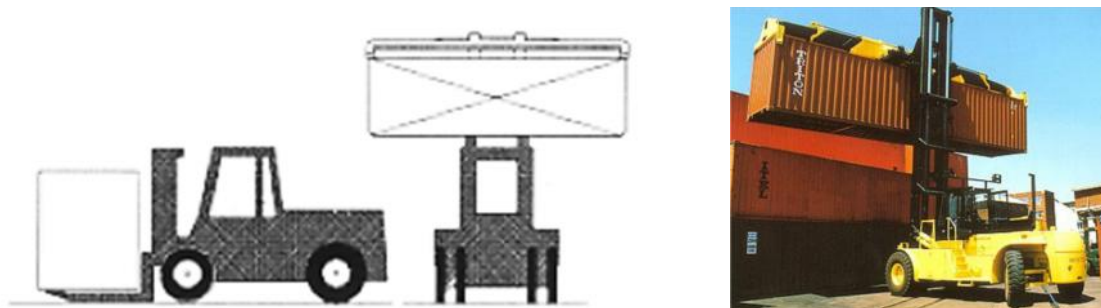


Figura 11. Cargador frontal.

Nota: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

F. Cargadores laterales (side loader lift trucks)

Son vehículos de circulación no restringida, empleados a veces en la manipulación de mercancía general, pero sobre todo en la de contenedores, admitiendo almacenamientos incluso de 4 alturas. La situación más dañina con estos vehículos no se produce en marcha, sino en el momento de cargar o descargar, ya que se apoyan en unos gatos estabilizadores que soportan entre el 70 y el 95 % del peso conjunto del vehículo y del contenedor. El número de gatos varía entre 2 para las máquinas pequeñas y 4 para las grandes que manejan contenedores de 40 pies. En estos últimos las presiones de contacto máximas pueden llegar a 0.6 MPa, siendo la carga de 230 kN sobre cada apoyo. La **Figura 12** esquemática este tipo de equipo:

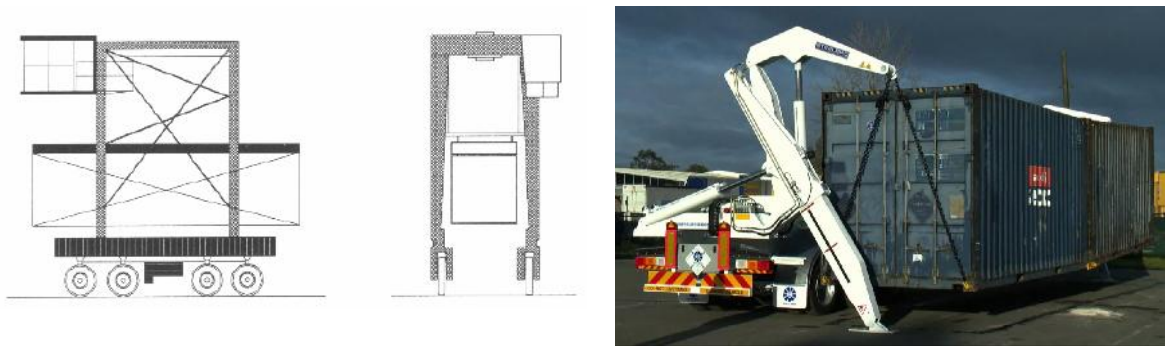


Figura 12. Cargador lateral.

Nota: Modificado de (*Puertos del Estado, 1994*)

G. Grúas móviles (mobile cranes)

Se utilizan fundamentalmente en la manipulación de mercancía general. Cuando manipulan contenedores admiten almacenamientos incluso de 4 alturas. Tienen capacidades de elevación que van, con radios cortos, de 10 a 140 t, aunque las longitudes de pluma pueden llegar a los 12 m o incluso algo más. Las peores condiciones de trabajo se producen operando lateralmente o hacia atrás sobre gatos estabilizadores. En esas circunstancias, en las grúas de 140 t la carga sobre cada apoyo es de 1100 kN con una presión de 2,6 MPa. La **Figura 13** esquemática este tipo de equipo:

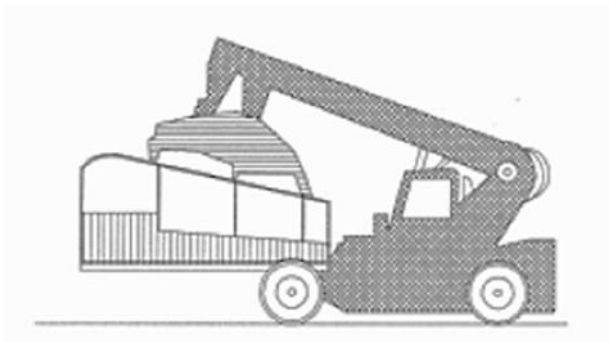


Figura 13. Grúa móvil.

Nota: Modificado de (*Puertos del Estado, 1994*)

H. Semirremolques

Se emplean tanto para el traslado como para el almacenamiento (en este caso desenganchando el tractor) de mercancía general y de contenedores. La **Figura 14** esquemática este tipo de equipo:



Figura 14. Semirremolque.

Nota: Modificado de (*Puertos del Estado, 1994*)

2.3.1.6. Cargas de tráfico pesado convencional

El tráfico pesado convencional es el que puede circular sin restricciones por las redes de carreteras. En los puertos este tráfico se puede dar en todas las zonas, pero es el característico de los viales de acceso; así mismo ha de ser tenido en cuenta en el dimensionamiento de los pavimentos de las zonas complementarias.

Según las características de los neumáticos las presiones máximas de contacto varían de 0.6 a 0.9 MPa aproximadamente, aunque por efectos dinámicos pueden llegar a alcanzarse presiones de 1.5 MPa.

2.4. Operaciones en terminales de contenedores

El objetivo de esta sección es presentar de una manera general, los conceptos esenciales que se relacionan con la logística y operación de terminales de contenedores. Esto con el fin de comprender de mejor manera los métodos existentes para estimar la demanda (repeticiones) sobre los pavimentos en puertos o terminales. La manera en que opera un

puerto o terminal está en función de la distribución espacial y de los equipos existentes en la misma. Se presentan las opciones típicas de operación en puertos o terminales modernos.

2.4.1. Operaciones en patio de contenedores con equipo tipo pórtico con neumáticos de goma (RTG, por sus siglas en inglés)

El RTG moderno típico abarca un espacio que incluye seis pilas de contenedores y un carril de desplazamiento de camiones, y tiene un calibre de aproximadamente 23.5 m (77 pies). La altura RTG se expresa en términos de la altura máxima efectiva de la pila, más el espacio de paso. La **Figura 15** muestra un equipo RGT típico moderno:



Figura 15. RGT en operación
Nota: Tomado de (Nichol & Moffat, 2010)

Los camiones portacontenedores suelen atravesar toda la longitud del bloque RTG en un solo carril, con un chasis vacío parte del camino y un chasis cargado el resto del camino. La **Figura 16** muestra los movimientos que se realizan cuando se realiza carga y descarga de TEUs con este tipo de grúas:

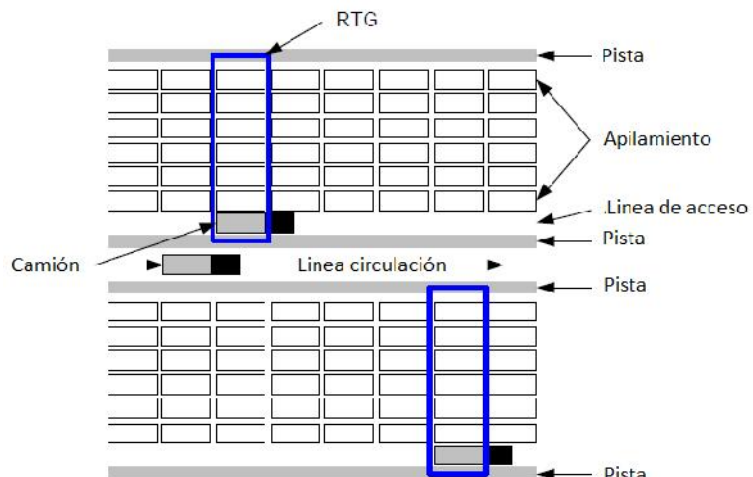


Figura 16. Accesos de camiones en operación de RTG
Nota: Modificado de (Nichol & Moffat, 2010)

2.4.2. Operaciones en patio de contenedores con equipo tipo cargador frontal

Todos los tipos de cargador frontal recogen un contenedor en una posición en voladizo afuera y frente a la distancia entre ejes de la máquina. La **Figura 17** muestra cargadores frontales en operaciones de carga y descarga de contenedores:



Figura 17. Cargadores frontales en operación
Nota: Modificado de (Nichol & Moffat, 2010)

Los camiones comúnmente atraviesan toda la longitud del bloque en un solo carril, con un chasis vacío parte del camino y un chasis cargado el resto del camino. La **Figura 18** muestre el tráfico de camiones en zonas de carga/descarga manipuladas por cargadores frontales:

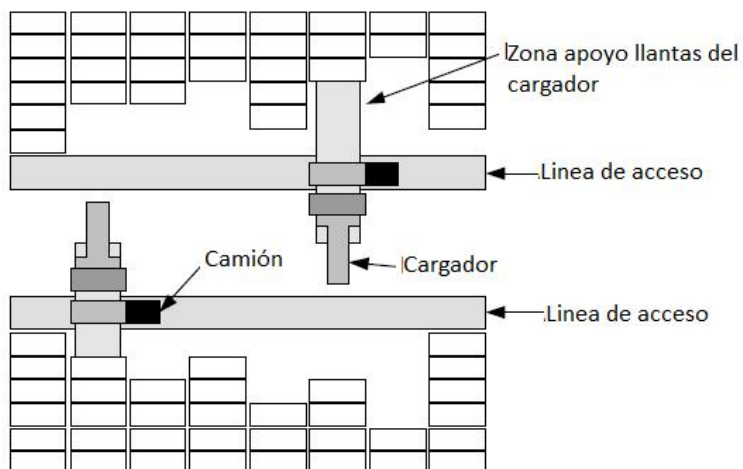


Figura 18. Accesos de camiones en operación de cargadores frontales
Nota: Modificado de (Nichol & Moffat, 2010)

2.4.3. Operaciones en patio de contenedores con equipo tipo carretilla pórtico

Las carretillas pórtico combinan la capacidad de apilar y transportar contenedores a largas distancias. La mayoría están diseñados para operaciones de "uno sobre dos". Algunas terminales ahora están utilizando uno por tres. Una alta cantidad también está disponible solo como transportador.



Figura 19. Grúa pórtico
Nota: Tomado de (Nichol & Moffat, 2010)

La **Figura 20** muestra una configuración típica en un área de almacenamiento de carretilla pórtico. Es importante tener en cuenta que los bloques adyacentes de contenedores

comparten caminos de llantas, de modo que las cadenas no pueden cruzarse en bloques adyacentes. Esto se hace para maximizar la densidad de almacenamiento. Afecta el número de pasadas de llantas sobre cualquier trayectoria de llanta.

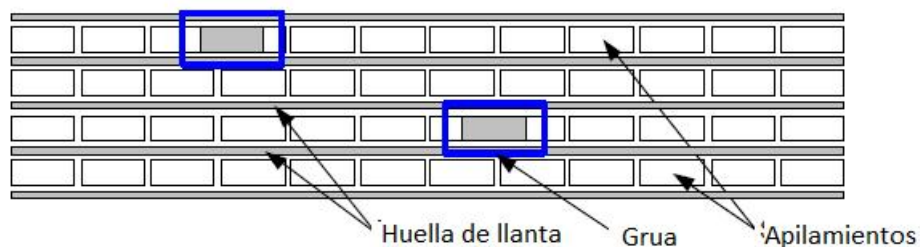


Figura 20. Accesos de camiones en operación de carretillas pódico
Nota: Modificado de (Nichol & Moffat, 2010)

2.4.4. Operaciones en patio de contenedores con equipo de ruedas / camiones



Figura 21. Camiones portacontenedores típicos
Nota: Tomado de (Nichol & Moffat, 2010)

El almacenamiento con ruedas se usa donde la baja densidad de almacenamiento es aceptable y se requiere una alta accesibilidad al contenedor. El almacenamiento con ruedas se utiliza para cargas de importación y exportación, y para envases vacíos. El almacenamiento con ruedas se usa comúnmente para contenedores refrigerados, ya que enchufar, desenchufar y dar servicio a los refrigeradores es más fácil cuando están montados y accesibles. La utilización máxima de almacenamiento suele ser muy alta, ya que no se requiere volver a manipular en ninguna circunstancia.

2.5. Análisis y diseño de pavimentos portuarios

2.5.1. Periodo de diseño

El período de diseño se refiere a la vida útil de la estructura del pavimento. También se puede considerar como el momento en que el daño acumulado en el pavimento es suficiente para hacer que la instalación sea prácticamente disfuncional, ocurre en una proporción significativa del área. Acorde a (Lancaster, Richards, Tighe, & Wardle, 2007), algunos períodos de diseño sugeridos son los siguientes:

- Rehabilitación del pavimento existente en servicio: 10 - 15 años.
- Construcción de pavimento nuevo o rehabilitación de pavimento principal: 15 - 25 años.

Acorde a la mayoría de literatura experta en el tema de pavimentos portuarios, el periodo de análisis recomendado es de 20 años.

2.5.2. Crecimiento del trafico

Respecto al comportamiento de el volumen de tráfico en el tiempo, este se considera mediante un modelo de crecimiento exponencial, se determina el factor de crecimiento acumulativo (FCA), para la cual (Lancaster, Richards, Tighe, & Wardle, 2007) recomiendan la siguiente expresión:

$$FCA = \frac{(1 + 0.01 \frac{R}{100})^P - 1}{0.01 \frac{R}{100}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

R = Tasa de crecimiento anual (%)

P = Periodo de diseño (años)

Las tasas de crecimiento recomendadas por Wardle et.al (2007) se muestran en el *Cuadro 4*:

Cuadro 4. Factor de crecimiento acumulativo (FCA)

Periodo de diseño, P (Años)	Tasa de crecimiento anual, R (%)							
	0	1	2	3	4	6	8	10
5	5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.6	5.9	6.1
10	10	10.5	10.9	11.5	12.0	13.2	14.5	15.9
15	15	16.1	17.3	18.6	20.0	23.3	27.2	31.8
20	20	22.0	24.3	26.9	29.8	36.8	45.8	57.3
25	25	28.2	32.0	36.5	41.6	54.9	73.1	98.3
30	30	34.8	40.6	47.6	56.1	79.1	113.3	164.5
35	35	41.7	50.0	60.5	73.7	111.4	172.3	271.0
40	40	48.9	60.4	75.4	95.0	154.8	259.1	442.6

Fuente: Modificado de (Lancaster, Richards, Tighe, & Wardle, 2007)

Dentro del análisis de tráfico de mercancías en contenedores, debe ser contemplada la capacidad máxima de la terminal en cuestión. Es decir, debe considerarse que no existe un crecimiento infinito de ingresos y salidas de contenedores, que existirá un tope máximo o saturación que estará en función del análisis logístico específico para el proyecto.

2.5.3. *Trafico - demanda – repeticiones de carga*

Las diferentes áreas en las terminales de contenedores pueden tener diferentes equipos y estar sujetas a diferentes repeticiones de carga. Por lo general, hay dos enfoques para calcular las repeticiones de carga de los vehículos.

Enfoque ESAL (Cargas equivalentes de un solo eje): Un enfoque es convertir varias cargas y repeticiones a un número equivalente de cargas estándar o equivalentes.

Otro enfoque más complejo, pero más preciso, caracteriza las cargas directamente por número de ejes, configuración y peso. No hay conversión a ESAL.

2.5.3.1. Puerta de entrada

Acorde a (Nichol & Moffat, 2010), se obtiene la capacidad de rendimiento estimada por año para la terminal en TEU. También se obtiene el porcentaje asumido (%) del rendimiento total que pasa por la puerta (D_T). Si no hay una instalación intermodal de ferrocarril en el muelle, el 100% pasaría por la puerta. Se utiliza la Ecuación 3 para calcular el equivalente en cargas de un solo eje (ESAL).

$$ESALs = \frac{YC}{C_4 * C_5 * DT * DD * DL * TF}$$

Donde:

C_4 = TEU / Elevación (número típico de TEU por elevación entre 1.7 a 1.85)

C_5 = Transacciones / Elevación (número típico de transacciones de camiones por elevación entre 1.5 y 2)

D_D = 50% (división direccional, 50% de entrada y 50% de salida)

D_L = 90% (% del tráfico en el carril preferido)

D_T = % (% de elevadores movidos por camión - 100% para ninguna instalación intermodal en el muelle)

T_F = 3 ESAL / Trans (número estimado de ESAL por transacción)

YC = capacidad anual total de la terminal en TEU

2.5.3.2. Área de almacenamiento con ruedas

$$ESALs = \frac{PS * SU * 3C_5}{DW * C_5 * TF}$$

Donde:

PS = número estimado de espacios de almacenamiento con ruedas

C_5 = 2 Transacciones / Slot (número típico de transacción de camión por slot)

T_F = 3 ESAL / Trans (número estimado de ESAL por transacción)

SU = utilización estimada de ranuras: entre 70 y 90%

DW = tiempo de permanencia promedio supuesto del chasis / contenedor

2.5.3.3. Operaciones de movimiento lateral / superior y camiones

Según (Nichol & Moffat, 2010) se asume que los contenedores se entregarán en camiones y se apilarán con grúas laterales o superiores. Se parte de la suposición de que el área de almacenamiento tiene la configuración que se muestra en la **Figura 22**, los cálculos son los siguientes:

Figura 22: Configuración de almacenamiento de camiones

$$R_{pet} = C_5 * C_6 * (305/DW) * SU * L * H * W / C_6 / C_7$$

la Figura 2:

Ecuac

$$R = \frac{C_5 * C_6 * (365/DW) * SU * H * W}{C_7}$$

Ecuación 6

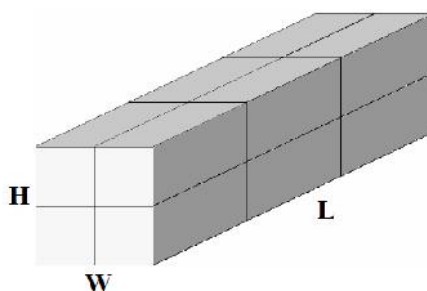


Figura 22. Dimensiones de un patio de almacenamiento.

Nota: Tomado de (PIANC, 2015)

Donde:

SU = utilización estimada: entre 70 y 90%

DW = tiempo de permanencia promedio supuesto del contenedor en días

C_4 = TEU por levantamiento (número típico de TEU por levantamiento entre 1.7 a 1.85)

C_5 = viajes por caja (2 para el área de selección lateral / superior)

C_6 = movimientos por viaje

C_7 = número de lados accesibles (1 o 2)

L = longitud de la pila en TEU

W = ancho de la pila en TEU

H = altura de la pila en TEU

2.6. Materiales para pavimentos

2.6.1. Subrasante (suelo nativo)

En función del tipo y la magnitud de las solicitaciones, las repeticiones de carga acumuladas, las características asociadas al clima y la localización de las diferentes capas de material; el comportamiento esfuerzo - deformación de un suelo puede ser de dos tipos: resiliente y plástico. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. La **Figura 23** ilustra el mecanismo de acumulación de deformación permanente:

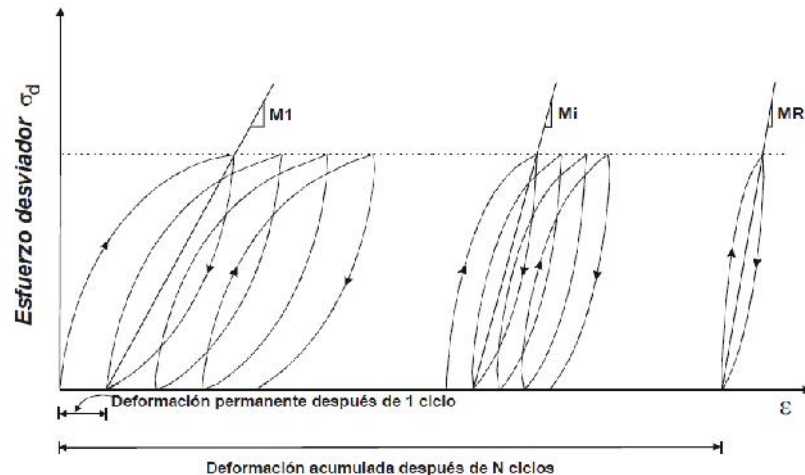


Figura 23. Comportamiento resiliente del suelo

Nota: Tomado de (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

La muestra de suelo llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente (en donde el módulo secante es igual al módulo de resiliencia).

Según se explica en (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002), el módulo de resiliencia de los suelos no es una propiedad constante, sino que depende de diversos factores:

- Parámetros de compactación: peso volumétrico seco, contenido de agua y grado de saturación.
- Método de compactación.
- Número de aplicaciones del esfuerzo.
- Tixotropía.
- Magnitud del esfuerzo desviador.
- Succión del suelo.

2.6.2. Materiales granulares – bases y subbases

Un material granular sujeto a carga cíclica, experimenta una deformación cuya magnitud es función de varios factores, como el nivel de la carga aplicada, área de contacto, condiciones de confinamiento, características del propio material, etc. La deformación total, tiene dos componentes: una definida como deformación recuperable o elástica, la cual es medible una vez que la carga deja de actuar sobre el material; la otra

componente, denominada deformación permanente, se define como “la deformación vertical no recuperable (plástica) que experimenta un material de espesor definido, en cada ciclo de carga aplicado” (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002). Este tipo de comportamiento se aprecia en la **Figura 23**.

Varios son los factores que afectan el módulo de resiliencia de un material granular, los cuales pueden clasificarse en dos grupos: en uno se pueden considerar los factores inherentes al tipo de material y sus características y, en el otro, el nivel de esfuerzos aplicado, duración del pulso de carga y el procedimiento de prueba general. A continuación se muestra un resumen de estos factores:

- Tipo de material.
- Tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico y granulometría.
- Magnitud del esfuerzo aplicado.
- Contenido de agua.

2.6.3. *Mezcla asfáltica en caliente (MAC)*

Se define como: “Mezcla de ligante asfáltico y agregado mineral gradado, mezclado a una temperatura elevada y compactada para formar una capa relativamente densa de pavimento (5% ligante y 95% agregado)” (Loría Salazar, 2018). Generalmente los componentes son:

- Ligante asfáltico
- Agregado mineral
- Aire
- Aditivos opcionales
- Aditivos del ligante (Polímeros, elastómeros, fibras, hule)
- Agregados del mineral (hule granulado, cal)

La **Figura 24** muestra los principales componentes de la MAC:

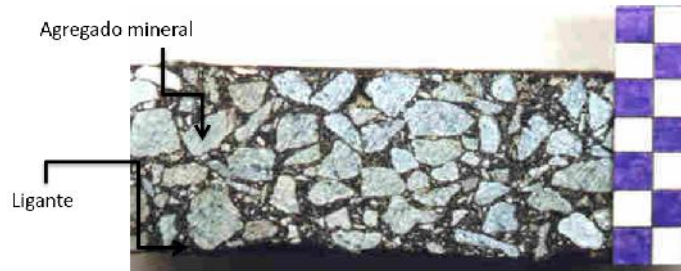


Figura 24. Componentes de la Mezcla Asfáltica en Caliente
Nota: Tomado de (Loría Salazar, 2018)

Se distinguen esencialmente tres tipos de MAC:

- Gradación densa (Bien gradada): Tamaños distribuidos uniformemente desde el más pequeño al más grande.
- Gradación abierta: Primordialmente agregado grueso con pocos finos.
- Gradación segmentada: Agregado de tamaño intermedio faltante o escaso.

2.6.4. Concreto hidráulico

El concreto hidráulico es un material que se obtiene al mezclar conglomerante (cemento), agregados (arena y piedra), agua y en algunos casos también aditivos. Los agregados son elementos inertes o relativamente inertes que dosificados convenientemente, dan una composición granulométrica adecuada para lograr resistencias óptimas. La **Figura 25** ilustra los componentes del concreto hidráulico:

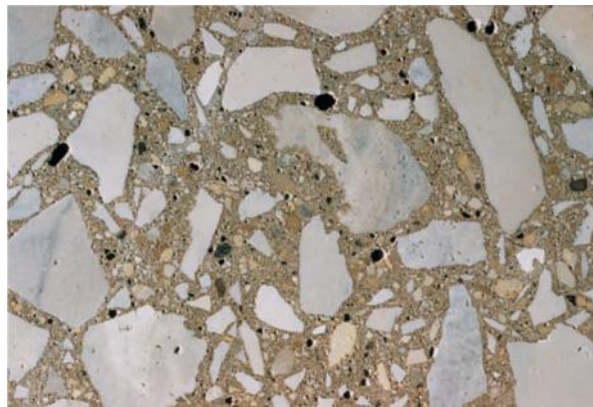


Figura 25. Componentes del concreto hidráulico
Nota: Tomado de (Kosmatka & Wilson, 2011)

La resistencia del concreto hidráulico resulta del:

- La resistencia del mortero (cemento y agregado fino)

- La adherencia entre el mortero y el agregado grueso
- La resistencia de las partículas de agregado grueso

La resistencia del concreto se ve afectada por:

- La relación agua – cemento
- Tiempo de curado
- Relación pasta – agregado
- Propiedades de los agregados
- Tipo de cemento
- Edad
- Temperatura de hidratación
- Agua
- Aditivos

Tiene un comportamiento del tipo elástico no lineal, donde se presenta un límite proporcional lineal, este comportamiento se ilustra en la **Figura 26**:

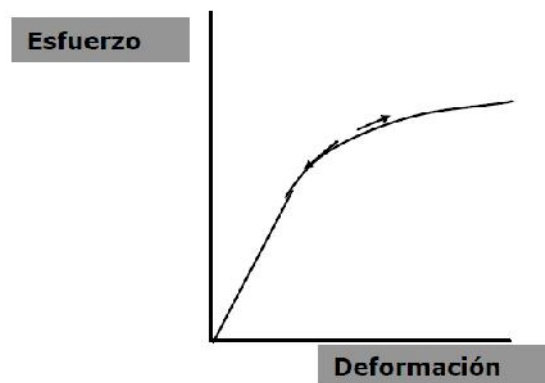


Figura 26. Comportamiento elástico no lineal del concreto hidráulico
Nota: Tomado de (Neville, 2013)

El comportamiento del concreto en el tiempo se muestra en la **Figura 27**, donde se puede observar cómo se adquiere resistencia desde la etapa de hidratación hasta los 28 días, que usualmente se establece como estándar:

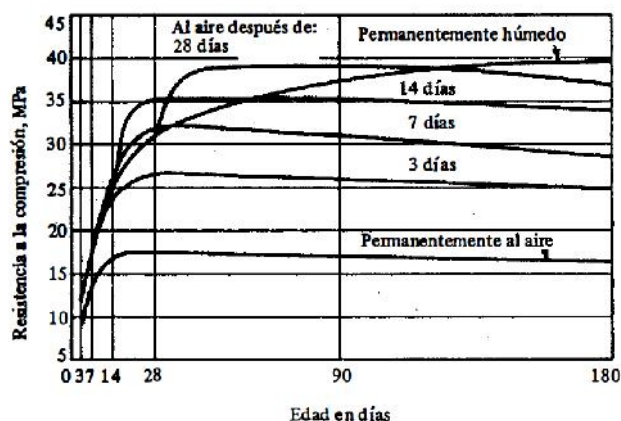


Figura 27. Generación de resistencia con la edad
Nota: Tomado de (Neville, 2013)

2.6.5. Adoquines

La palabra adoquín proviene de la palabra árabe addukkân, que significa “piedra escuadrada” o “piedra labrada”. En la actualidad, el término más usado para referirse al adoquín en países de habla inglesa es “bloque de hormigón” (concrete blocks or pavers).

Según (Echaveguren, 2013), los adoquines se clasifican internacionalmente como tipo A, B y C. La **Figura 28** ilustra los tipos de adoquines:

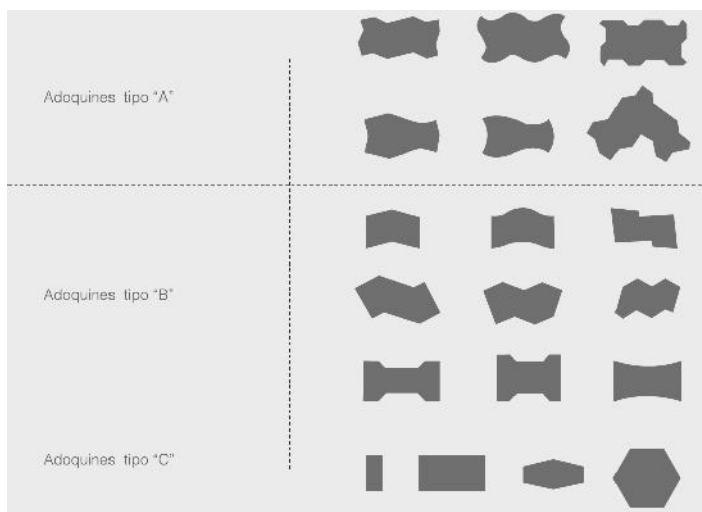


Figura 28. Clasificación de los adoquines
Nota: Tomado de (Echaveguren, 2013)

Los adoquines tipo “A” corresponden a unidades dentadas que se traban unas con otras proporcionando las mejores condiciones de inter-trabazón ante la aplicación de fuerzas verticales y horizontales. Los adoquines tipo “B” ofrecen una menor inter-trabazón y permiten un mejor desempeño ante desplazamientos paralelos a unos de sus ejes. Los

adoquines tipo “C”, en tanto, tienen formas regulares en sus caras y no ofrecen una intertrabazón favorable para resistir movimientos longitudinales o rotacionales.

En la norma ASTM C936 Especificaciones estándar para unidades solidas de concreto para pavimento (Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units) se proporcionan requisitos físicos que deben cumplir los adoquines, específicamente:

- Dimensiones: la tolerancia de ancho y largo debe ser ± 2 mm y para el espesor debe ser de ± 3 mm.
- Resistencia: para proyectos donde las exigencias de carga sean importantes se recomienda que la resistencia individual sea de 50 MPa y que la resistencia promedio de la muestra sea superior a 55 MPa. No obstante, en proyectos con menor sollicitación o con fines ornamentales pueden aceptarse resistencias en un rango comprendido entre los 40 MPa y 50 MPa.
- Absorción: la absorción promedio debe ser inferior al 5 % e individualmente inferior al 7%.
- Resistencia a la abrasión: para proyectos donde las exigencias de carga sean importantes se recomienda que la resistencia individual sea de 50 MPa y que la resistencia promedio de la muestra sea superior a 55 MPa. No obstante, en proyectos con menor sollicitación o con fines ornamentales pueden aceptarse resistencias en un rango comprendido entre los 40 MPa y 50 MPa.
- Resistencia ciclos de hielo y deshielo: cada pieza no debe perder más del 1% de masa seca después de 50 ciclos de hielo y deshielo.

2.7. Metodologías para diseño de pavimentos para cargas pesadas

En esta sección se presenta una breve descripción de las metodologías de diseño aplicables a estructuras de pavimento sometidos a cargas pesadas, los conceptos y suposiciones que contempla cada teoría. No se presenta el método de cálculo como tal, dado que se contempla su estudio y análisis dentro la guía propuesta que forma parte de este trabajo. Se da énfasis a metodologías aplicables a pavimentos asfálticos, pavimentos rígidos de concreto y pavimentos de adoquines.

2.7.1. Pavimentos asfálticos

Para el caso de pavimentos asfálticos, la metodología propuesta es la recomendada en la publicación MS-23 “Thickness Design Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads”

(Asphalt Institute, 2006). El procedimiento descrito en esta guía se basa en el concepto de que el diseño del pavimento para vehículos de múltiples ruedas puede ser logrado calculando una rueda de carga equivalente.

Considera conceptos de multicapa elástica, asume que la aplicación de cargas produce dos deformaciones elásticas críticas, como se muestra en la **Figura 29**:

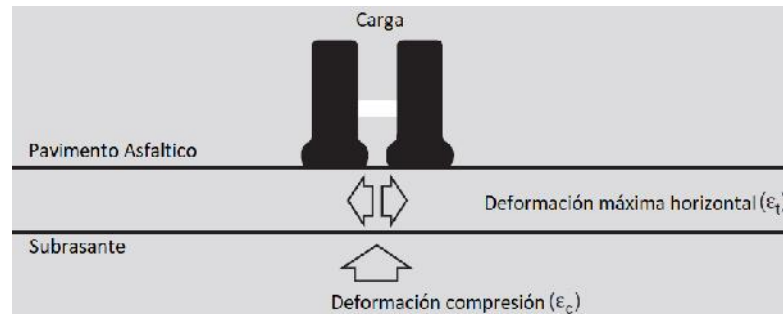


Figura 29. Localización de las respuestas críticas
Nota: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

En este método, se consideran los elementos descritos arriba. Fue desarrollado a través de un extensivo análisis de cálculos teóricos de respuesta esfuerzo-deformación. Esfuerzos y deformación no son calculados directamente, pero el objetivo es logrado indirectamente.

El diseño estructural de un pavimento de concreto para cargas pesadas depende de:

- Magnitud de las cargas
- Presión de contacto
- Condiciones ambientales
- Resistencia de la subrasante
- Propiedades de los materiales del pavimento

En este método, el diseño básico está dado en términos de una carga de rueda simple de alguna magnitud, P , con presión de contacto, p . La influencia combinada de ruedas adyacentes es determinada mediante el uso de factores de interface de deflexión. Deflexiones son calculadas en la superficie de la subrasante bajo múltiples cada de rueda, y se calcula una carga de rueda simple equivalente de tal manera que produzca la misma deflexión. Esta carga equivalente es usada para diseñar la estructura de pavimento. La metodología contempla el diseño para: carga de rueda simple, carga de ruedas duales y cargas de múltiples ruedas.

2.7.2. Pavimentos de concreto

Para el caso de pavimentos de concreto, la metodología propuesta es la recomendada en la publicación del Portland Cement Association (PCA) "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements" (Packard, 1996).

Esta metodología está enfocada en el diseño de espesor, está basada en experiencias generales respecto al comportamiento de pavimentos. La metodología aplica para los siguientes tipos de pavimentos de concreto: plano, plano con dovelas, reforzado y continuamente reforzado.

El procedimiento de diseño de la PCA cubre condiciones de diseño que no han sido abordadas directamente por otros procedimientos. Entre estas:

- Nivel de transferencia de carga en las juntas
- Efecto del uso de espaldones o bordes
- El uso de subbase
- Dos criterios de diseño: (a) fatiga y (b) erosión
- Ejes triples pueden ser considerados en el diseño

Los factores de diseño necesarios para aplicar esta metodología son:

- Resistencia a la flexión del concreto (Modulo de ruptura, MR)
- Resistencia de la subrasante o combinación de subrasante y subbase (k)
- Los pesos, frecuencias y tipos de cargas
- Periodo de diseño

2.7.3. Pavimentos de adoquines

Para el caso de pavimentos de adoquines de concreto, la metodología propuesta es la recomendada en la publicación del Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI) "Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers (Knapton J. , 2012).

El procedimiento de diseño que se presenta en este manual se basa en el principio de que los pavimentos de adoquines están diseñados para permanecer en servicio durante toda la vida útil del pavimento. En términos de rendimiento estructural, la falla en un pavimento de servicio pesado generalmente ocurre por una tensión de compresión vertical excesiva en la subrasante o una tensión horizontal excesiva en la base. Para

pavimentos con bases estabilizadas, la deformación por tracción en la base es la restricción de diseño, mientras que la deformación por compresión subrasante es frecuentemente la restricción para pavimentos con bases granulares. Las deformaciones superficiales del orden de 2 a 3 pulgadas (50 mm a 75 mm) normalmente existirán en caso de falla.

El método presenta una serie de gráficas para las cuales pavimentos típicos de servicio pesado se han analizado utilizando un modelo de elementos finitos para representar todos los componentes del pavimento. Las propiedades elásticas y los valores de la relación de Poisson se eligieron para describir el comportamiento de cada componente del pavimento. La fatiga se tiene en cuenta al definir las tensiones limitantes a las que se puede exponer el pavimento para un paso de carga, y luego reducir esas tensiones para tener en cuenta las múltiples repeticiones de carga.

2.8. Gestión de pavimentos

2.8.1. Generalidades

Esta sección presenta de manera general los conceptos relacionados a la gestión de las estructuras de pavimentos diseñadas, construidas y puestas en operación. Normalmente las autoridades portuarias adoptan sistemas del tipo “cuando sea necesario”, es decir, una metodología funcional para proyectos relativamente pequeños pero no así para obras de gran envergadura, donde recae en un comportamiento reactivo y no preventivo. Durante la última década, el pensamiento anteriormente expuesto a evolucionado hacia métodos estandarizados de toma de decisiones, donde surge el concreto de Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP), según (Nichol & Moffat, 2010):

“Un sistema de gestión de pavimentos proporciona un procedimiento consistente, objetivo y sistemático para establecer prioridades y cronogramas, asignar recursos y establecer presupuestos para el mantenimiento y la rehabilitación del pavimento.”

En las secciones subsecuentes, se desarrollan los conceptos relacionados a los SGP.

2.8.2. Conceptos del Sistema de Gestión de Pavimentos

Un SGP no solo evalúa la condición actual de una estructura de pavimento, sino que también se puede usar para estimar su condición futura mediante el uso de un indicador de condición del pavimento. Al proyectar la tasa de deterioro, se puede realizar un análisis de costos del ciclo de vida para varias alternativas para detener el deterioro, y se puede

determinar el momento óptimo de aplicación de la mejor alternativa. Esto es fundamental para evitar mayores costos de mantenimiento y reparación en una fecha posterior.

La ilustra cómo se deteriora generalmente un pavimento, también muestra el costo relativo de la rehabilitación en varios momentos durante su vida. Se debe tener en cuenta que durante el primer 75% de la vida útil de un pavimento, funciona relativamente bien. Después de ese punto, sin embargo, comienza a deteriorarse rápidamente. El número de años que un pavimento permanece en "buenas" condiciones depende de qué tan bien se mantenga. Acorde a (Nichol & Moffat, 2010), numerosos estudios han demostrado que la relación entre el costo de mantenimiento en buen estado y la rehabilitación periódica de un pavimento deficiente es del orden de 1 a 4 ó 5.

Una de las metodologías para la evaluación de la condición actual de un pavimentos, el Pavement Condition Index (PCI). El PCI es un índice entre 0 (falla) y 100 (excelente), es determinado mediante mediciones visuales prescritas de la condición actual de un pavimento, basado en el tipo, severidad y densidad de los deterioros observados.

El proceso de medición de PCI esta descrito y puede ser consultado en ASTM D-6433, "Standard Practice for Roads and Parking Lots Condition Survey".

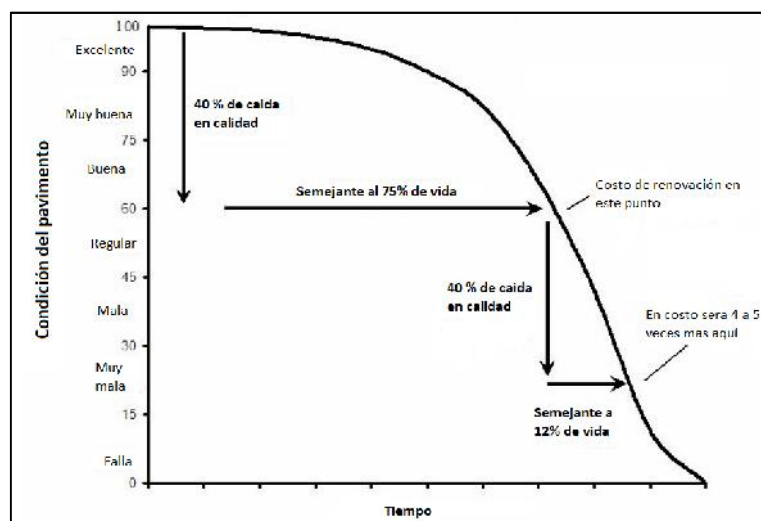


Figura 30. Ciclo de vida típico de un pavimento
Nota: Modificado de (Nichol & Moffat, 2010)

De la **Figura 30** también es significativo observar que más allá de cierto punto, conocido como el PCI crítico, el pavimento se deteriora rápidamente. De hecho, la primera caída del 40% en la calidad generalmente ocurre durante el primer 75% de la vida útil del

- Un sistema objetivo y repetible para evaluar el estado actual y futuro del pavimento
- Procedimientos para identificar estrategias alternativas de mantenimiento y rehabilitación
- Procedimientos para predecir el rendimiento y los costos de las estrategias alternativas
- Procedimientos para identificar la alternativa óptima de mantenimiento y/o rehabilitación

2.8.4. Base de datos de un SGP

Los datos del SGP se almacenan en una base de datos que normalmente incluye:

- Características del pavimento: Segmentos jerárquicos dimensionales típicamente denominados ramas y secciones
- Estructura del pavimento: Espesor y composición del pavimento para cada característica de los registros según la construcción, complementados con núcleos, según sea necesario
- Historial de construcción: Fechas, actividades y costos de las principales actividades de construcción (por ejemplo, superposición, reconstrucción)
- Historial de mantenimiento: Actividades y costos de mantenimiento previos para permitir la evaluación de diversos procedimientos de mantenimiento para extender la vida útil del pavimento
- Datos de tráfico: tipos de vehículos, pesos y repeticiones de carga
- Condición del pavimento: La capacidad de cuantificar objetivamente la condición del pavimento y rastrear la tasa de deterioro es un elemento fundamental del PMS.

2.8.5. Políticas y costos de mantenimiento

El SGP debe incluir políticas de mantenimiento y costos para reparar los deterioros identificados en el pavimento. Las reparaciones se clasifican en función de la urgencia, el tipo y la gravedad. Por ejemplo, el agrietamiento de baja gravedad puede no requerir ninguna acción; sin embargo, el agrietamiento de gravedad media y alta puede requerir enrutamiento y sellado. El SGP debe incluir políticas de mantenimiento y costos adaptados a cada tipo de deterioro y nivel de gravedad.

CAPITULO 3: GUÍA DE DISEÑO

3.1. Generalidades

La estructura medular de la guía elaborada para el Diseño de Pavimentos Portuarios en Costa Rica se muestra en la **Figura 32**. La guía se compone de las siguientes secciones:

- **Sección 1:** se define y describe la configuración de equipo, movilización y uso en las zonas definidas para el proyecto en particular. Se describen las cargas de equipos, se parte de una configuración espacial de la terminal, el siguiente paso consiste en definir las cargas y repeticiones.
- **Sección 2:** Se provee una guía para calcular las cargas de diseño y las repeticiones de carga. El pavimento está sujeto tanto a cargas dinámicas de los equipos de movilización como a cargas estáticas provenientes de los propios puntos de apoyo de los contenedores depende del área operacional de la terminal y equipo usado. El siguiente paso consiste en caracterizar la subrasante.
- **Sección 3:** Contempla el proceso de investigación en sitio, que es esencial para un diseño económico y seguro. Se presentan consideraciones básicas para caracterizar la subrasante del proyecto desde el punto de vista mecánico. El siguiente paso consiste en determinar una estructura preliminar.
- **Sección 4:** La guía provee una sección donde se recomiendan estructuras típicas basadas en la experticia internacional (Puertos del Estado, 1994), bajo un formato tipo catálogo. Esto permite realizar un prediseño aproximadamente ajustado a las condiciones de carga y calidad de la subrasante. Permite acortar el consumo de tiempo en iteraciones a través de las diferentes tipologías y metodologías existentes. El siguiente paso consiste en revisar el diseño preliminar, según haya sido la tipología y materiales seleccionados. La guía se presenta en el Apéndice 1: *Guía de diseño de pavimentos portuarios en Costa Rica*.
- **Sección 5:** Se presentan los conceptos y metodologías aplicables al diseño de pavimentos asfáltico, de concreto hidráulico o de adoquines. Se revisa la estructura preliminar seleccionada.

Finalmente, una vez definida la estructura de pavimento para el proyecto en cuestión, se procede a establecer el costo o presupuesto asociado.

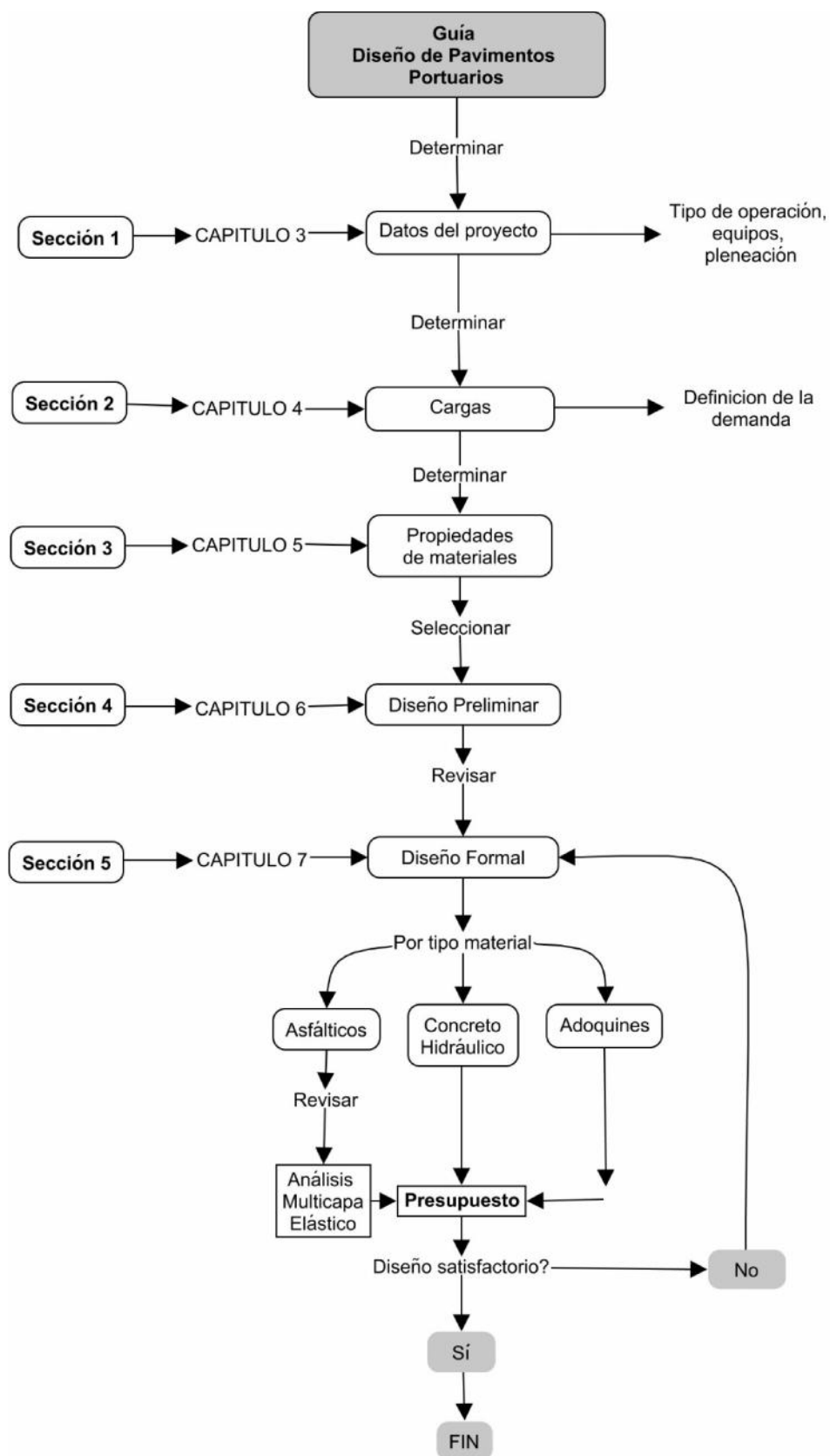


Figura 32. Diagrama de flujo para la Guía de Diseño de Pavimentos Portuarios
CAPITULO 4: APLICACIÓN

4.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo el aplicar los conceptos y metodologías definidas dentro de la guía de diseño planteada. Se aplica la guía de diseño a la obra portuaria denominada Terminal de Contenedores de Moín. Dicha obra fue construida en la provincia de Limón, bajo un esquema de obra concesionada a la transnacional APM Terminals.

4.2. Caso de análisis y diseño: Terminal de Contenedores de Moín

En agosto del 2011, el Gobierno de Costa Rica firmo un acuerdo de concesión por 33 años con APM Terminals (APMT) para diseñar, financiar, operar y mantener la Terminal de Contenedores de Moín (TCM).

Hay dos puertos existentes en las en las cercanías: Puerto Limón y Puerto Moín. La nueva terminal se construirá cerca de Puerto Moín y se construirá en tres fases: Fases 2A, 2B y 3.

La fase inicial (Fase 2A) consiste en cerca de 1500 metros de construcción de rompeolas, dragado y recuperación de tierras, la construcción de 600 m de estructura de muelle, la construcción de aproximadamente 40 hectáreas de terrenos tomados al mar para ser utilizados como patio de contenedores, edificios e instalaciones de apoyo y la coordinación con las autoridades locales para desarrollo de las conexiones con otras facilidades en la costa. Cuando se haya completado la Fase 2A, se incluirán seis grúas pórtico para barcos súper-post Panamax.

El sitio está ubicado a los largo de la costa Caribe de Costa Rica, en la bahía de Moín, que se encuentra a inicios 7 kilómetros al oeste de la ciudad portuaria de Limón, aproximadamente a un norte 1107580 y este 270014

La profundidad del mar en el sitio de proyecto se extiende desde la costa hasta una profundidad máxima de unos 18 m.

La **Figura 33** muestra la ubicación general del proyecto, en la costa de la provincia de Limón:

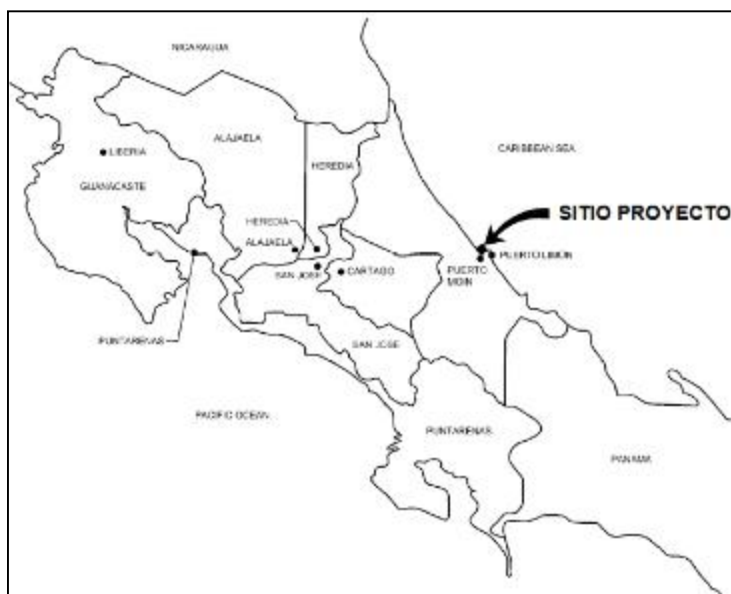


Figura 33. Ubicación general del proyecto. Fuente: APM Terminals (2016)

La **Figura 34** esquematiza de manera general, la planta de diseño del proyecto. Se aprecia la creación de una isla artificial mediante la técnica de reclamación, la cual se concibe en 3 fases (2A, 2B y 3). Involucra además la excavación del finco marino para la construcción del canal de acceso, así como la plataforma de atraque (muelle).

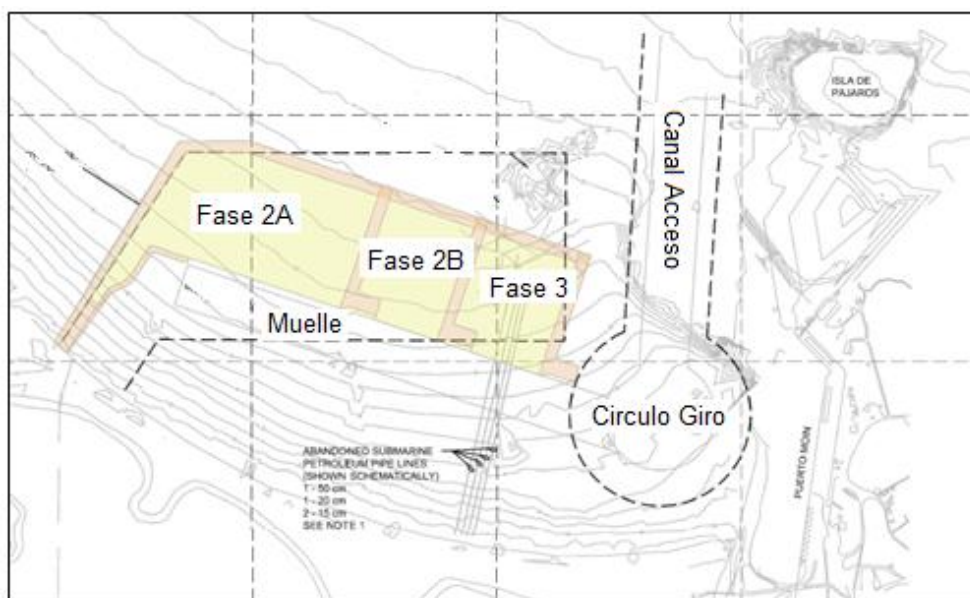


Figura 34. Vista en planta general del proyecto de reclamación. Fuente: Modificado de APM Terminals (2016)

Acorda a (CH2MHill, 2013), la terminal contempla cuatro calles de cuatro carriles que se extienden de norte a sur conectando el muelle con la calle de acceso principal de la terminal. Contempla además una calle principal de cuatro carriles de este a oeste a lo largo del muelle, junto con un carril cada segundo bloque de este a oeste, que será utilizado como un “bypass” para los camiones que descargan o cargan contenedores.



Figura 35. Zonificación de arenas en la TCM y vías de comunicación. Fuente: (CH2MHill, 2013)

El pavimento de esta obra se construyó sobre un relleno de reclamación. Según Hoff et.al (2012), la reclamación de tierras generalmente se define como: “*el proceso de crear nuevas tierras elevando la elevación de un fondo marino, lecho de río u otra tierra baja ('relleno') o bombeando el agua de un área acuosa que está rodeada por diques*”.

Los rellenos hidráulicos se consideran como creación de nuevas tierras mediante los siguientes pasos consecutivos:

1. Dragando material de relleno de un área de préstamo
2. Transportando el material de relleno del área de préstamo al sitio de reclamación mediante dragado, barcazas o tubería.
3. Colocado en el área de reclamación el material de relleno como una mezcla de material de relleno y agua.

La **Figura 36** muestra a manera de ejemplo un proyecto fue ejecutado utilizando técnicas de reclamación de tierras y rellenos hidráulicos:



Figura 36. Ejemplo de obra construida mediante rellenos de reclamación / hidráulicos.
Fuente: Hoff (2012)

4.3. Parámetros físico – mecánicos de diseño

La información correspondiente a los parámetros físico – mecánicos de los materiales fue extraída del Informe de Datos Geotécnicos y Anexos, Memorándum Técnico de Mejoramiento de Suelos y Memorándum Técnico de Propiedades del Suelos (CH2MHill, 2013).

A partir de la información obtenida, se definió un perfil longitudinal y un perfil transversal que se consideran representativos. Se plantean dos perfiles con el fin de considerar el efecto de la longitud del relleno (figura rectangular) en una y otra dirección, en su respuesta dinámica. La **Figura 37** y **Figura 38** presentan el perfil longitudinal y transversa de análisis, respectivamente:

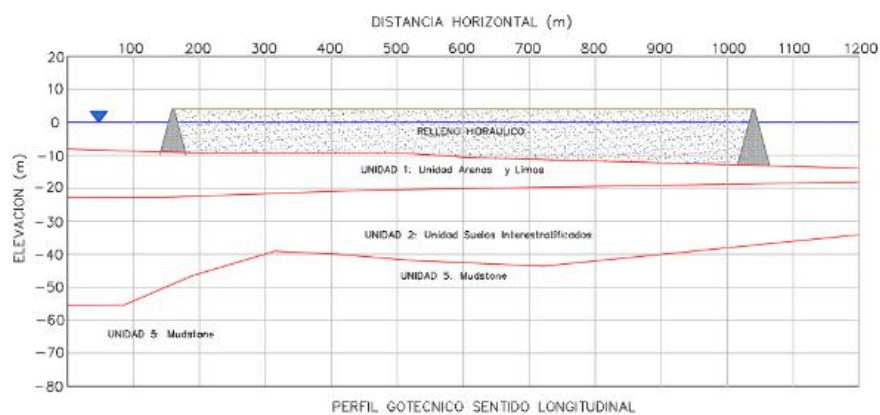


Figura 37. Perfil de análisis longitudinal.

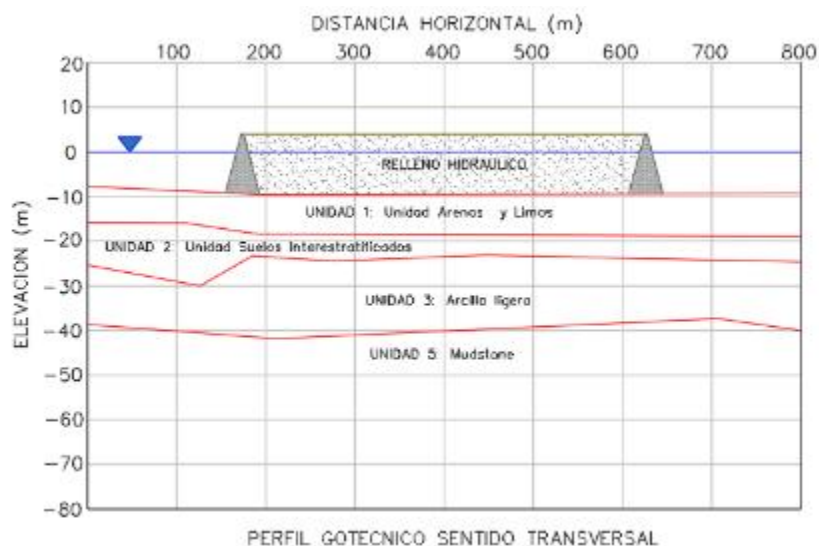


Figura 38. Perfil de análisis transversal.

Las propiedades físico-mecánicas para cada una de las capas establecidas en los perfiles mostrados en **Figura 37** y **Figura 38** se resumen en el **Cuadro 5**:

Cuadro 5. Propiedades físicas mecánicas empleadas en el modelo geotécnico y para modelación numérica estática/dinámica.

Unidad/Estrato	SUCS	total kN/m ³	ϕ	c' kPa	σ'_{30} cm	ν	V_s m/s	E MPa	G_o MPa
Relleno arena de dragado sin mejorar	SP-SM	17.0	27	-	10	0.3	195	161	62.0
Relleno arena de dragado mejorada	SP-SM	19.5	36	-	35	0.3	365	598	230
Columna agua marina	-	9.81	-	-	-	-	-	-	-
Arena a Arena Limosa a Limo Arenoso	SP-SM	17.3	36	-	17	0.3	255	294	113
Inter estratificado Limo / Arcilla Arenosa / Arcilla Gruesa	CL-ML	17.0	30	-	7	0.3	160	113	43.6
Arcilla	CL-ML	16.9	20	14	4	0.45	125	78	26.9
Mudstone	NA	18.8	38	-	45	0.35	410	823	305
Material rompeolas – Roca redondeada	Grava	20.0	-	-	-	0.3	-	500	300

Fuente: Modificado de (CH2MHill, Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Informe de Datos Geotécnicos y Anexos., 2013)

Acorde al cuadro anterior, se remarcan las filas correspondientes a las propiedades físico-mecánicas de del relleno de reclamación, que para efectos de las estructura de pavimentos corresponde a la subrasante.

4.4. Equipos, cargas y logística

4.4.1. Detalles generales del equipamiento

La definición del equipamiento empleado en el proyecto TCM se define dentro del documento “Reporte de Equipamiento” (APM Terminals S.A., 2013). Acorde a la planeación y logística de la terminal, se definió el siguiente equipamiento:

Cuadro 6.Resumen de equipo proyecto TCM.

Zona	Tipo de equipo
Equipo de Muelle	Grúas Pórtico de Muelle (STS Cranes)
Equipo de Patio y Movilización	Grúas Pórtico de Patio sobre neumáticos (RTG) Eléctricas Grúas Pórtico de Patio sobre Rieles (RMG) Eléctricas Cargadores Frontales (Reach Stakers) Tractor de Patio (Tracto - Camión/Mula) Chasis
Equipo Complementario	Montacargas de varias capacidades Spreaders para las grúas STS Spreaders para las grúas RTG y RMG Vehículos varios (camión, pickup, bus, etc)

Fuente: Modificado de (APM Terminals S.A., 2013)

4.4.2. Equipos de muelle

4.4.2.1. Grúas Pórtico de Muelle (“STS crane”)

Se trata de una grúa pórtico montada sobre rieles, diseñada para realizar maniobras de carga y descarga de contenedores de la nave a muelle y viceversa. Características:

- Peso aproximado: 1600 t
- Capacidad de cargar y descargar contenedores de barcos del tipo Post-Panamax
- Cuenta con “spreaders” con una capacidad de levante de 65 t
- Alcance al lado mar de 65 m
- El “spreader” puede manipular contenedores de 20, 40 y 45 pies
- Cada grúa es soportada por ejes (piernas), en las cuales se ubican los “Gantry” (sistema de traslación propia) y descansan sobre ruedas.
- Velocidad promedio de desplazamiento lateral de 45 m/min con viento, en contra de 17.7 m/s.

El contrato establece la eficiencia requerida por las Grúas; la misma aumenta paulatinamente de 26 movimientos / hora / grúa en el primer año a un máximo a partir del sexto año de 35 movimientos / hora / grúa (APM Terminals S.A., 2013).

4.4.3. Equipos de patio y movilización

4.4.3.1. Grúa Pórtico de Patio sobre Neumáticos (RTG) Eléctricas

Características:

- Equipo móvil sobre neumáticos
- Cuenta con un “spreader” telescópico para el manipuleo de contenedores de 20’, 40’ y 45’
- Puede cargar de manera simultánea dos contenedores de 20’
- Permite almacenar una altura de apilamiento de hasta 6 contenedores e hileras de 7 contenedores, horizontalmente
- Peso total de la grúa, incluyendo aparejo superior y spreader, sin carga: 179 t
- Distancia entre ruedas, t: 25.0 m
- Distancia entre ejes, W = 13.5 m
- Separación ruedas duales = 1.15 m
- Separación rudas tándem = 3.0 m
- Número de llantas: 2 ejes, 2 ruedas por esquina (8 ruedas en total)
- Presión de inflado = 1000 kPa (145 psi)

La **Figura 39**, muestra el tipo de grúa RTG empleadas en la TCM:

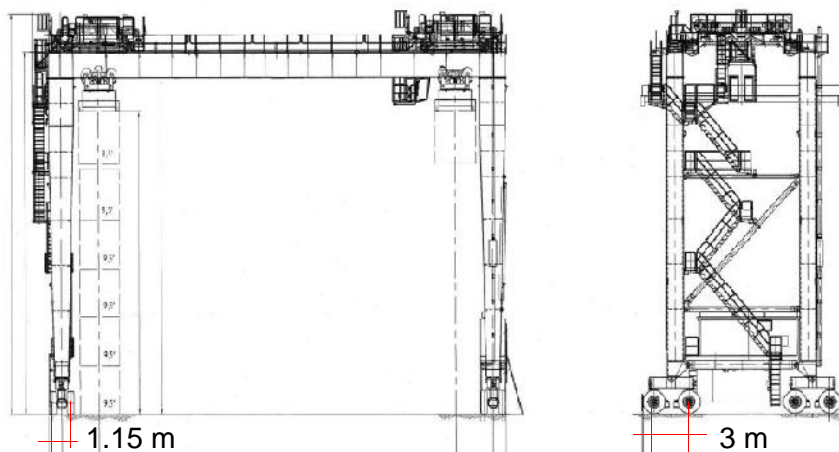


Figura 39. Grúas Pórtico de Patio sobre Neumáticos RTG (Rubber Tyred Gantry Cranes).
Fuente: (APM Terminals S.A., 2013)

Cuadro 7. Cargas y repeticiones de grúa RTG

Carga Contenedor	Carga de Rueda (kN)	Pasadas/Viajes
0 (Descargado)	131	493 816
210 kN	145	

Fuente: Modificado de (APM Terminals S.A., 2013)

Acorde a (APM Terminals S.A., 2013), las RTG eléctricas tienen una tasa de operación mínima de 25 movimientos por hora. No obstante, dependiendo de la eficiencia de la operación, es posible alcanzar niveles de operación superiores a los 30 movimientos por hora.

4.4.3.2. Straddle Carrier (Cargador de contenedores)

Son conocidos como vehículos de manipuleo o elevador de contenedores. Características:

- Distancia entre ejes, $W = 3.8$ m
- Presión de inflado = 1000 kPa (145 psi)

Cuadro 8. Cargas y repeticiones de grúa Straddle Carrier (Cargador de contenedores)

No. Eje	Ruedas por eje	Carga por eje (kN)	Pasadas/Viajes
1	2	222	3 533 668
2	2	222	
3	2	222	

Fuente: Modificado de (APM Terminals S.A., 2013)



Figura 40. Straddle Carrier. Fuente: (APM Terminals S.A., 2013)

4.4.3.3. Tractor de Patio (tracto-camión / mula)

Para movilizar contenedores dentro de la terminal, se utilizarán tractores de carga que tirarán de chasis especializados para el manejo de contenedores. Se prevé emplear hasta 72 tractores de patio (año 2046).

Son conocidos como vehículos de manipuleo o elevador de contenedores. Características:

- Presión de inflado = 650 kPa (94 psi)
- Repeticiones de carga en Patio Contenedores = 3 533 668

No. Eje	Rueda por eje	Carga por eje (kN)
1	2	51
2	4	185
3	8	132

Fuente: Modificado de (APM Terminals S.A., 2013)

4.4.3.4. Chasises

La terminal contará con chasises para el movimiento interno de contenedores dentro de la TCM. Cada Chasis tendrá una capacidad máxima de transporte de 65 t que permite transportar contenedores de 20' y 40', extensible a contenedores de 45'. Se prevé emplear hasta 86 chasises (año 2046).

4.4.4. Equipos complementarios

Con el objetivo brindar apoyo a los equipos mayor (STS, RTG, RMG) y menor (Front loader, Tractores, etc), se prevé la adquisición de equipo complementario para las tareas diarias de inspección por la autoridades, lavado de contenedores, cambios de generadores, mantenimientos en general, consolidación y des consolidación de contenedores, etc.

4.4.5. Cargas por almacenamiento de contenedores

Acorde a (APM Terminals S.A., 2013), se asume que el peso bruto y el peso propio de los contenedores son:

- Contenedor 20 pies – 25 toneladas Peso Bruto, 2 toneladas Peso Propio
- Contenedor 40 pies – 30 toneladas Peso Bruto, 3 toneladas Peso Propio

- Se tiene una relación de contenedores de 40 pies a contenedores de 20 pies de 86% / 14%.

La TCM tiene la capacidad de almacenar contenedores de 20 o 40 pies llenos, apilados en bloques de hasta 3 contenedores de alto y 3 de ancho en cualquier lugar del muelle. La carga de las estibas de contenedores cuando se aplica a una estructura rígida de concreto o pavimento, resulta en las siguientes cargas de esquina:

Cuadro 10. Resumen de equipo proyecto TCM.

Altura Estiba	Presión Equivalente (MPa)	Carga Esquinas kN)
1	0.016	76
2	0.029	137
3	0.038	183
4	0.045	214
5	0.048	229
6	0.057	270

Fuente: Modificado de (APM Terminals S.A., 2013)

Acorde a APM Terminals, la distribución de planta de almacenaje de contenedores se muestra en la **Figura 41**:

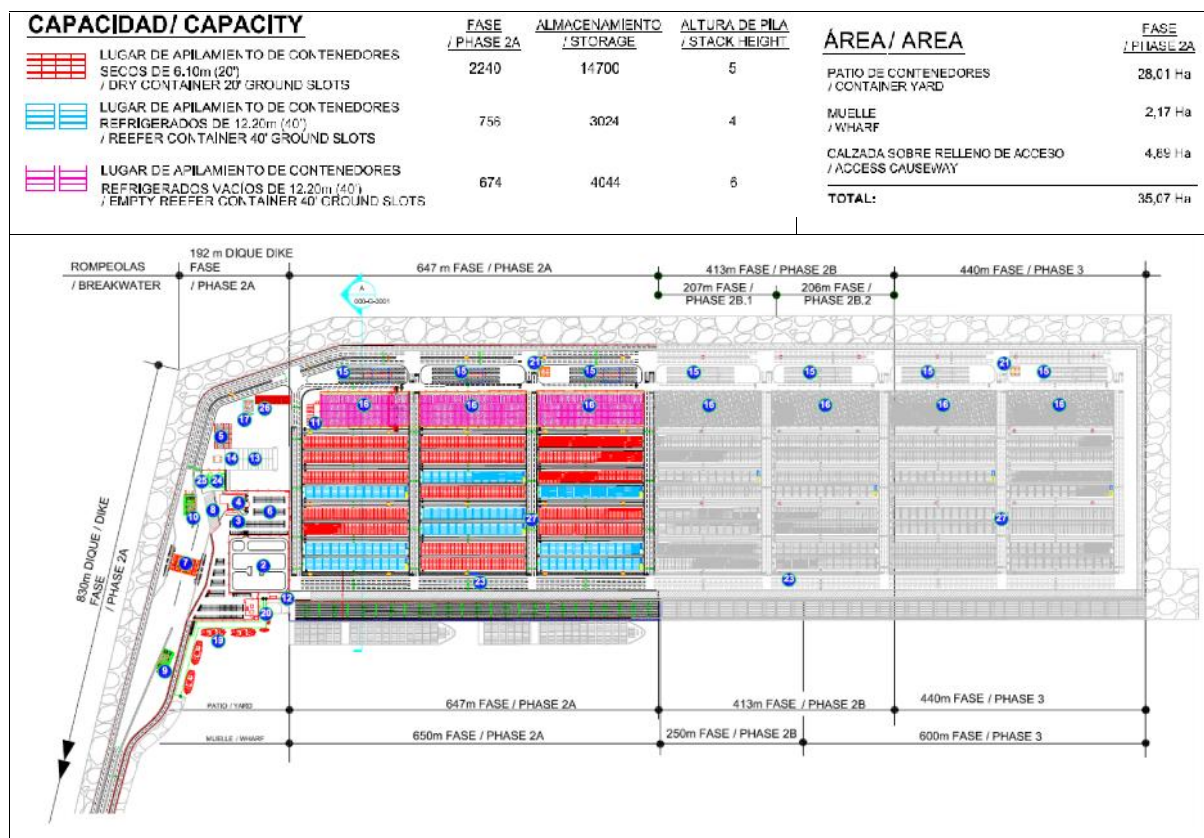


Figura 41. Distribución de planta, capacidad almacenaje y altura. Fuente: Modificado de (APM Terminals S.A., 2013)

La carga viva uniforme para ser considerada en las áreas de estibas de contenedores deberá ser de 50 kPa, correspondiente a una pila de seis contenedores de altura.

Figura 42, Figura 43 y Figura 44, presentan ejemplos de la logística desarrollada en terminales portuarias administradas por APM Terminal alrededor del mundo:



Figura 42. Grúas STS y RTG en Terminal Laem Chabang, Tailandia. Fuente: (APM Terminals S.A., 2013)



Figura 43. Grúas STS y RTG en Terminal Tangier, Marruecos.
Fuente: (APM Terminals S.A., 2013)



Figura 44. Grúa STS en Muelle 400 Los Angeles, EUA. Fuente: (APM Terminals S.A., 2013)

4.4.5.1. Resumen de parámetros de diseño

Acorde a la información extraditada del expediente de diseño para la TCM (APM Terminals S.A., 2013), se determinó el siguiente resumen de parámetros utilizable en diseño:

Cuadro 11. Resumen de parámetros para diseño de pavimentos

Cargas por equipos												
Tipo Equipo	No. Ejes	Rueda por eje	Distancia t (m)	Distancia Ejes W (m)	Separación ruedas Eje Dual (m)	Separación ruedas Eje Tándem (m)	Carga por rueda (kN)	Carga por eje (kN)	Pasadas / Viajes	Presión Inflado (kPa) (psi)		
RTG	1	4	25	13.5	1.15	3.0	119	476	493	1000		
	2	4					119	476			816	(145)
Straddle Carrier (Cargador de contenedores)	1	2	-	3.8	-	-	111	222	3 533	1000		
	2	2					111	222			668	(145)
	3	2					111	222				
Tractor de Patio	1	2	-	-	-	-	25	50	3 533	650		
	2	4	-	-	-	-	32	128			668	(94)
	3	4	-	-	-	-	16.5	66				
	4	4	-	-	-	-	16.5	66				
Cargas por almacenamiento												
Tipo Contenedor	Area Terminal (m ²)	Capacidad TEUs	Altura Estiba			Presión equivalente (kPa)	Carga esquina (kN)					
20 ft = 25 ton 40 ft = 30 ton	28 000	48 984	1			16	76					
			2			29	137					
			3			38	183					
			4			45	214					
			5			48	229					
			6			57	270					
Parámetros de materiales												
CBR (%)	15											
Mr	155 MPa 22 500 psi											

4.5. Diseño de estructuras de pavimento

4.5.1. Generalidades

La esta sección consiste en la aplicación de la guía de diseño elaborada. La misma fue aplicada desde la concepción de una estructura preliminar y posteriormente la aplicación de las metodologías específicas por tipología (pavimento de losas de concreto, pavimento de mezcla asfáltica en caliente y pavimento de adoquines). Los diseños aplicando metodologías específicas, se realizan para cada uno de los equipos descritos en el **Cuadro 11.**

4.5.2. Diseño preliminar

A partir de la aplicación del Capítulo 6 de la Guía de Diseño (Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se determinó que las estructuras de pavimentos recomendadas para la zona de almacenamiento de contenedores pueden consistir en:

Cuadro 12. Resumen de diseño preliminar – Superficie de concreto

Tipo de capa	Material	Espesor (m)
Capa inferior	Base Granular	0.25
Superficie de ruedo	Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa	0.32
	Pavimento de concreto compactado con rodillo	0.32
	Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado	0.28
	Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas	0.25

Cuadro 13. Resumen de diseño preliminar - Adoquines

Tipo de capa	Material	Espesor (m)
Capa inferior	Base Granular Tratada	0.25
Superficie de ruedo	Adoquines	0.10

Detalles de la aplicación de la metodología, pueden ser consultados en el Anexo 8.1.

4.5.3. Diseño de estructura de concreto asfáltico (Full Deph)

A partir de la aplicación del Capítulo 6 de la Guía de Diseño (Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se determinaron espesores de mezcla asfáltica en caliente de espesor completo (full deph):

Cuadro 14. Resumen de diseño espesor completo Mezcla Asfáltica en Caliente

Tipo Equipo	Espesor T _A (m)
RTG	0.40
Straddle Carrier (Cargador de contenedores)	0.36
Tractor de Patio	0.30

Como se puede observar, los espesores obtenidos son de dimensiones importantes y no incorporan dentro de la estructura capas granulares o mejoradas con cementantes. Cabe resaltar, que la metodología establecida por el la Guía ROM 4.1 (empleada en el apartado 4.5.1) no recomienda el empleo de mezcla asfáltica en zona de manipulación de cargas

pesadas, tal y como se determinó la recomendación se enfoca en estructuras de concreto o adoquines de concreto.

Detalles de la aplicación de la metodología, pueden ser consultados en el Anexo 8.1.

4.5.4. Diseño de estructura de concreto hidráulico

A partir de la aplicación del Capítulo 6 de la Guía de Diseño (Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se evaluó la estructura preliminarmente dimensionada. Se emplearon losas finitas de 5 m por 5 m, se supuso el empleo de una base granular con CBR igual a 80% y un módulo de ruptura mínimo de 4.5 MPa. Utilizando el criterio de fatiga desarrollado por la PCA, se determinó la demanda y consumo de repeticiones N.

Cuadro 15. Resumen de diseño de pavimento de concreto

Tipo Equipo	Espesor losa (m)	Espesor Base granular (m)	Ciclos de falla N
RTG	0.32	0.25	No limitado
Straddle Carrier (Cargador de contenedores)	0.37	0.25	3,703,994
Tractor de Patio	0.32	0.25	No limitado

4.5.5. Diseño de estructura de adoquines

A partir de la aplicación del Capítulo 6 de la Guía de Diseño (Anexo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se determinaron espesores de para una estructura de pavimento con adoquín soportada sobre una base tratada con cemento:

Cuadro 16. Resumen de diseño de pavimento de adoquines

Tipo Equipo	Espesor Adoquín (m)	Espesor Base tratada (m)	Espesor de Subbase (m)
RTG	0.08	0.25	0.15
Straddle Carrier (Cargador de contenedores)	0.08	0.35	0.15
Tractor de Patio	0.08	0.20	0.15

4.5.6. Resumen de resultados y comparativa

El **Cuadro 17** presenta el resumen obtenido del proceso de diseño y aplicación de la guía de diseño. En términos generales el proceso de diseño preliminar basado en la guía ROM4.1 (Puertos del Estado, 1994) resulto en la definición de estructuras de pavimento de losas de concreto con espesor de 32 cm y una base granular de 25 cm. Como segunda alternativa, se obtuvo una estructura de pavimento con adoquines, espesor de adoquín de 10 cm y base tratada de 25 cm.

Al aplicar las metodologías específicas por tipología, se obtuvieron resultados congruentes con la metodología preliminar, no obstante, en algunos casos se obtuvieron aumentos de espesor o incorporación de capa de subbase.

Para el caso de la estructura de losas de concreto, se dio un incremento de en el espesor de losa cuando se utiliza la metodología de diseño específica para el caso. En el caso de la estructuras de adoquines se da una disminución en el espesor del adoquín recomendado, pero se incorpora un espesor de subbase que preliminarmente no se obtiene.

Cuadro 17. Resumen de resultados obtenidos según tipo de estructura y metodología

Metodología	Tipo Estructura	Capa	Tipo Carga			
			Contenedores	RTG	Equipos	
					Straddle Carrier (Cargador de contenedores)	Tractor de Patio
Espesor de capa (m)						
(Puertos del Estado, 1990)	Losas Concreto	Losa			0.32	
		Base Granular			0.25	
	Adoquines	Adoquín			0.10	
		Base tratada			0.25	
		Subbase			0.00	
(Asphalt Institute, 2006)	Espesor Completo Mezcla Asfáltica	Mezcla Asfáltica	NA	0.40	0.36	0.30
(Nichol & Moffat, 2010)	Losa de concreto	Losa	NA	0.32	0.37	0.32
		Base Granular	NA	0.25	0.25	0.25
(Knapton J. , 2012)	Adoquines	Adoquín	NA	0.08	0.08	0.08
		Base tratada	NA	0.25	0.35	0.20
		Subbase granular	NA	0.15	0.15	0.15

La **Figura 45**, **Figura 46**, **Figura 47** y **Figura 49**, resumen gráficamente los resultados de espesor obtenidos y su comparativa con los resultados preliminarmente recomendados al aplicar las recomendaciones de la ROM4.1 (Puertos del Estado, 1994):

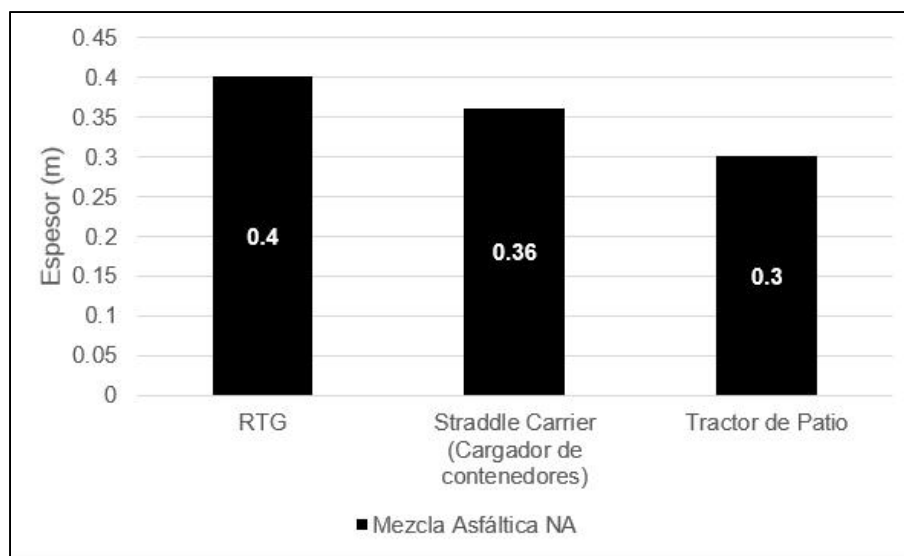


Figura 45. Variación de espesor de mezcla asfáltica según tipo de equipo

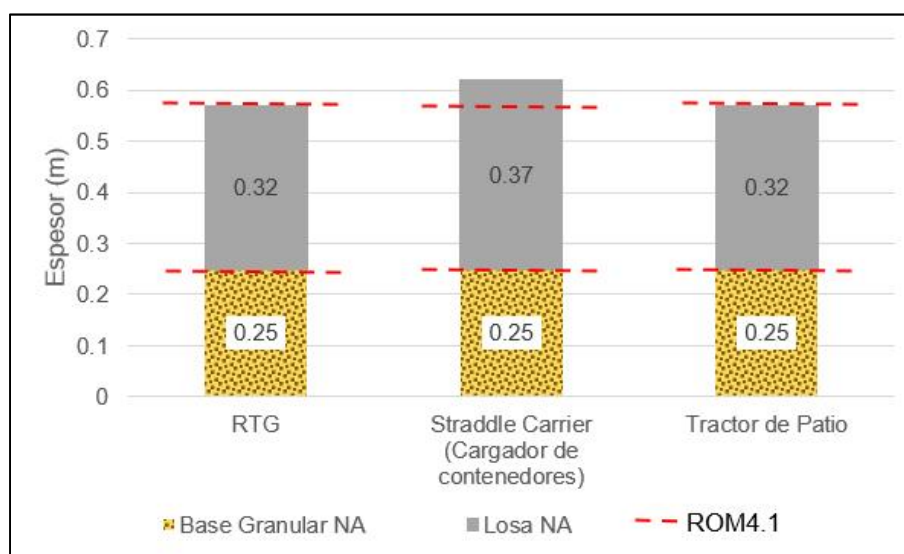


Figura 46. Variación de espesor de estructura rígida según tipo de equipo / Comparación con diseño preliminar

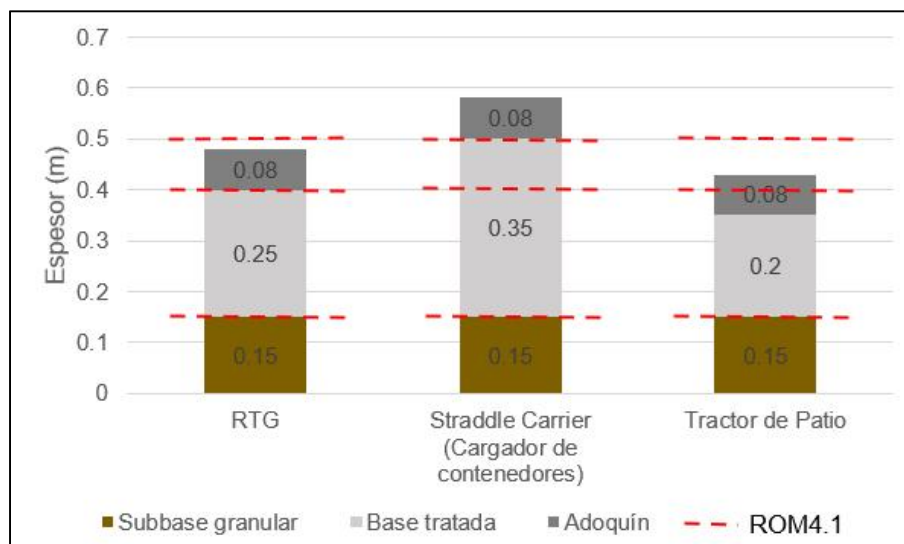


Figura 47. Variación de espesor de estructura de adoquín según tipo de equipo / Comparación con diseño preliminar

4.5.7. Comparativa estructura diseñada y construida en la TCM

En la **Figura 48** se presenta la estructura de pavimento realmente diseñada y construida en el proyecto de la TCM. Se observa que la misma consistió en una estructura de adoquines sobre una capa de base tratada de 32 cm de espesor.

Al compararse con los resultados obtenidos aplicando la guía propuesta, se aprecia convergencia respecto a las tipologías recomendadas preliminarmente. Al aplicarse la metodología de diseño específica para pavimentos de adoquines, se obtuvo una estructura de dimensiones similares, a excepción del espesor de base tratada, para el ejercicio académico realizado, se tuvo un espesor de 35 cm (3 cm mayor) para el análisis del equipo tipo “straddle carrier”. El aumento podría obedecer a que el diseño preliminar únicamente contempla la intensidad de cargas generales, no realiza un análisis específico para un equipo dado, caso contrario a las metodologías específicas que contempla repeticiones y análisis de cargas específicas. Esta tipología de estructura es de uso común en puertos y terminales de contenedores, su selección es realizada por experiencias previa y observaciones realizadas a través de los años en su aplicación.

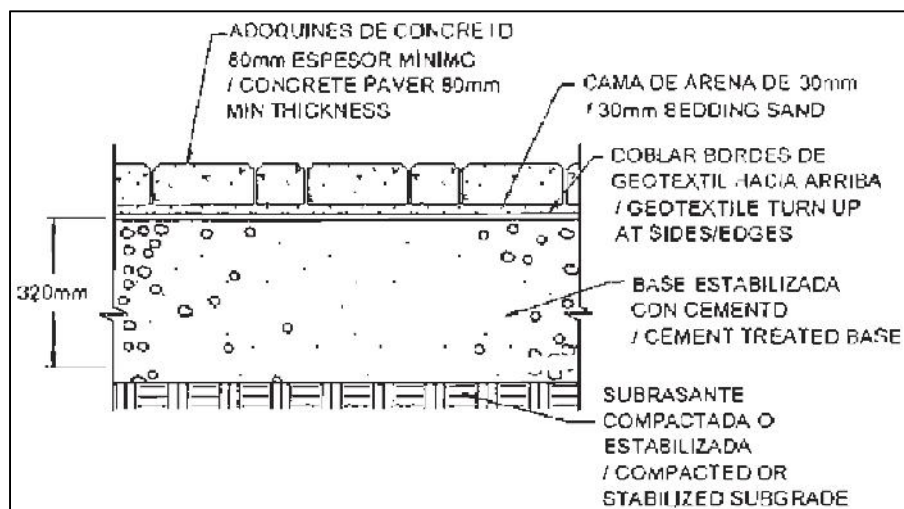


Figura 48. Estructura de pavimento diseñada y construida en la TCM

Fuente: (CH2MHill, 2013)

4.6. Especificaciones técnicas

4.6.1. Generalidades

Las especificaciones técnicas obedecen principalmente a las características físico – mecánicas que deben cumplir los diferentes materiales para satisfacer los parámetros empleados en los diseños realizados. Para el caso de obras portuarias, a nivel nacional no existe un código o compendio de especificaciones generadas por el ente competente (Ministerio de Obras Públicas y Transportes), por lo que es usual hacer referencia a las especificaciones para obras viales contenidas en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR2010. Para efectos de este trabajo, se realiza una revisión general de las especificaciones empleadas en el TCM, así como las contenidas en el CR2010. No es objetivo de esta sección realizar una transcripción de especificaciones, por el contrario se referenciarán de manera general.

4.6.2. Especificaciones material de base y subbase granular

Se recomienda seguir las especificaciones contenidas en la sección 301.) Subbases y bases granulares del CR2010 (MOPT, 2018) en lo referente a los aspectos constructivos de las capas de materiales granulares de este tipo.

Respecto a las características físico-mecánicas, los materiales deben cumplir con lo especificado en la sección 703.05 Agregado para capas de subbase y base del CR2010 (MOPT, 2018).

4.6.3. Especificaciones material de base tratada

Se recomienda seguir las especificaciones contenidas en la sección 304.) Estabilización de los agregados del CR2010 (MOPT, 2018) en lo referente a los aspectos constructivos de las capas de materiales granulares mejoradas con cemento. Debe ajustarse la especificación contenida en la Tabla 304-1 donde se indica resistencia a la compresión inconfiada a los 7 días, norma ASTM D-1633, método A , debe emplearse una resistencia de a la compresión inconfiada igual a 10 MPa.

4.6.4. Especificaciones material de concreto estructural

Se recomienda seguir las especificaciones contenidas en la sección 552 Concreto estructural del CR2010 (MOPT, 2010) en lo referente a los aspectos constructivos de las de obras de concreto hidráulico, específicamente debe aplicarse la sección 501.) Pavimento de concreto hidráulico.

Respecto a las características físico-mecánicas, los materiales deben cumplir con lo especificado en la sección 703.01 Agregados finos y 703.02 Agregados gruesos del CR2010 (MOPT, 2017).

4.6.5. Especificaciones material de mezcla asfáltica en caliente

Se recomienda seguir las especificaciones contenidas en la sección 405.) Suministro y colocación de mezcla asfáltica en caliente (MOPT, 2017) en lo referente a los aspectos constructivos de las de obras.

Respecto a las características físico-mecánicas y diseño de la mezcla asfáltica se debe cumplir con lo especificado en la sección 401.) Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshal y 402.) Diseño de mezcla asfáltica por el método Superpave® (MOPT, 2017).

4.6.6. Especificaciones adoquines de concreto

Se recomienda seguir las especificaciones contenidas en la sección 504.) Pavimento de adoquines de concreto hidráulico (MOPT, 2017) en lo referente a los aspectos constructivos de las de obras.

Respecto a las características físico-mecánicas y diseño de la mezcla asfáltica se debe cumplir con lo especificado en la sección 725.23 Adoquines (MOPT, 2017).

4.6.7. Resumen general de especificaciones

El **Cuadro 18** presenta un resumen general de las especiaciones aplicables recomendadas para el caso de Costa Rica, para lo cual se utiliza como referencia el CR2010, ante la ausencia de especificaciones específicas para obras portuarias a nivel nacional.

Cuadro 18. Resumen de especificaciones recomendadas, basadas en el CR2010 y sus actualizaciones

Tipo de material	Sección	Parámetro	Especificación
Base tratada	CR304	Compresión inconfiada	10 MPa
Concreto estructural	CR552	Diseño de mezcla	Según CR552.03
		Agregados finos	Según CR703.01
		Agregados gruesos	Según CR703.02
		Cementos hidráulicos	701.01
		Agua	725.01
		Aditivos químicos	711
Mezcla Asfáltica en Caliente	CR401	Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshal	-
	CR402	Diseño de mezcla asfáltica por el método Superpave	-

4.7. Presupuestos y comparativo técnico – económica

A partir de las estructuras definidas para la terminal de contenedores, se plantean una comparativa económica basada en precios unitarios aproximados de mercado, según se muestran a continuación:

Cuadro 19. Precios unitarios de materiales

Ítem	Descripción	Unidad	PU
1	Concreto Hidráulico (MR=4.5 MPa)	m3	210,000.00
2	Mezcla Asfáltica en Caliente	ton	50,000.00
3	Adoquín t=8 cm	m2	30,000.00
4	Adoquín t=10 cm	m2	37,500.00
5	Base Granular Tratada	m2	33,600.00
6	Base granular (CBR = 80%)	m3	18,720.00
7	Subbase granular (CBR = 30%)	m3	15,600.00

Los precios referenciales utilizados en el **Cuadro 19**, fueron obtenidos partir de promedios utilizando como referencia los contratos de contratados de conservación y mantenimiento de obra vial en Costa Rica:

1. Consejo Nacional de Viabilidad. (2014). *LICITACIÓN PÚBLICA No. 2014LN-000017-0CV00 Mantenimiento rutinario con maquinaria especializada, contingencias y rehabilitación del sistema de evacuación pluvial de la red vial nacional pavimentada*. San José, Costa Rica: Consejo Nacional de Viabilidad.
2. Consejo Nacional de Viabilidad. (2014). *LICITACIÓN PÚBLICA No. 2014LN-000018-0CV00 MP Y R: Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la red vial nacional pavimentada*. San José, Costa Rica: Consejo Nacional de Viabilidad.

Los precios fueron consultados con fecha del 01/07/2021.

Empleado los precios unitarios para cada ítem definido, se determinó el costo unitario por metro cuadrado de cada tipología de pavimento analizada, los resultados se muestran a continuación:

Cuadro 20. Costo unitario (¢ / m²) por tipología de estructura

Metodología	Tipo Estructura	Capa	Tipo Carga			
			Contenedores	RTG	Equipos Straddle Carrier (Cargador de contenedores)	Tractor de Patio
(Puertos del Estado, 1990)	Losas Concreto	Losa			67,200.00	
		Base Granular			4,680.00	
		Costo Total			71,880.00	
	Adoquines	Adoquín			37,500.00	
		Base tratada			8,400.00	
		Subbase			-	
Costo Total			45,900.00			
(Asphalt Institute, 2006)	Espesor Completo	Mezcla Asfáltica	NA	47,000.00	42,300.00	35,250.00
(Nichol & Moffat, 2010)	Losas de concreto	Losa	NA	67,200.00	77,700.00	67,200.00
		Base Granular	NA	4,680.00	4,680.00	4,680.00
		Costo Total	NA	71,880.00	82,380.00	71,880.00
(Knapton J. , 2012)	Adoquines	Adoquín	NA	30,000.00	30,000.00	30,000.00
		Base tratada	NA	8,400.00	11,760.00	6,720.00
		Subbase granular	NA	2,340.00	2,340.00	2,340.00
		Costo Total	NA	40,740.00	44,100.00	39,060.00

Según se observa en el **Cuadro 20**, las estructuras basadas en superficie de ruedo de concreto son las de mayor costo. La estructura económicamente más factible es la constituida por una estructura de ruedo con adoquines.

La **Figura 49**, **Figura 50** y **Figura 51**, presenta la comparativa de costos por tipología de estructura y los costos asociados a la estructura preliminarmente recomendada:

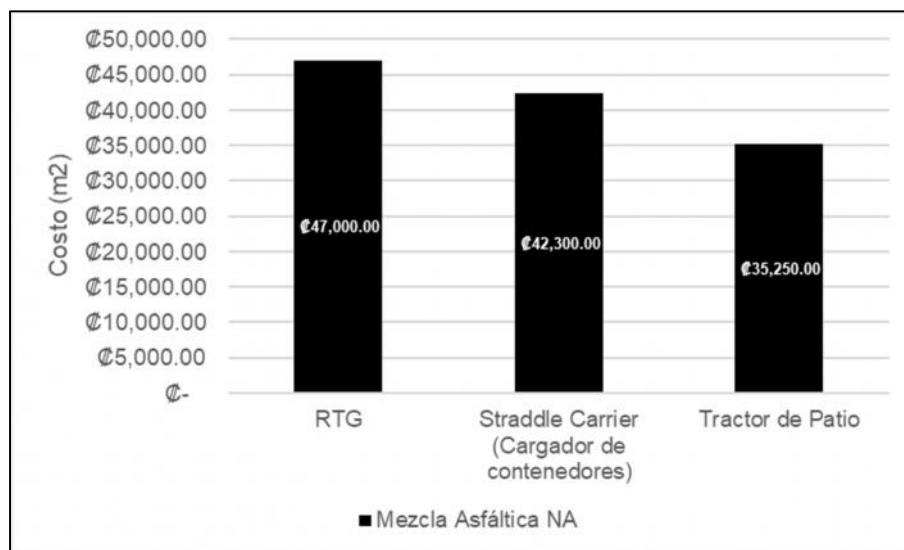


Figura 49. Variación de costo según tipo de equipo / Estructura de mezcla asfáltica en espesor completo

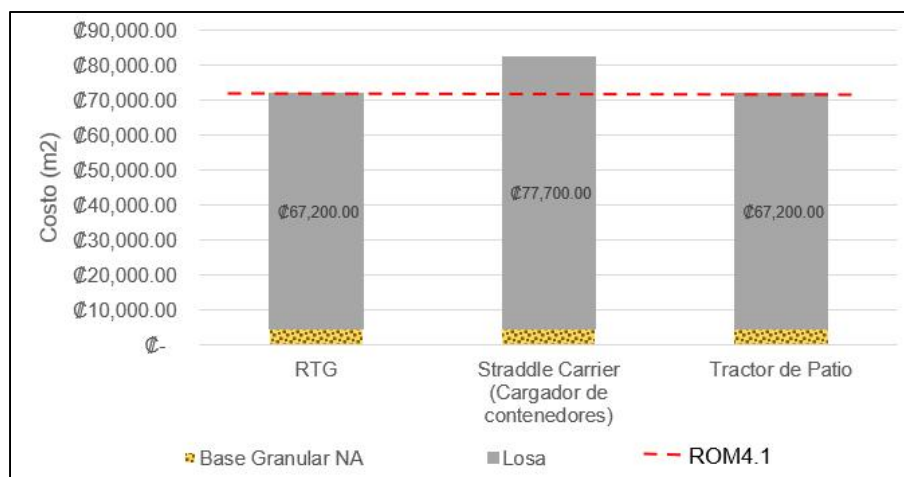


Figura 50. Variación de costo según tipo de equipo / Estructura de concreto

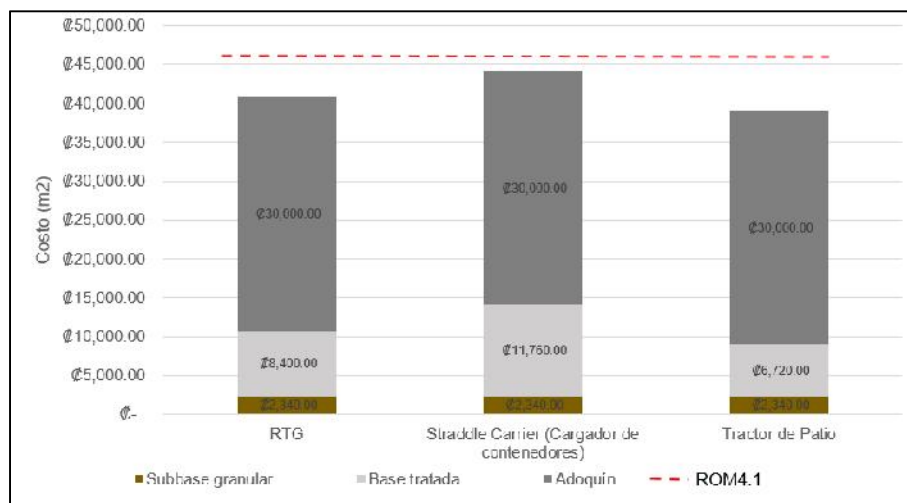


Figura 51. Variación de costo según tipo de equipo / Estructura de adoquines

CAPITULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Respecto a la guía de diseño desarrollada

Se desarrolló una propuesta de guía para el diseño de pavimentos portuarios, cuyas estructuras se ven sometidas a repeticiones de carga transmitidas por diferentes tipos de equipos que operan en una terminal portuaria y por cargas estáticas transmitidas por el almacenaje de contenedores o cargas a granel, normalmente se conocen como pavimentos para cargas pesadas.

Previo a la aplicación de las metodologías de diseño para pavimentos, deben ser definidos los equipos que se movilizaran sobre la superficie de ruedo, así mismo debe cuantificarse la cantidad de aplicaciones descarga. Por tanto, se requiere conocer la proyección de tráfico de cargas a través de periodo de diseño, se debe conocer la zonificación planteada para la terminal portuaria, se debe conocer la logística de operación de cada equipo y se debe conocer la distribución de tamaños de contenedores que transitaran por la terminal.

La guía de diseño presenta generalidades respecto a la tipología de equipos que comúnmente operan dentro de una terminal portuaria, existe un rango amplio de equipos cuyas dimensiones y pesos dependen del fabricante. Se presentan cargas típicas de almacenaje y cargas típicas de equipos, que pueden ser empleadas en caso de no contar con información específica del caso bajo análisis.

A diferencia de una obra vial, las cargas de diseño para un pavimento portuario presentan magnitudes mayores. Un factor diferenciador es que deben contemplarse efectos dinámicos de transporte, maniobras y giros de manipulación y efectos de frenado.

La guía de diseño contempla un flujo de diseño que parte de la recopilación de datos del proyecto, determinación de cargas, definición de propiedades físico-mecánicas de los materiales para diseño, un procedimiento de diseño preliminar y posteriormente la evaluación de mediante metodologías de diseño específicas para cada tipología de estructura de pavimento.

El diseño preliminar se basa en el empleo de la metodología ROM 4.1 (Puertos del Estado, 1990), que permite definir varias alternativas recomendadas de estructuras de pavimento, en función de la evaluación de la magnitud de cargas aplicadas, intensidad de las cargas y capacidad de la subrasante.

Una vez definida una estructura preliminar, se procede a realizar una revisión empleando metodologías específicas de diseño, la guía presenta metodologías para:

- Pavimentos de espesor completo en mezcla asfáltica (Asphalt Institute, 2006)
- Pavimento de concreto (Nichol & Moffat, 2010)
- Pavimentos de adoquines (Knapton J. , 2012)

5.2. Respeto a la aplicación de la guía al proyecto Terminal de Contenedores de Moín

Se determinó que la aplicación de la guía de diseño permite obtener mediante algunos parámetros de entrada, una tipología preliminar recomendada. Para el caso de análisis donde se empleó el proyecto de la Terminal de Contenedores de Moín, preliminarmente se obtuvo que una estructura en losas de concreto o una estructura de adoquines sobre base tratada son las opciones recomendadas. Dentro de los aspectos relevantes, cabe destacar que de antemano las opciones preliminares no consideran pavimentos de mezcla asfáltica, lo cual se considera obedece al comportamiento visco elástico de las mezclas asfáltica, cuya respuesta depende de la temperatura y frecuencia de carga. Los equipos y cargas de almacenamiento tienden a comportarse como carga pseudo estáticas de alta magnitud, que al combinarse con altas temperaturas provoca que en una terminal de contenedores eleve la susceptibilidad a deformaciones plásticas / ahuellamiento. Así mismo, los aspectos de mantenimiento tienen un importante peso en la no recomendación de usar pavimentos asfálticos en zonas de almacenamiento y de operación de equipos pesados, dado que el mantenimiento implica intervenir en la logística de la terminal para lograr remover el espesor o parte de este mediante equipos de perfilado y la subsecuente colocación con equipos de pavimentación y acarreo de mezcla asfáltica.

Una vez definidas las estructuras preliminares recomendadas, se procedió a aplicar las secciones de la guía de diseño para metodologías específicas según la tipología. En términos generales se obtuvo que para el caso de losas de concreto (tipo con juntas y dovelas de transmisión de carga), se dio un incremento del espesor de losa al aplicar la metodología de diseño específica. En el caso de la estructura de adoquines, al aplicar la metodología específica de diseño, se obtuvo una reducción en el espesor de adoquín requerido en general. No obstante, se requirió de un espesor mayor de base tratada y una capa de subbase.

Se realizó una comparativa económica del costo por metro cuadrado de cada tipo de estructura, en general se obtuvo que económicamente la estructura de adoquines con base tratada es la de menor costo.

La selección de la estructura óptima debe estar acompañada de un análisis de costo-beneficio y de ciclo de vida, donde se incorporen los costos de mantenimiento a través de la vida de diseño del proyecto. Para el caso estudiado, el estudio de ciclo de vida quedó fuera del alcance del estudio. No obstante, la bibliografía estudiada en general tiende a señalar mayores beneficios a estructuras de losas de concreto o adoquines, dado que su mantenimiento es menos invasivo y reduce el impacto en las actividades operativas de las terminales de contenedores. Este aspecto tiene un alto peso en la tipología seleccionada, dado que interrupciones en la logística de trasiego de contenedores y mercancías en una terminal puede implicar pérdidas millonarias.

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.3. Conclusiones

- Se obtuvo una propuesta de guía para el diseño para pavimentos portuarios, que permite realizar un dimensionamiento preliminar y el diseño mediante criterios específicos acorde a la tipología de estructura.
- Se realizó una validación de aplicabilidad de la guía propuesta aplicándola al proyecto de la Nueva Terminal de Contenedores de Moín, Limón, Costa Rica.
- Se aplicó la metodología de diseño preliminar propuesta por la guía de diseño, obteniéndose como recomendación estructuras de losa de concreto y adoquines sobre base tratada con cemento.
- Se diseñaron tres tipologías de estructura de pavimento, las cuales consistieron en losa de concreto, espesor completo de mezcla asfáltica en caliente y adoquines sobre base tratada con cemento, aplicando las metodologías de diseño específicas recomendadas por la guía de diseño.
- Se realizó una comparativa de espesores y tipologías de estructuras preliminar determinadas con los determinados mediante métodos específicos de diseño, obteniendo concordancia en los resultados.
- Se determinó el costo aproximado por metro cuadrado para cada tipología analizada, obteniéndose que económicamente la estructura de adoquines sobre base tratada con cemento es la más atractiva desde el punto de vista financiero.

6.4. Recomendaciones

- Se recomienda establecer especificaciones especiales y específicas para la construcción de pavimentos en obras portuarias en Costa Rica.
- Se recomienda incorporar criterios de análisis de ciclo vida en la selección de la tipología óptima de pavimento para terminales portuarias.
- Se recomienda complementar los análisis expuestos en la guía de diseño con análisis de esfuerzo-deformación para analizar la respuesta del paquete estructural propuesto usando teorías de multicapa elástica (estructuras flexibles o semi rígidas) o modelaciones numéricas (elemento finito) para el caso de

estructuras que presentan discontinuidades como las tipologías de losas y adoquines, empleando software especializado.

CAPITULO 7: BIBLIOGRAFÍA

- (2013)., C. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: II-2 000 – General Sheets Design Drawings / II-2 000 – Planos Generales*. Colorado, Estados Unidos:: APM Terminals.
- AASHTO. (1993). *Guide for Desing PAvement Strucutres*. Washigton, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- APM Terminals S.A. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Reporte de Equipamiento*. Colorado, Estados Unidos: APM Terminals.
- Asphalt Institute. (2006). *MS-23 Thickness Desing: Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads*. Estados Unidos: The Asphalt Institute.
- ASTM. (2001). *ASTM C936-01 Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units*. Estados Unidos: ASTM.
- CH2MHill. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Especificaciones Técnicas de la Nueva Terminal de Contenedores de Moín*. Colorado, Estados Unidos: APM Terminals.
- CH2MHill. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Informe de Datos Geotécnicos y Anexos*. Colorado, Estados Unidos: APM Terminals.
- CH2MHill. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Informe de Diseño de Pavimento*. Colorado, Estados Unidos: APM Terminals.
- CH2MHill. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Informe de Drenaje*. Colorado, Estados Unidos: APM Terminals.
- CH2MHill. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Memorándum Técnico de Mejoramiento de Suelos*. Colorado, Estados Unidos: APM Terminals.
- CH2MHill. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Memorándum Técnico de Propiedades del Suelos*. Colorado, Estados Unidos: APM Terminals.
- CH2MHill. (2013). *Proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín: Planos Constructivos de la Nueva Terminal de Contenedores de Moín*. Colorado, Estados Unidos: APT Terminals.
- Di Mascio, P., Loprencipe, G., & Moretti, L. (2019). Technical and Economic Criteria to Select Pavement Surfaces of Port Handling Plants. *Coatings*, 15.
- Echaveguren, T. (2013). *Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigon*. Chile: Instituto del Cemento y del Hormigon de Chile.
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. Ciudad de Mexixo, Mexico: Instituto Mexicano del Transporte.

- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Estados Unidos: Prentice Hall.
- Knapton, J. (2012). *Port and industrial pavement design with concrete pavers: A comprehensive guide*. Inglaterra: Interlocking Concrete Pavement Institute.
- Knapton, J., & Meletiou, M. (1996). *The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries*. Inglaterra: British Port Association.
- Kosmatka, S., & Wilson, M. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Estados Unidos: Portland Cement Association.
- Lancaster, J., Richards, I., Tighe, S., & Wardle, L. (2007). *Heavy duty industrial pavement design guide*. Australia: MINCAD.
- Loría Salazar, L. G. (2018). Notas del Curso Programa PF3946 Materiales para Pavimentos. San Jose, Costa Rica: Maestría en Transportes y Vías, Universidad de Costa Rica.
- Meletiou, M., & Knapton, J. (1996). *Container Terminal Pavement Management*. Geneva: United Nations.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile. (1999). *Manual de diseño de para pavimentos para puertos chilenos*. Chile: Dirección de Obras Portuarias.
- MOPT. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. San Jose, Costa Rica: LANAMME UCR.
- MOPT. (2017). *Actualizaciones Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. San Jose, Costa Rica: Ministerio de obras públicas y Transportes de Costa Rica.
- MOPT. (2018). *Actualizaciones Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. San Jose, Costa Rica: LANAMME UCR.
- Neville, A. (2013). *Tecnología del Concreto*. Mexico DF: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Nichol, & Moffat. (2010). *Operational area consideration for pavement design*. Los Angeles, Estados Unidos: The port of Los Angeles.
- Packard, R. (1996). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Estados Unidos: Portland Cement Association.
- PIANC. (2015). *Design and maintenance of container terminal pavements*. Estados Unidos: PIANC.
- Puertos del Estado. (1990). *ROM 0.2 Recomendaciones generales: Recomendaciones para las acciones de diseño*. Madrid, España: Ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente.
- Puertos del Estado. (1994). *ROM 4.1-94 Proyecto y construcción de pavimentos portuarios*. Madrid, España: Ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente de España.

Royal Haskoning. (2010). *Paving design for container terminals*. United Kingdom: Royal Haskoning.

Terminals, A. (2013). *Metodología Constructiva de la Nueva Terminal de Contenedores de Moín*. San Jose, Costa Rica: APM Terminals.

Von Quintus, H., & Hughes, C. (2019). *Design and Construction of Heavy-Duty Pavements*. Estados Unidos: National Asphalt Pavement Association.

CAPITULO 8: ANEXOS**8.1. Ejemplo de aplicación de Guía en el proyecto Nueva Terminal de Contenedores de Moín (Memorias de cálculo)**

1. METODOLOGÍA ROM 4.1-94 PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS PORTUARIOS

PASO 1. Definición de Índice de intensidad de uso

Tipo de zona:

Zonas de almacenamiento de contenedores. Contenedores manipulados por unidad de superficie en la zona en el año medio de la vida útil: $I_{1,4}$ (TEU/m²).

Cantidad de TEUs = 21 768 TEU

Área Almacenaje de Contenedores = 280 000 m²

$I_{1,4}$ (TEU/m²) = 0.08 < 0.2. Intensidad Reducida

	Calificación del Índice de Intensidad, I		
	Reducida	Media	Elevada
Zona operación $I_{1,1}$ (t/m)	$I_{1,1} < 300$	$300 \leq I_{1,1} \leq 3000$	$I_{1,1} > 3000$
Zona almacenamiento			
Graneles sólidos $I_{1,2}$ (t/m ²)	$I_{1,2} < 3$	$6 \leq I_{1,2} \leq 60$	$I_{1,2} > 60$
Mercancía General $I_{1,3}$ (t/m ²)	$I_{1,3} < 2$	$2 \leq I_{1,3} \leq 20$	$I_{1,3} > 20$
Contenedores $I_{1,4}$ (TEU/m²)	$I_{1,4} < 0.2$	$0.2 \leq I_{1,4} \leq 2$	$I_{1,4} > 2$
Semirremolque $I_{1,5}$ (TEU/m ² o t/m ²)	$I_{1,5} < 0.2$ ó $I_{1,5} < 2$	$0.2 \leq I_{1,5} \leq 2$ ó $2 \leq I_{1,5} \leq 20$	$I_{1,5} > 2$ ó $I_{1,5} > 20$
Vías de comunicación	Intensidad de uso más alta entre las zonas que comunica la vía		
Vías de acceso	Intensidad media diaria de vehículos pesados		
Zona complementaria			
Circulación	Intensidad media diaria de vehículos pesados		
Estacionamiento	Menos de 10 sitios	Entre 10 y 100 sitios	Mas de 100 sitios

PASO 2. Caracterización de las cargas

Carga de almacenamiento, Zona de almacenamiento:

Carga máxima de pilas de contenedores = 265 kN

Presión = 0.07 MPa

Cargas equipos manipulación, Zona de almacenamiento:

Cargas y presiones		
Equipo de manipulación	Carga máxima por punto de apoyo (kN)	Máxima presión de contacto (MPa)
Pórtico de almacenamiento	450	1.1

Equipo de manipulación	Carga máxima por punto de apoyo (kN)	Máxima presión de contacto (MPa)
Carretilla pórtico	130	1.1
Cargador frontal de 5 ton	30	0.8
Cargador frontal de 20 ton	110	0.7
Cargador frontal de 40 ton	220	0.6
Cargador lateral	230	0.6
Grúa automóvil de 10 ton	150	0.4
Grúa automóvil de 30 ton	400	0.9
Grúa automóvil de 50 ton	550	1.3
Grúa automóvil de 70 ton	750	1.8
Grúa automóvil de 140 ton	1100	2.6
Tractor más semirremolque de 40 ton	35	2.2
Tractor más semirremolque de 80 ton	70	2.2

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cargas equipos manipulación		Carga almacenamiento
Zona almacenamiento		
Baja	$Q_v < 120 \text{ kN}$ y $P_v < 1,1 \text{ MPa}$	$Q_v < 120 \text{ kN}$ y $p_v < 0,7 \text{ MPa}$
Media	$120 \text{ kN} < Q_v < 700 \text{ kN}$ ó $1,1 \text{ MPa} \leq P_v \leq 1,5 \text{ MPa}$	$120 \text{ kN} \leq Q_v \leq 500 \text{ kN}$ ó $0,7 \text{ MPa} \leq p_v \leq 1,0 \text{ MPa}$
Alta	$Q_v > 700 \text{ kN}$ y $P_v > 1,5 \text{ MPa}$	$Q_v > 500 \text{ kN}$ y $p_v > 1,0 \text{ MPa}$
Zona complementaria		
Baja	$Q_v < 120 \text{ kN}$ y $P_v < 1,1 \text{ MPa}$	$Q_v < 100 \text{ kN}$ y $p_v < 4 \text{ MPa}$ Hasta 2 alturas
Media	$120 \text{ kN} < Q_v < 700 \text{ kN}$ ó $1,1 \text{ MPa} \leq P_v \leq 1,5 \text{ MPa}$	$100 \text{ kN} \leq Q_v \leq 1200 \text{ kN}$ ó $4 \text{ MPa} \leq p_v \leq 10 \text{ MPa}$ 3-4 alturas
Alta	$Q_v > 700 \text{ kN}$ y $P_v > 1,5 \text{ MPa}$	$Q_v > 1200 \text{ kN}$ y $p_v > 10 \text{ MPa}$

La carga califica como media.

PASO 3. Categoría del tráfico

Tráfico pesado: B

Categorización del tráfico

Intensidad de uso	Caracterización de la carga		
	Baja	Media	Alta
Reducida	D	C	B

Intensidad de uso	Caracterización de la carga		
	Baja	Media	Alta
Media	D	B	A
Elevada	C	B	A

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

PASO 4. Características del Relleno (Subrasante) y Explanada (Coronación)

Acorde a la tipología de la TCM: Relleno hidráulico

Contenido de finos: Acorde a información geotécnica, finos entre 10 y 35%

Clasificación de rellenos

Tipo de relleno	Clasificación
Hidráulicos	Contenido de finos menor del 10 %
	Contenido de finos entre el 10 y el 35 %
	Contenido de finos mayor del 35 %
De vertido directo	Con materiales terrestres
	• Rellenos granulares
	• Rellenos cohesivos
	• Pedraplenes limpios
	• Pedraplenes sucios
	Antrópicos y no convencionales

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

PASO 5. Categorización de la explanada

Tipo: IV

Rellenos regulares consolidados (RC): Rellenos hidráulicos con contenido de finos entre el 10 y el 35 % o rellenos no convencionales de vertido directo, pero sometidos a alguno de los tratamientos de consolidación.

Se definan una explanada tipo E2.

Clasificación de la explanada

Coronación	MNC	RNC	BNC	MC	RC	BC
Suelos adecuados	E0	E0	E0	E1	E1	E1
Suelos seleccionados	E1	E1	E1	E1	E2	E2
Mezcla de gruesos y finos de cantera o tajo	E1	E1	E1	E2	E2	E3
Suelos seleccionados con CBR > 20 %	E1	E1	E2	E2	E3	E3

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

PASO 6. Selección del tipo de pavimento

Selección capas inferiores

Categoría Explanación	Subbase	Base
E0 ⁽¹⁾	0,40 m	0,25 m
E1	0,25 m	0,25 m
E2	--	0,25 m
E3	--	--

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Almacenamiento de Contenedores

Trafico A	Trafico B	Trafico C	Trafico D
Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa			
0.35 m	0.32 m	0.29 m	0.26 m
Pavimento de concreto compactado con rodillo			
0.35 m	0.32 m	0.29 m	0.26 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado			
0.31 m	0.28 m	0.25 m	0.22 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas			
0.28 m	0.25 m	0.22 m	0.20 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

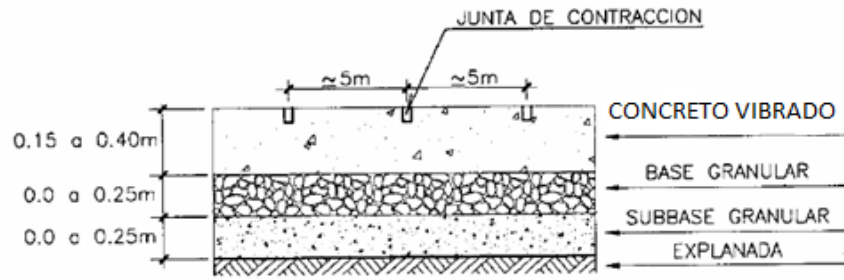
Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Almacenamiento de Contenedores

Trafico A ⁽²⁾	Trafico B ⁽²⁾	Trafico C	Trafico D
0.12 m	0.10 m	0.10 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

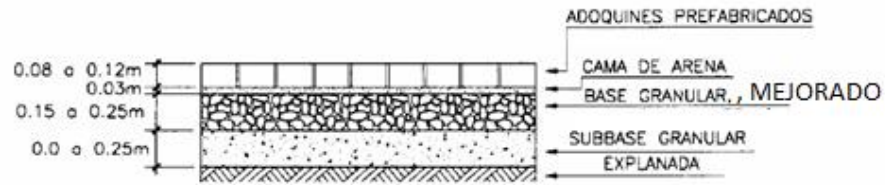
Fuentes:

- (1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m.
- (2) La capa de base estará constituida por algunos de los siguientes tipos: concreto magro (Contenido cemento 150 kg/m³ (0,15 m), concreto f'c = 17.5 MPa (0,15 m) o suelo cemento (0,20 m).



Pavimento de concreto vibrado

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)



Pavimento de adoquines

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

2. METODOLOGÍA MS-23 THICKNESS DESIGN ASPHALT PAVEMENTS FOR HEAVY WHEEL LOADS

PASO 1. Determinar si, a partir del espaciamiento de ruedas, el problema puede ser considerado como una rueda simple, dual o múltiple.

PASO 2. Determinar si, a partir de la carga de rueda y configuración, el problema puede ser considerado como una rueda simple.

PASO 3. Determinación del módulo resiliente de la subrasante.

PASO 4. Determinación de variables de entrada: Carga de rueda P, presión de contacto p, área de contacto a y numero de repeticiones de carga.

PASO 5. Utilizar cuadro o grafica de diseño.

PASO 6. Determinar el valor $T_{A/a}$. Calcular el espesor T_A .

Este procedimiento se debe realizar por cada tipo de equipo que será empleado en la logística particular de obra portuaria. Para el caso de la TCM, se ha aplicado según se muestra a continuación:

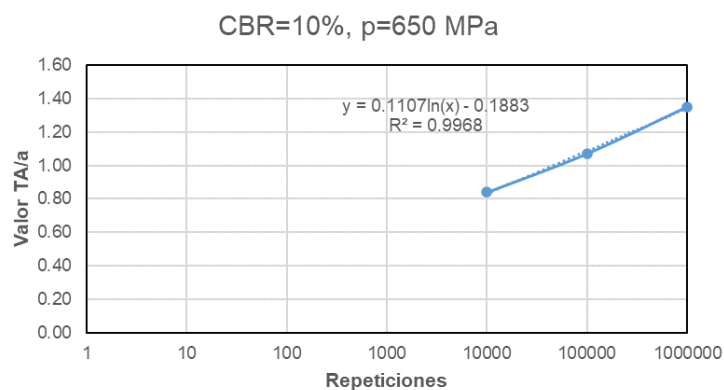
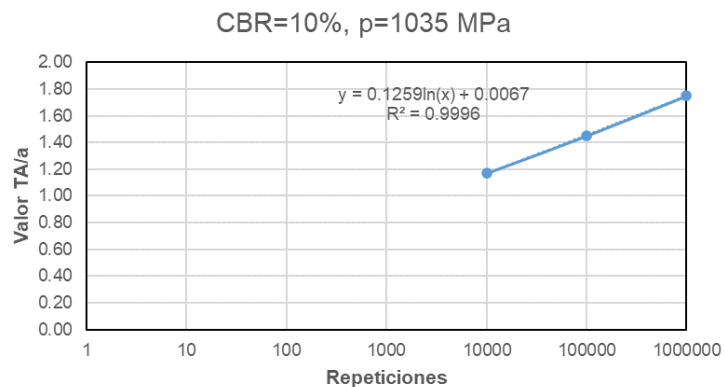
Considerando que el valor de CBR = 10%, se deben emplear los parámetros de $T_{A/a}$, para repeticiones de 10 000, 100 000 y 1 000 000, para la respectiva presión de inflado.

Caso de ruedas duales

Mr	Repeticiones Carga	Presión de contacto, kPa					
		275	415	550	690	1035	1380
30 MPa (CBR = 3%)	10 000	0.59	0.81	1.00	1.16	1.50	1.79
	100 000	0.75	1.00	1.22	1.41	1.79	2.12
	1 000 000	0.92	1.22	1.46	1.68	2.11	2.47
50 MPa (CBR = 5%)	10 000	0.47	0.47	0.88	1.04	1.37	1.63
	100 000	0.63	0.63	1.10	1.28	1.66	1.97
	1 000 000	0.81	0.81	1.33	1.55	1.97	2.33
100 MPa (CBR = 10%)	10000	0.39 ⁽¹⁾	0.48 ⁽¹⁾	0.67	0.84	1.17	1.44
	100000	0.40	0.67	0.89	1.07	1.45	1.75
	1000000	0.60	0.88	1.13	1.35	1.75	2.10
150 MPa	10 000	0.39 ⁽¹⁾	0.48 ⁽¹⁾	0.55 ⁽¹⁾	0.67	1.03	1.29

Mr Subrasante	Repeticiones Carga	Presión de contacto, kPa					
		275	415	550	690	1035	1380
(CBR = 15%)	100 000	0.39 ⁽¹⁾	0.51	0.73	0.93	1.30	1.60
	1 000 000	0.42	0.74	0.98	1.20	1.59	1.93

Como se puede observar, las curvas están establecidas para un máximo de 1 millón de repeticiones. Con el propósito de aplicar la metodología al proyecto de la TCM, se realizaron extrapolaciones considerando de las repeticiones de este proyecto superan por mucho el máximo de 1 millón de repeticiones:



Se realiza un análisis para cada tipo de equipo, evaluando el radio del área de aplicación de carga contra el límite establecido de 8 veces a. El análisis para el caso de la TCM, determino que todos los equipos deben ser evaluados como ejes duales:

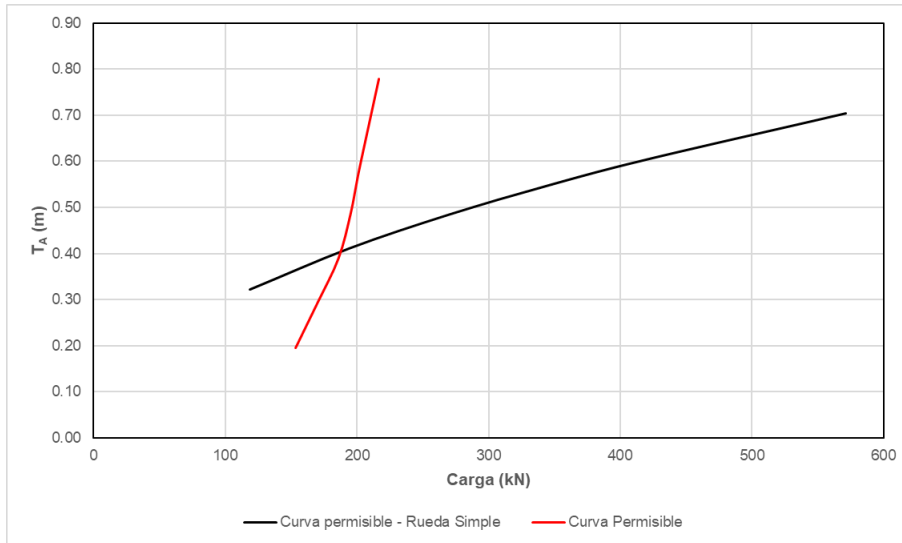
Tipo Equipo	No. Ejes		Distancia t (m)	Distancia Ejes	Separación ruedas	Separación ruedas	Carga por	Carga por	Pasadas / Viajes	Presión Inflado	a (cm)	8ªa (cm)	Tipo de análisis
-------------	----------	--	-----------------	----------------	-------------------	-------------------	-----------	-----------	------------------	-----------------	--------	----------	------------------

		Rueda por eje		W	Eje Dual	Eje Tándem	eje (kN)	rueda (kN)		(kPa) (psi)			
				(m)	(m)	(m)							
RTG	1	4	25	13.5	1.15	3	500	125	495 000	1000 (145)	20.0	160	Eje Dual
	2	4					1256	314			31.6	253	Eje Dual
Straddle Carrier (Cargador de contenedores)	1	4	-	3.8	-	-	222	111	3 533 668	1000 (145)	18.8	150	Eje Simple
	2	2					222	111			18.8	150	Eje Simple
	3						222	111			18.8	150	Eje Simple
Tractor de Patio	1	2	-	-	-	-	51	26	3 533 668	650 (94)	11.2	89	Eje Dual
	2	4	-	-	0.36	-	185	46			15.0	120	Eje Dual
	3	4	-	-	0.36	-	66	17			9.0	72	Eje Dual
	4	4	-	-	0.36	-	66	17			9.0	72	Eje Dual

- **Diseño para el equipo RTG:**

	P	a	Ta
	kN	m	m
1	119	0.19	0.32
2	194	0.25	0.41
3	270	0.29	0.48
4	345	0.33	0.55
5	420	0.37	0.60
6	571	0.43	0.70

TA/a	Ta	L	Pe
-	m	-	kN
1.0	0.19	1.55	153.5
1.5	0.29	1.4	170.0
2.0	0.39	1.28	185.9
2.5	0.49	1.22	195.1
3.0	0.58	1.18	201.7
4.0	0.78	1.1	216.4



Se determina un espesor completo de mezcla asfáltica iguala 0.40 m.

- **Diseño para el equipo Straddle Carrier:**

Para el caso de eje simple, se interpola en valor de $T_{A/a}$, obteniéndose un valor de 1.9. Usando un carga de rueda de 111 kN, se determina un valor de radio de carga $a=0.19$ m. Se determina un espesor $T_A = 0.36$ m.

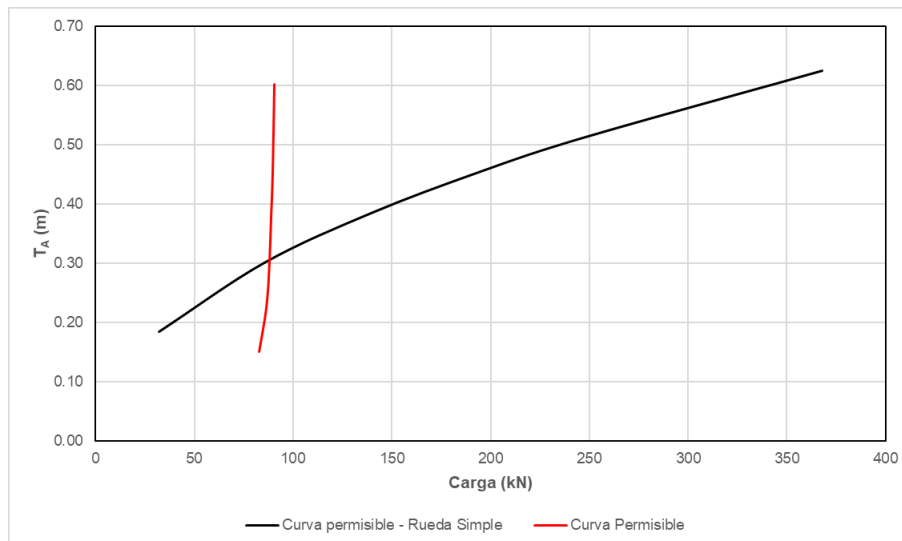
Caso de rueda simple

Mr	Repeticiones	Presión de contacto, kPa					
		Carga	275	415	550	690	1035
30 MPa (CBR = 3%)	10 000	0.59	0.81	1	1.16	1.5	1.79
	100 000	0.75	1	1.22	1.41	1.79	2.12
	1 000 000	0.92	1.22	1.46	1.68	2.11	2.47
50 MPa (CBR = 5%)	10 000	0.47	0.47	0.88	1.04	1.37	1.63
	100 000	0.63	0.63	1.1	1.28	1.66	1.97
	1 000 000	0.81	0.81	1.33	1.55	1.97	2.33
100 MPa (CBR = 10%)	10000	0.39 ⁽¹⁾	0.48 ⁽¹⁾	0.67	0.84	1.17	1.44
	100000	0.4	0.67	0.89	1.07	1.45	1.75
	1000000	0.6	0.88	1.13	1.35	1.75	2.1
150 MPa (CBR = 15%)	10 000	0.39 ⁽¹⁾	0.48 ⁽¹⁾	0.55 ⁽¹⁾	0.67	1.03	1.29
	100 000	0.39 ⁽¹⁾	0.51	0.73	0.93	1.3	1.6
	1 000 000	0.42	0.74	0.98	1.2	1.59	1.93

- **Diseño para el equipo Tractor de Patio:**

	P	a	Ta
	kN	m	m
1	32	0.13	0.18
2	86	0.21	0.30
3	140	0.26	0.38
4	193	0.31	0.45
5	247	0.35	0.51
6	368	0.42	0.62

TA/a	Ta	L	Pe
-	m	-	kN
1.0	0.15	1.12	82.6
1.5	0.23	1.07	86.4
2.0	0.30	1.05	88.1
2.5	0.38	1.04	88.9
3.0	0.45	1.03	89.8
4.0	0.60	1.02	90.7



Se determina un espesor completo de mezcla asfáltica iguala 0.30 m.

3. PAVIMENTO DE CONCRETO (RÍGIDO)

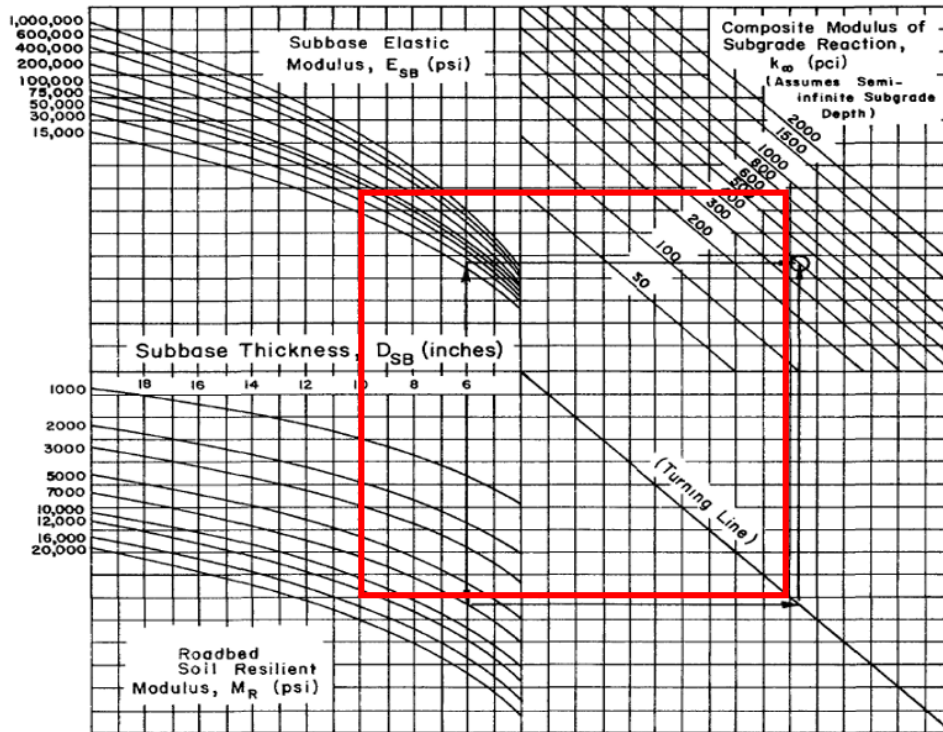
- **Diseño para el equipo RTG:**

Se definen los parámetros de entrada para el tipo de equipo en particular, los mismos se resumen en el siguiente cuadro:

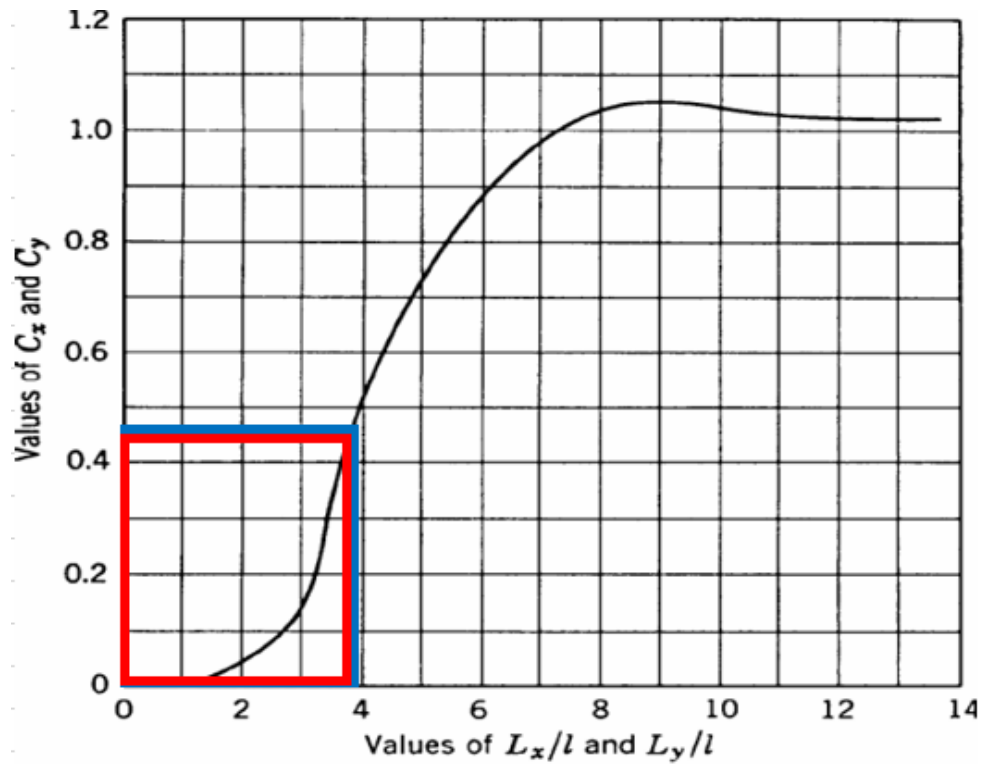
Dato	Valor	Unidad
v, Poisson	0.15	-
E	4000000	psi
Modulo Ruptura	4.5	MPa
	653	psi
Lx	197	in
Ly	197	in
αt	5.00E-06	in/in/oF
Tsup	86.0	oF
Tinf	69.8	oF
ΔT	16.2	oF
h, Espesor losa	12.6	in
P rueda simple	26699	lb
Eje Simple / Dual	D	
Separación Ruedas	45.3	in
ρ	145.0	psi
a	17.90	in
Lx/l	6.48	-
Ly/l	6.48	-
Cx	0.45	-
Cy	0.45	-
CBR Subrasante	10	%
MR Subrasante	15000	psi
k Subrasante	773.20	pci
CBR Base	80	%
MR Base	27500	psi
Espesor Base	9.8	in
k Compuesto	800	pci

Para efectos de diseño, acorde al diseño preliminar se ha definido la inclusión de una base granular con CBR=80%, y se han configurado losas con geometría de 5 m por 5 m.

El módulo de reacción compuesto se determina utilizando el siguiente nomograma:



Los valores C_x y C_y se obtienen del siguiente nomograma:



Los esfuerzos por alabeo se determinan de la siguiente manera:

					SR	N
Centro de losa en X:	$\sigma_x = \frac{E\alpha_t\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_x + \nu C_y)$	Ecuación 36	81.99	psi	0.13	No Limitado
Centro de losa en Y:	$\sigma_y = \frac{E\alpha_t\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_y + \nu C_x)$	Ecuación 37	81.99	psi	0.13	No Limitado
Borde de losa en X:			72.90	psi	0.11	No Limitado
Borde de losa en Y:	$\sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta T}{2}$	Ecuación 38	72.90	psi	0.11	No Limitado
Esquina de losa:	$\sigma = \frac{E\alpha_t\Delta T}{3(1-\nu)}\left[\sqrt{\frac{a}{l}}\right]$	Ecuación 39	97.52	psi	0.15	No Limitado
Radio de rigidez relativa:	$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}\right]^{0.25}$	Ecuación 40	30.38	in		

Esfuerzos en losas de concreto – Ecuaciones de Westergaart

Esfuerzo de esquina

					SR	N
Esfuerzo esquina:	$\sigma_c = \frac{3P}{h^2}\left[1.0 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell}\right)^{0.6}\right]$	Ecuación 41	52.37	psi	0.08	No Limitado
Deflexión esquina:	$\Delta_c = \frac{P}{k\cdot\ell^2}\left[1.1 - 0.88\left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell}\right)\right]$	Ecuación 42	0.0133	in		

Esfuerzo en el centro

Esfuerzo centro:	$\sigma_r = \frac{3(1.0+\nu)P}{2\pi h^2}\left[\ln\left(\frac{\ell}{b}\right) + 0.6159\right]$	Ecuación 43	108.3	psi	0.17	No Limitado
Si $a < 1.724h$, b:	$\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$	Ecuación 44				
			17.406	in		
Si $a \geq 1.724h$, b:	$a = b$	Ecuación 45				

Deflexión
centro:

$$\Delta_i = \frac{P}{8k \cdot l^2} \left\{ 1.0 + \frac{1.0}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right\} \quad \text{Ecuación 46} \quad 0.0040 \text{ in}$$

**Esfuerzo
en el borde**

Esfuerzo
borde área
circular:

$$\sigma_{e(circular)} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{l} \right] \quad \text{Ecuación 47} \quad 146.1 \text{ psi} \quad 0.22 \quad \text{No Limitado}$$

Esfuerzo
borde área
semicircular:

$$\sigma_{e(semicircular)} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 3.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{(1+2\nu)a}{2l} \right] \quad \text{Ecuación 48} \quad 234.4 \text{ psi} \quad 0.36 \quad \text{No Limitado}$$

Deflexión
borde área
circular:

$$\Delta_{e(circular)} = \frac{\sqrt{2+1.2\nu P}}{\sqrt{Eh^3 k}} \left[1.0 - \frac{(0.76+0.4\nu)a}{l} \right] \quad \text{Ecuación 49} \quad \text{in}$$

Deflexión
borde área
semicircular:

$$\Delta_{e(semicircular)} = \frac{\sqrt{2+1.2\nu P}}{\sqrt{Eh^3 k}} \left[1.0 - \frac{(0.323+0.17\nu)a}{l} \right] \quad \text{Ecuación 50} \quad \text{in}$$

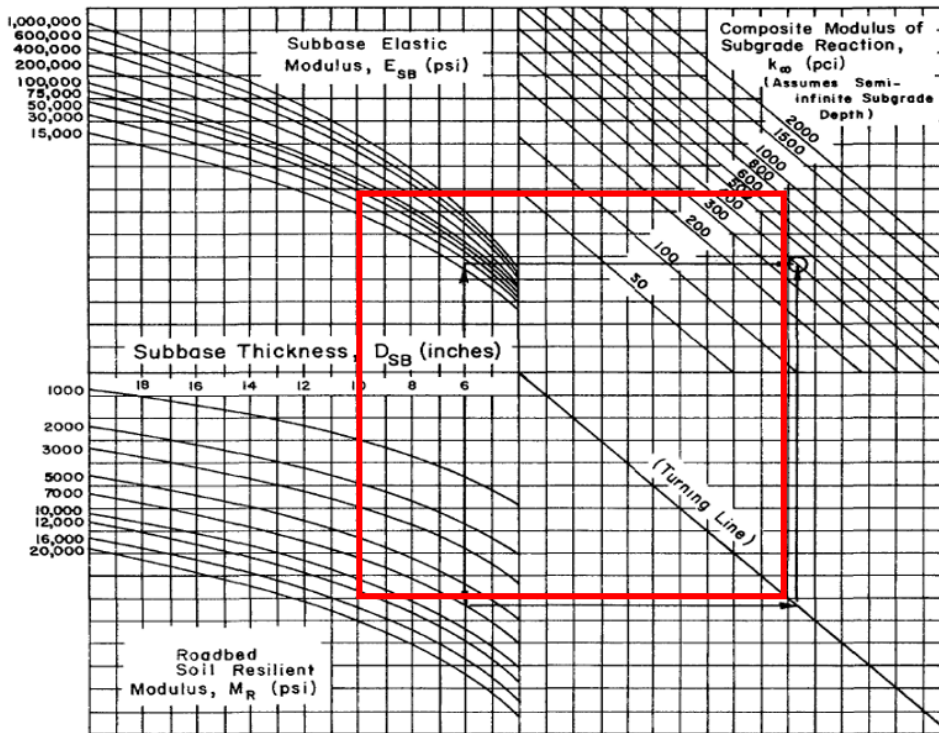
- **Diseño para el equipo Straddle Carrier:**

Se definen los parámetros de entrada para el tipo de equipo en particular, los mismos se resumen en el siguiente cuadro:

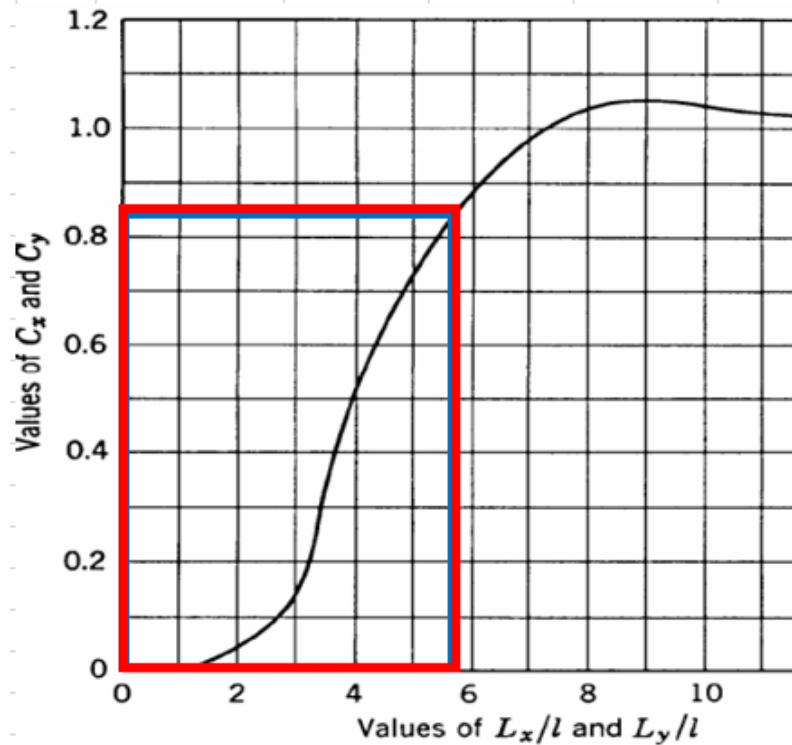
Dato	Valor	Unidad
v, Poisson	0.15	-
E	4000000	psi
Modulo Ruptura	4.5	MPa
	653	psi
Lx	197	in
Ly	197	in
αt	5.00E-06	in/in/oF
Tsup	86.0	oF
Tinf	69.8	oF
ΔT	16.2	oF
h, Espesor losa	14.8	in
P rueda simple	24904	lb
Eje Simple / Dual	S	
Separación Ruedas	45.3	in
p	145.0	psi
a	7.39	in
Lx/l	5.75	-
Ly/l	5.75	-
Cx	0.85	-

Dato	Valor	Unidad
Cy	0.85	-
CBR Subrasante	10	%
MR Subrasante	15000	psi
k Subrasante	773.20	pci
CBR Base	80	%
MR Base	27500	psi
Espesor Base	9.8	in
k Compuesto	800	pci

El módulo de reacción compuesto se determina utilizando el siguiente nomograma:



Los valores C_x y C_y se obtienen del siguiente nomograma:



Los esfuerzos por alabeo se determinan de la siguiente manera:

				SR	N
Centro de losa en X:	$\sigma_x = \frac{E\alpha_1\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_x + \nu C_y)$	Ecuación 36	154.87	psi 0.24	No Limitado
Centro de losa en Y:	$\sigma_y = \frac{E\alpha_1\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_y + \nu C_x)$	Ecuación 37	154.87	psi 0.24	No Limitado
Borde de losa en X:			137.70	psi 0.21	No Limitado
Borde de losa en Y:	$\sigma = \frac{CE\alpha_1\Delta T}{2}$	Ecuación 38	137.70	psi 0.21	No Limitado
Esquina de losa:	$\sigma = \frac{E\alpha_1\Delta T}{3(1-\nu)}\left[\sqrt{\frac{a}{l}}\right]$	Ecuación 39	59.06	psi 0.09	No Limitado
Radio de rigidez relativa:	$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}\right]^{0.25}$	Ecuación 40	34.22	in	

Esfuerzos en losas de concreto – Ecuaciones de Westergaart

Esfuerzo de esquina

Esfuerzo esquina:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1.0 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right)^{0.6} \right]$$

Ecuación 41

174.50 psi

SR

0.27

N
No Limitado

Deflexión esquina:

$$\Delta_e = \frac{P}{k \cdot \ell^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right) \right]$$

Ecuación 42

0.0221 in

Esfuerzo en el centro

Esfuerzo centro:

$$\sigma_i = \frac{3(1.0 + \nu)P}{2\pi h^2} \left[\ln \left(\frac{\ell}{b} \right) + 0.6159 \right]$$

Ecuación 43

133.8 psi

0.20

No Limitado

Si $a < 1.724h$, b:

$$\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$$

Ecuación 44

7.511 in

Si $a \geq 1.724h$, b:

$$a = b$$

Ecuación 45

Deflexión centro:

$$\Delta_i = \frac{P}{8k \cdot \ell^2} \left\{ 1.0 + \frac{1.0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2\ell} \right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{\ell} \right)^2 \right\}$$

Ecuación 46

0.0033 in

Esfuerzo en el borde

Esfuerzo borde área circular:

$$\sigma_e = \frac{3(1 + \nu)P}{\pi(3 + \nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1 - \nu}{2} + \frac{1.18(1 + 2\nu)a}{l} \right]$$

Ecuación 47

247.6 psi

0.38

No Limitado

Esfuerzo borde área semicircular:

$$\sigma_e = \frac{3(1 + \nu)P}{\pi(3 + \nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{(1 + 2\nu)a}{2l} \right]$$

Ecuación 48

309.4 psi

0.47

3,703,994

Deflexión borde área circular:

$$\Delta_e = \frac{\sqrt{2 + 1.2\nu P}}{\sqrt{Eh^3 k}} \left[1.0 - \frac{(0.76 + 0.4\nu)a}{l} \right]$$

Ecuación 49

in

Deflexión borde área semicircular:

$$\Delta_e = \frac{\sqrt{2 + 1.2\nu P}}{\sqrt{Eh^3 k}} \left[1.0 - \frac{(0.323 + 0.17\nu)a}{l} \right]$$

Ecuación 50

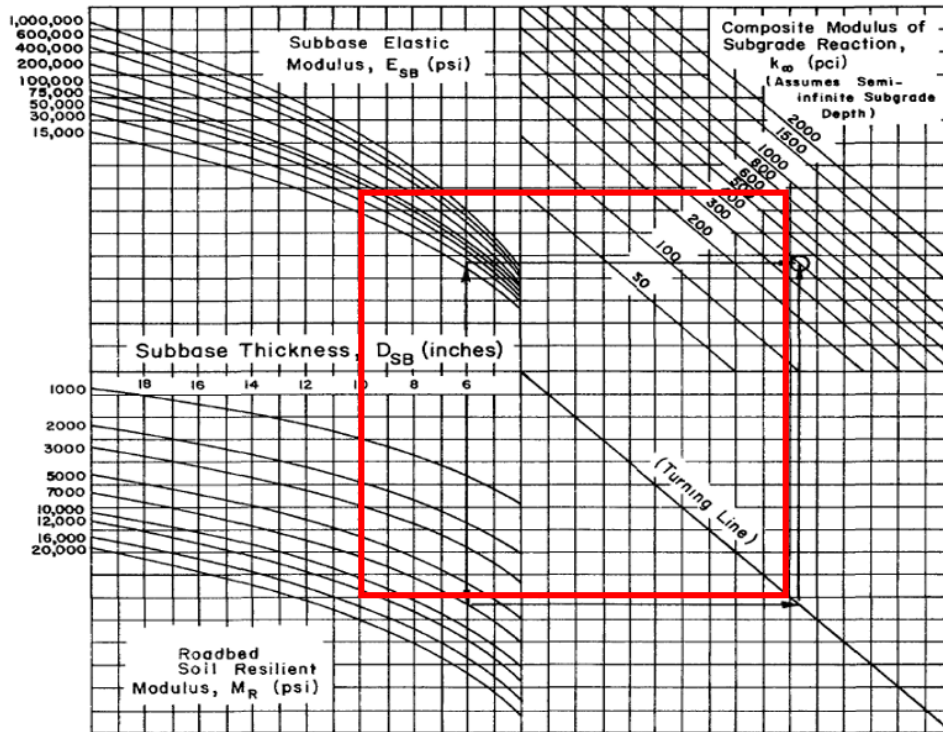
in

- **Diseño para el equipo Tractor de Patio:**

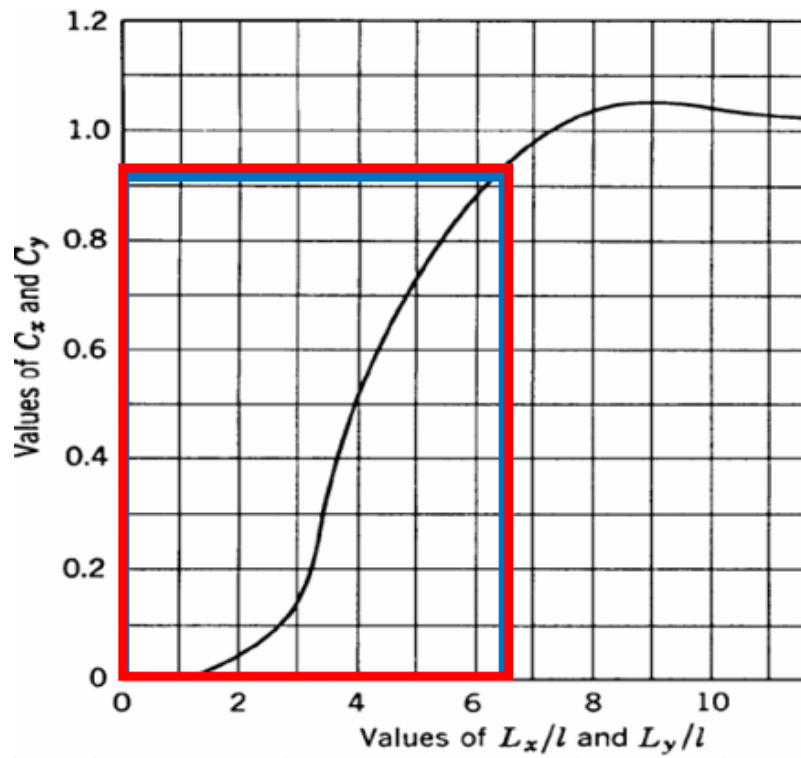
Se definen los parámetros de entrada para el tipo de equipo en particular, los mismos se resumen en el siguiente cuadro:

Dato	Valor	Unidad
v, Poisson	0.15	-
E	4000000	psi
Modulo Ruptura	4.5	MPa
	653	psi
Lx	197	in
Ly	197	in
αt	5.00E-06	in/in/oF
Tsup	86.0	oF
Tinf	69.8	oF
ΔT	16.2	oF
h, Espesor losa	12.6	in
P rueda simple	10321	lb
Eje Simple / Dual	D	
Separación Ruedas	14.2	in
p	94.3	psi
a	9.75	in
Lx/l	6.48	-
Ly/l	6.48	-
Cx	0.92	-
Cy	0.92	-
CBR Subrasante	10	%
MR Subrasante	15000	psi
k Subrasante	773.20	pci
CBR Base	80	%
MR Base	27500	psi
Espesor Base	9.8	in
k Compuesto	800	pci

El módulo de reacción compuesto se determina utilizando el siguiente nomograma:



Los valores C_x y C_y se obtienen del siguiente nomograma:



Los esfuerzos por alabeo se determinan de la siguiente manera:

					SR	N
Centro de losa en X:	$\sigma_x = \frac{E\alpha_i\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_x + \nu C_y)$	Ecuación 36	167.62	psi	0.26	No Limitado
Centro de losa en Y:	$\sigma_y = \frac{E\alpha_i\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_y + \nu C_x)$	Ecuación 37	167.62	psi	0.26	No Limitado
Borde de losa en X:			149.04	psi	0.23	No Limitado
Borde de losa en Y:	$\sigma = \frac{CE\alpha_i\Delta T}{2}$	Ecuación 38	149.04	psi	0.23	No Limitado
Esquina de losa:	$\sigma = \frac{E\alpha_i\Delta T}{3(1-\nu)}\left[\sqrt{\frac{a}{l}}\right]$	Ecuación 39	71.96	psi	0.11	No Limitado
Radio de rigidez relativa:	$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}\right]^{0.25}$	Ecuación 40	30.38	in		

Esfuerzos en losas de concreto – Ecuaciones de Westergaart

Esfuerzo de esquina

					SR	N
Esfuerzo esquina:	$\sigma_c = \frac{3P}{h^2}\left[1.0 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l}\right)^{0.6}\right]$	Ecuación 41	73.68	psi	0.11	No Limitado

Deflexión esquina:	$\Delta_c = \frac{P}{k.l^2}\left[1.1 - 0.88\left(\frac{a\sqrt{2}}{l}\right)\right]$	Ecuación 42	0.0098	in		
--------------------	---	-------------	--------	----	--	--

Esfuerzo en el centro

Esfuerzo centro:	$\sigma_i = \frac{3(1.0+\nu)P}{2\pi h^2}\left[\ln\left(\frac{l}{b}\right) + 0.6159\right]$	Ecuación 43	64.9	psi	0.10	No Limitado
------------------	--	-------------	------	-----	------	-------------

Si $a < 1.724h$, b:	$\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$	Ecuación 44	9.123	in		
----------------------	--------------------------------	-------------	-------	----	--	--

Si $a \geq 1.724h$, b:	$a = b$	Ecuación 45				
-------------------------	---------	-------------	--	--	--	--

Deflexión centro:
$$\Delta_i = \frac{P}{8k \cdot l^2} \left\{ 1.0 + \frac{1.0}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right\}$$
 Ecuación 46 0.0017 in

Esfuerzo en el borde

Esfuerzo borde área circular:
$$\sigma_e = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{l} \right]$$
 Ecuación 47 106.9 psi 0.16 No Limitado

Esfuerzo borde área semicircular:
$$\sigma_e = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 3.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{(1+2\nu)a}{2l} \right]$$
 Ecuación 48 141.8 psi 0.22 No Limitado

Deflexión borde área circular:
$$\Delta_c = \frac{\sqrt{2+1.2\nu P}}{\sqrt{Eh^3 k}} \left[1.0 - \frac{(0.76+0.4\nu)a}{l} \right]$$
 Ecuación 49 in

Deflexión borde área semicircular:
$$\Delta_c = \frac{\sqrt{2+1.2\nu P}}{\sqrt{Eh^3 k}} \left[1.0 - \frac{(0.323+0.17\nu)a}{l} \right]$$
 Ecuación 50 in

• **Selección de dovelas:**

Se define el uso de dovelas con diámetro de 30 mm, longitud de al menos 510 mm y espaciamiento transversal máximo de 380 mm centro a centro.

Espesor de losa	Diámetro de dovela	Longitud	Espaciamiento
6-7 in (152-178 mm)	¾ in (20 mm)	18 in (460 mm)	12 in (305 mm)
7.5-12 in (191-305 mm)	1 in (25 mm)	18 in (460 mm)	12 in (305 mm)
12.5-16 in (318-406 mm)	1 ¼ in (30 mm)	20 in (510 mm)	15 in (380 mm)
16.5-20 in (419-508 mm)	1 ½ in (40 mm)	20 in (510 mm)	18 in (460 mm)
20.5-24 in (521-610 mm)	2 in (50 mm)	24 in (610 mm)	18 in (460 mm)

4. METODOLOGÍA PAVIMENTO DE ADOQUINES (PORT AND INDUSTRIAL PAVEMENT DESIGN WITH CONCRETE PAVERS: A COMPREHENSIVE GUIDE)

Acorde la información propia del proyecto TCM, se tiene una relación de contenedores de 40 pies a contenedores de 20 pies de 86% / 14%. Del Cuadro A. 1, se interpola entre los valores de las columnas de 100% / 0% y 60% / 40%:

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)		
	100 / 0	86/14	60 / 40
0	0	0	0
1000	0	0	0
2000	0	0	0.18
3000	0	0	0.6
4000	0.18	0.57	1.29
5000	0.53	1.01	1.9
6000	0.98	1.40	2.17
7000	1.37	1.73	2.41
8000	2.6	2.76	3.05
9000	2.82	2.90	3.05
10000	3.3	3.35	3.44
11000	4.43	4.38	4.28
12000	5.73	5.56	5.24
13000	5.12	5.02	4.83
14000	5.85	5.69	5.38
15000	4.78	4.90	5.12
16000	5.22	5.35	5.58
17000	5.45	5.56	5.75
18000	5.55	5.68	5.91
19000	6.08	6.29	6.68
20000	7.67	7.88	8.28
21000	10.4	9.89	8.93
22000	9.95	9.13	7.6
23000	5.53	5.10	4.31
24000	2.75	2.40	1.75
25000	0.95	0.84	0.63
26000	0.67	0.58	0.4
27000	0.72	0.62	0.43
28000	0.53	0.46	0.32
29000	0.43	0.37	0.26
30000	0.28	0.24	0.17
31000	0.03	0.03	0.02
32000	0.03	0.03	0.02

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)		
	100 / 0	86/14	60 / 40
33000	0	0	0
34000	0.05	0.04	0.03

- **Diseño para el equipo Tractor de Patio:**

El cálculo anterior permite determinar el factor de daño D para cada uno de los ejes por tipo de equipo, esto determina el peso de contenedor crítico de análisis, como se puede observar no necesariamente corresponde al contenedor de mayor, sino al de 22 000 kg:

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)			W1	W2	W3	D
	100 / 0	86/14	60 / 40				
0	0	0	0	1590.00	1930.00	570.00	0
1000	0	0	0	1635.14	2056.52	620.46	0
2000	0	0	0.18	1680.28	2183.03	670.91	0
3000	0	0	0.6	1725.42	2309.55	721.37	0
4000	0.18	0.57	1.29	1770.56	2436.07	771.83	0.00111
5000	0.53	1.01	1.9	1815.71	2562.58	822.28	0.002382
6000	0.98	1.40	2.17	1860.85	2689.10	872.74	0.003948
7000	1.37	1.73	2.41	1905.99	2815.61	923.20	0.005825
8000	2.6	2.76	3.05	1951.13	2942.13	973.65	0.010923
9000	2.82	2.90	3.05	1996.27	3068.65	1024.11	0.013455
10000	3.3	3.35	3.44	2041.41	3195.16	1074.57	0.018076
11000	4.43	4.38	4.28	2086.55	3321.68	1125.02	0.027332
12000	5.73	5.56	5.24	2131.69	3448.20	1175.48	0.039928
13000	5.12	5.02	4.83	2176.83	3574.71	1225.93	0.041265
14000	5.85	5.69	5.38	2221.97	3701.23	1276.39	0.053262
15000	4.78	4.90	5.12	2267.12	3827.75	1326.85	0.052059
16000	5.22	5.35	5.58	2312.26	3954.26	1377.30	0.064176
17000	5.45	5.56	5.75	2357.40	4080.78	1427.76	0.075045
18000	5.55	5.68	5.91	2402.54	4207.30	1478.22	0.085981
19000	6.08	6.29	6.68	2447.68	4333.81	1528.67	0.106479
20000	7.67	7.88	8.28	2492.82	4460.33	1579.13	0.14866
21000	10.4	9.89	8.93	2537.96	4586.84	1629.59	0.207026
22000	9.95	9.13	7.6	2583.10	4713.36	1680.04	0.211686
23000	5.53	5.10	4.31	2628.24	4839.88	1730.50	0.130709
24000	2.75	2.40	1.75	2673.39	4966.39	1780.96	0.06772
25000	0.95	0.84	0.63	2718.53	5092.91	1831.41	0.025985
26000	0.67	0.58	0.4	2763.67	5219.43	1881.87	0.019565

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)			W1	W2	W3	D
	100 / 0	86/14	60 / 40				
27000	0.72	0.62	0.43	2808.81	5345.94	1932.33	0.023003
28000	0.53	0.46	0.32	2853.95	5472.46	1982.78	0.018534
29000	0.43	0.37	0.26	2899.09	5598.98	2033.24	0.016389
30000	0.28	0.24	0.17	2944.23	5725.49	2083.70	0.011616
31000	0.03	0.03	0.02	2989.37	5852.01	2134.15	0.001384
32000	0.03	0.03	0.02	3034.51	5978.53	2184.61	0.001499
33000	0	0	0	3079.66	6105.04	2235.07	0
34000	0.05	0.04	0.03	3124.80	6231.56	2285.52	0.002842

Una vez determinado el peso de contenedor crítico, se realiza la factorización de la carga de rueda empleando factores dinámicas por frenado y giro, se determina el factor de proximidad empleando un valor de CBR=10%. Se determinan un factor de equivalencia de ejes relativo al eje de máxima carga:

W1	2583.10	kg	5708.7	lb	25.3	kN
W2	4713.36	kg	10416.5	lb	46.2	kN
W3	1680.04	kg	3712.9	lb	16.5	kN

Eje 1	5166.2067	kg	11417	lb	51	kN
Eje 2	18853.445	kg	41666	lb	185	kN
Eje 3	13440.348	kg	29703	lb	132	kN

Frenado	0.1
Giros	0.3
Fd	1.4

CBR	10
Profundidad efectiva (mm)	2114.1896
Factor proximidad	1.83

Eje 1	14625.583	kg	32323	lb	143	kN
Eje 2	26687.146	kg	58979	lb	262	kN
Eje 3	9512.4398	kg	21022	lb	93	kN

Eje 1	0.5480
Eje 2	1.0000
Eje 3	0.3564

1.9045

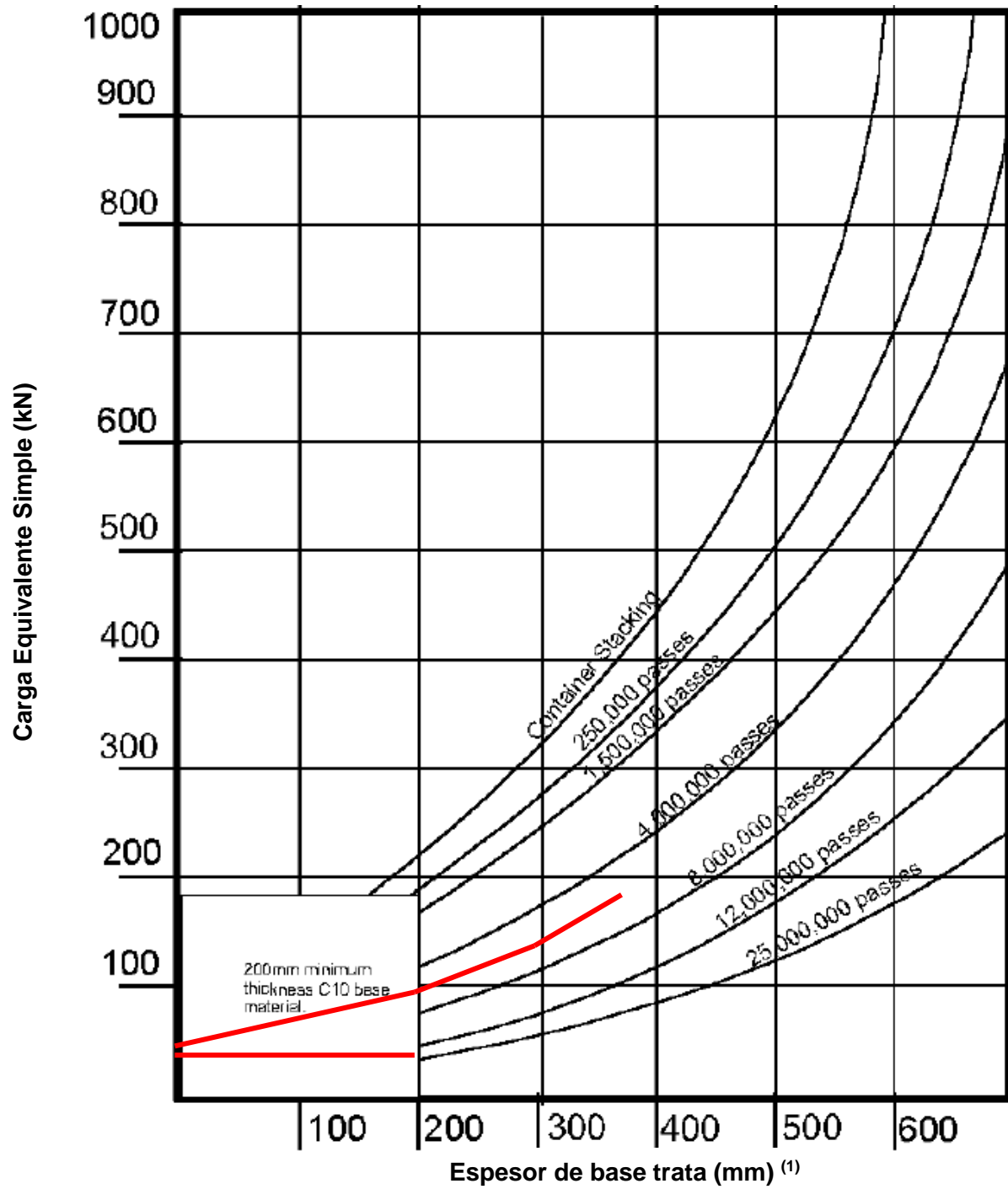
Acorde al información de proyecto, para este tipo de equipo se estableció un total de 3 533 668 movimientos. Aplicando el factor de conversión a eje equivalente de 1.90, se obtiene un total de ejes igual a 6 704 773 repeticiones.

A partir de la cantidad de repeticiones y del valor de carga de rueda máxima, se determinad el espesor de base tratada mínimo.

CBR Subrasante	Coronamiento (mm)	Subbase (mm)
1.0 %	600	150
2.0 %	350	150
3.0 %	250	150
5 – 7 %	No requerido	225
> 7 %	No requerido	150

Se obtiene una estructura de pavimento tal que:

- Adoquín: 0.08 m
- Base tratada: 0.20 m
- Subbase: 0.15 m
- Coronamiento: 0.00 m



- **Diseño para el equipo Straddle Carrier:**

El cálculo anterior permite determinar el factor de daño D para cada uno de los ejes por tipo de equipo, esto determina el peso de contenedor crítico de análisis, como se puede observar no necesariamente corresponde al contenedor de mayor, sino al de 21 000 kg:

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)						W	D
	100 / 0	86/14	60 / 40	50 / 50	40 / 60	0 / 100		
0	0	0	0	0	0	0	7837.35	0.000
1000	0	0	0	0	0	0	8004.01	0.000
2000	0	0	0.18	0.23	0.28	0.46	8170.68	0.000
3000	0	0	0.6	0.74	0.89	1.49	8337.35	0.000
4000	0.18	0.57	1.29	1.57	1.84	2.95	8504.01	0.121
5000	0.53	1.01	1.9	2.25	2.59	3.96	8670.68	0.230
6000	0.98	1.40	2.17	2.46	2.76	3.94	8837.35	0.342
7000	1.37	1.73	2.41	2.67	2.93	3.97	9004.01	0.456
8000	2.6	2.76	3.05	3.16	3.27	3.72	9170.68	0.776
9000	2.82	2.90	3.05	3.11	3.17	3.41	9337.35	0.873
10000	3.3	3.35	3.44	3.48	3.52	3.66	9504.01	1.077
11000	4.43	4.38	4.28	4.24	4.2	4.04	9670.68	1.503
12000	5.73	5.56	5.24	5.12	4.99	4.5	9837.35	2.035
13000	5.12	5.02	4.83	4.76	4.69	4.41	10004.01	1.957
14000	5.85	5.69	5.38	5.26	5.14	4.67	10170.68	2.359
15000	4.78	4.90	5.12	5.21	5.29	5.63	10337.35	2.160
16000	5.22	5.35	5.58	5.67	5.76	6.13	10504.01	2.503
17000	5.45	5.56	5.75	5.83	5.91	6.21	10670.68	2.759
18000	5.55	5.68	5.91	6	6.1	6.46	10837.35	2.988
19000	6.08	6.29	6.68	6.83	6.98	7.58	11004.01	3.506
20000	7.67	7.88	8.28	8.43	8.58	9.19	11170.68	4.649
21000	10.4	9.89	8.93	8.56	8.18	6.72	11337.35	6.163
22000	9.95	9.13	7.6	7.02	6.43	4.08	11504.01	6.010
23000	5.53	5.10	4.31	4	3.69	2.47	11670.68	3.546
24000	2.75	2.40	1.75	1.5	1.25	0.24	11837.35	1.759
25000	0.95	0.84	0.63	0.55	0.47	0.15	12004.01	0.647
26000	0.67	0.58	0.4	0.33	0.27	0	12170.68	0.468
27000	0.72	0.62	0.43	0.36	0.29	0	12337.35	0.529
28000	0.53	0.46	0.32	0.27	0.21	0	12504.01	0.411
29000	0.43	0.37	0.26	0.22	0.17	0	12670.68	0.350
30000	0.28	0.24	0.17	0.14	0.11	0	12837.35	0.240
31000	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0	13004.01	0.028
32000	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0	13170.68	0.029
33000	0	0	0	0	0	0	13337.35	0.000

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)						W	D
	100 / 0	86/14	60 / 40	50 / 50	40 / 60	0 / 100		
34000	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0	13504.01	0.052

Una vez determinado el peso de contenedor crítico, se realiza la factorización de la carga de rueda empleando factores dinámicas por frenado y giro, se determina el factor de proximidad empleando un valor de CBR=10%. Se determinan un factor de equivalencia de ejes relativo al eje de máxima carga:

W1	19964.789	kg	43943	lb	196	kN
W2	11735.575	kg	25830	lb	115	kN
W3	0	kg	0	lb	0	kN

Eje 1	39929.577	kg	88244	lb	392	kN
Eje 2	23471.149	kg	51871	lb	230	kN
Eje 3	0	kg	0	lb	0	kN

Frenado	0.5
Giros	0.6
Fd	2.1

CBR	10
Profundidad efectiva (mm)	2114.1896
Factor proximidad	1

Eje 1	1.0000
Eje 2	0.1363
Eje 3	0.0000
	1.1363

Eje 1	1.0000
Eje 2	1.0000
Eje 3	1.0000
	3.0000

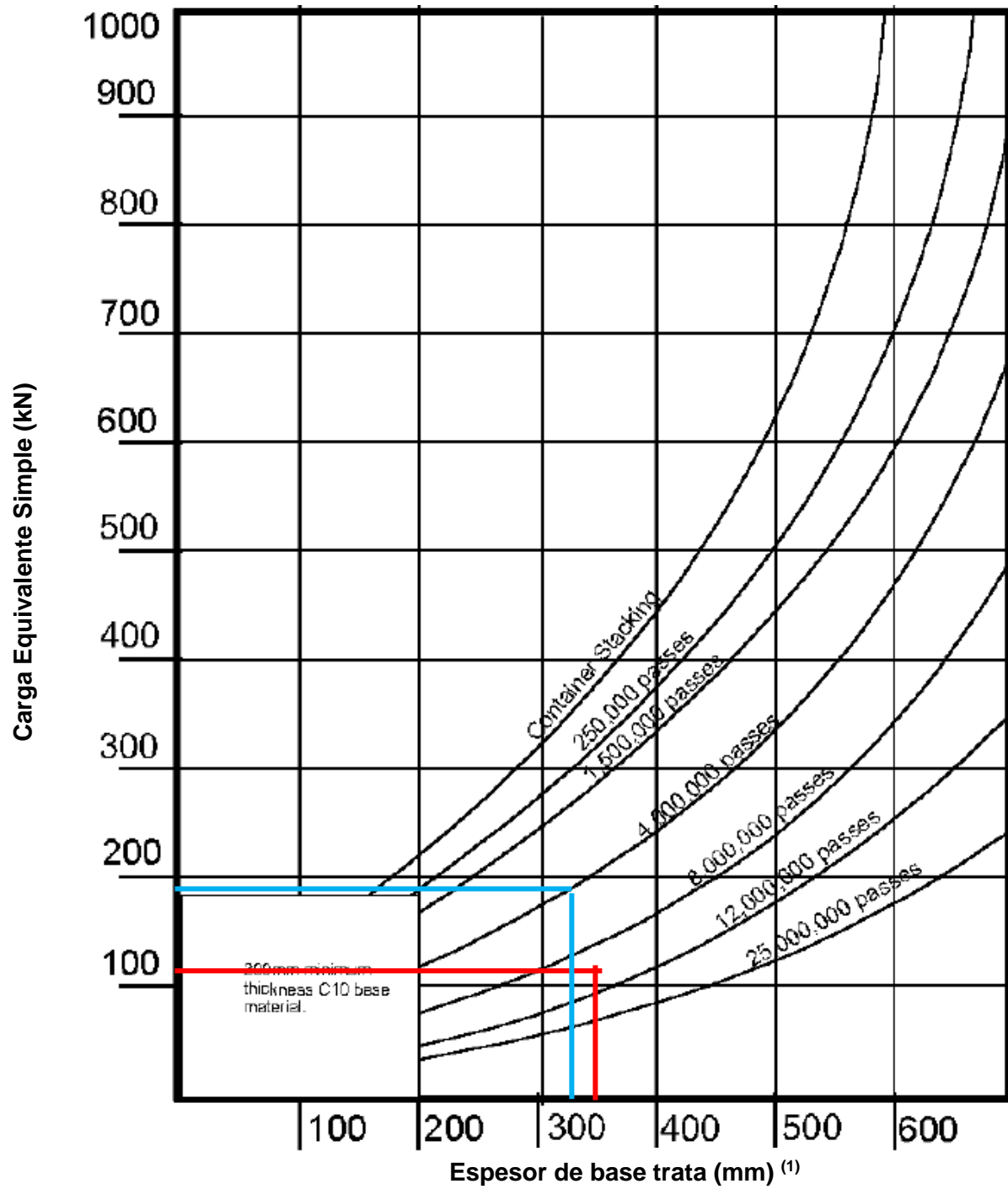
Acorde al información de proyecto, para este tipo de equipo se estableció un total de 3 533 668 movimientos. Aplicando el factor de conversión a eje equivalente de 3.00, se obtiene un total de ejes igual a 10 601 004 repeticiones de una rueda 111 kN. Aplicando el factor de conversión a eje equivalente de 1.13, se obtiene un total de ejes igual a 3 993 045 repeticiones de una rueda 196 kN.

A partir de la cantidad de repeticiones y del valor de carga de rueda máxima, se determinad el espesor de base tratada mínimo.

CBR Subrasante	Coronamiento (mm)	Subbase (mm)
1.0 %	600	150
2.0 %	350	150
3.0 %	250	150
5 – 7 %	No requerido	225
> 7 %	No requerido	150

Se obtiene una estructura de pavimento tal que:

- Adoquín: 0.08 m
- Base tratada: 0.35 m
- Subbase: 0.15 m
- Coronamiento: 0.00 m



- **Diseño para el equipo RTG:**

El cálculo anterior permite determinar el factor de daño D para cada uno de los ejes por tipo de equipo, esto determina el peso de contenedor crítico de análisis, como se puede observar no necesariamente corresponde al contenedor de mayor, sino al de 21 000 kg:

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)						W	D
	100 / 0	86/14	60 / 40	50 / 50	40 / 60	0 / 100		
0	0	0	0	0	0	0	12130.48	0.000
1000	0	0	0	0	0	0	12255.48	0.000
2000	0	0	0.18	0.23	0.28	0.46	12380.48	0.000
3000	0	0	0.6	0.74	0.89	1.49	12505.48	0.000
4000	0.18	0.57	1.29	1.57	1.84	2.95	12630.48	0.531
5000	0.53	1.01	1.9	2.25	2.59	3.96	12755.48	0.979
6000	0.98	1.40	2.17	2.46	2.76	3.94	12880.48	1.405
7000	1.37	1.73	2.41	2.67	2.93	3.97	13005.48	1.809
8000	2.6	2.76	3.05	3.16	3.27	3.72	13130.48	2.981
9000	2.82	2.90	3.05	3.11	3.17	3.41	13255.48	3.249
10000	3.3	3.35	3.44	3.48	3.52	3.66	13380.48	3.886
11000	4.43	4.38	4.28	4.24	4.2	4.04	13505.48	5.260
12000	5.73	5.56	5.24	5.12	4.99	4.5	13630.48	6.914
13000	5.12	5.02	4.83	4.76	4.69	4.41	13755.48	6.460
14000	5.85	5.69	5.38	5.26	5.14	4.67	13880.48	7.571
15000	4.78	4.90	5.12	5.21	5.29	5.63	14005.48	6.746
16000	5.22	5.35	5.58	5.67	5.76	6.13	14130.48	7.611
17000	5.45	5.56	5.75	5.83	5.91	6.21	14255.48	8.175
18000	5.55	5.68	5.91	6	6.1	6.46	14380.48	8.631
19000	6.08	6.29	6.68	6.83	6.98	7.58	14505.48	9.880
20000	7.67	7.88	8.28	8.43	8.58	9.19	14630.48	12.788
21000	10.4	9.89	8.93	8.56	8.18	6.72	14755.48	16.555
22000	9.95	9.13	7.6	7.02	6.43	4.08	14880.48	15.777
23000	5.53	5.10	4.31	4	3.69	2.47	15005.48	9.101
24000	2.75	2.40	1.75	1.5	1.25	0.24	15130.48	4.416
25000	0.95	0.84	0.63	0.55	0.47	0.15	15255.48	1.590
26000	0.67	0.58	0.4	0.33	0.27	0	15380.48	1.126
27000	0.72	0.62	0.43	0.36	0.29	0	15505.48	1.247
28000	0.53	0.46	0.32	0.27	0.21	0	15630.48	0.949
29000	0.43	0.37	0.26	0.22	0.17	0	15755.48	0.793
30000	0.28	0.24	0.17	0.14	0.11	0	15880.48	0.533
31000	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0	16005.48	0.060
32000	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0	16130.48	0.062
33000	0	0	0	0	0	0	16255.48	0.000

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)						W	D
	100 / 0	86/14	60 / 40	50 / 50	40 / 60	0 / 100		
34000	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0	16380.48	0.107

Una vez determinado el peso de contenedor crítico, se realiza la factorización de la carga de rueda empleando factores dinámicas por frenado y giro, se determina el factor de proximidad empleando un valor de CBR=10%. Se determinan un factor de equivalencia de ejes relativo al eje de máxima carga:

W1	14787.277	kg	32547	lb	145	kN
W2	14787.277	kg	32547	lb	145	kN
W3	14787.277	kg	32547	lb	145	kN
W4	14787.277	kg	32547	lb	145	kN

Frenado	0.1
Giros	0
Fd	1.1

CBR	10
Profundidad efectiva (mm)	2114.18
Factor proximidad	1.43

Rueda 1	21145.806	kg	46732	lb	207	kN
Rueda 2	21145.806	kg	46732	lb	207	kN
Rueda 3	21145.806	kg	46732	lb	207	kN
Rueda 4	21145.806	kg	46732	lb	207	kN

Eje 1	1.0000
Eje 2	1.0000
Eje 3	1.0000
Eje 4	1.0000
	4.0000

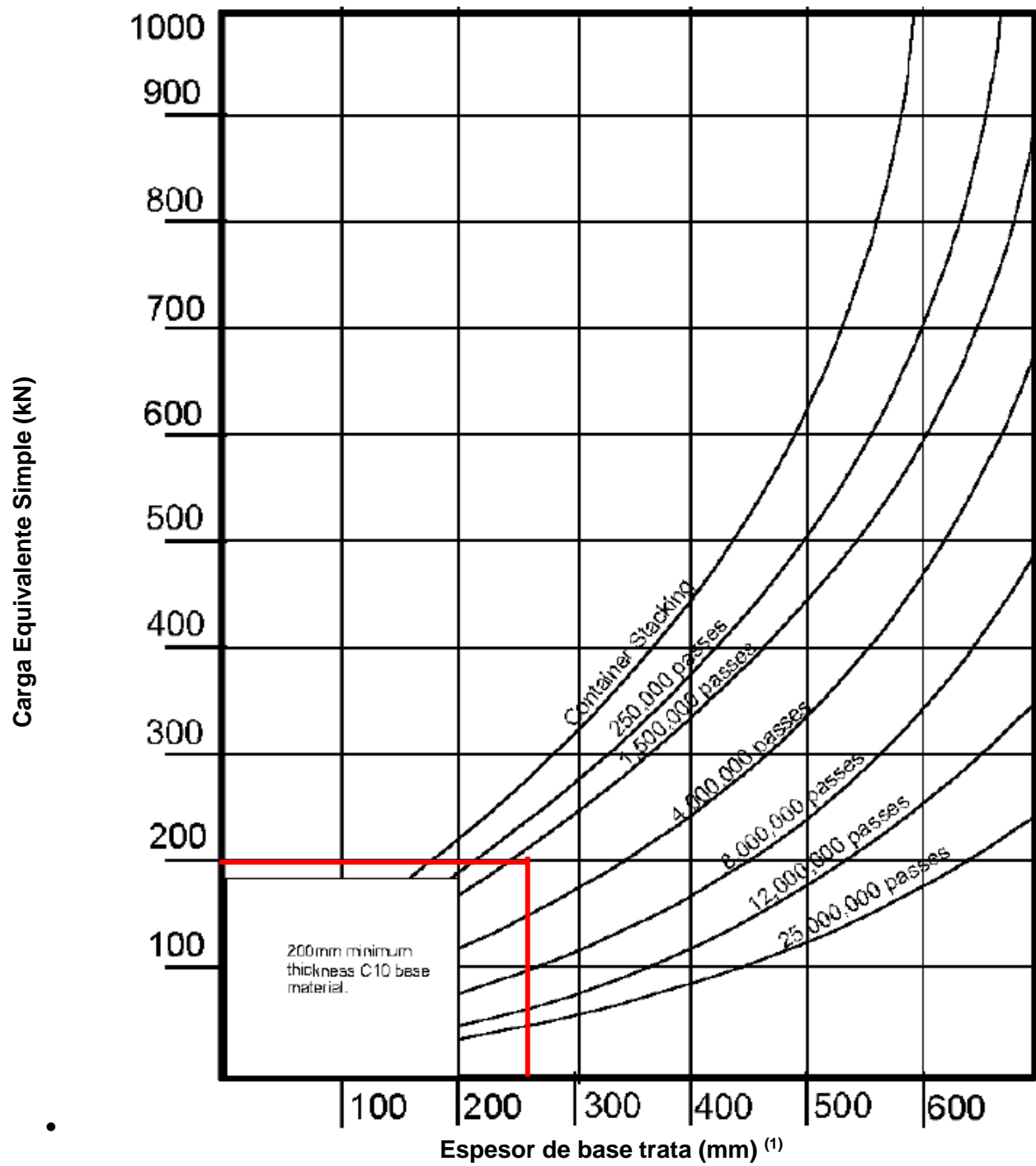
Acorde al información de proyecto, para este tipo de equipo se estableció un total de 493 816 movimientos. Aplicando el factor de conversión a eje equivalente de 4.00, se obtiene un total de ejes igual a 1 975 262 repeticiones de una rueda 207 kN.

A partir de la cantidad de repeticiones y del valor de carga de rueda máxima, se determinad el espesor de base tratada mínimo.

CBR Subrasante	Coronamiento (mm)	Subbase (mm)
1.0 %	600	150
2.0 %	350	150
3.0 %	250	150
5 – 7 %	No requerido	225
> 7 %	No requerido	150

Se obtiene una estructura de pavimento tal que:

- Adoquín: 0.08 m
- Base tratada: 0.25 m
- Subbase: 0.15 m
- Coronamiento: 0.00 m



CAPITULO 9: APÉNDICES

9.1. Apéndice 1: Guía de diseño de pavimentos portuarios en Costa Rica



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE TRASPORTES Y VÍAS
TRABAJO FINAL DE INVESTIGACIÓN APLICADA**

APÉNDICE 8.1

Autor: Danny Chacón Ramírez



**GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS
PORTUARIOS EN COSTA RICA**

PRESENTACIÓN

Este documento funge como un subproducto del Trabajo Final de Investigación Aplicado realizado como parte de los requisitos del programa de postgrado en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería de Traspotes y Vías de la Universidad de Costa Rica.

Ing. Danny Chacón Ramírez

Autor

Estudiante de la Maestría en Ingeniería de Traspotes y Vías
Universidad de Costa Rica

PREFACIO

En este documento se describe una metodología de diseño para pavimentos en el ámbito portuario. Esta metodología se sustenta en revisiones bibliográficas del estado del arte en cuanto a pavimentos portuarios se refiere.

A nivel internacional algunos países han realizado esfuerzos para redactar guías, manuales y especificaciones para el diseño de pavimentos que serán usados como superficie de ruedo en condiciones que difieren significativamente a las de una carretera.

La principal diferencia que debe ser tomada en cuenta entre el diseño de pavimentos para puertos y el diseño de pavimentos para carreteras, son las cargas aplicadas.

En el área de pavimentos para carreteras, existen numerosas metodologías de diseño, tales como la propuesta por AASHTO 1993, y más recientemente actualizada en 2002 incorporando criterios mecanístico-empíricos, para el caso de pavimentos flexibles. Se complementa con metodologías como la recomendada por el Instituto del Asfalto. En el caso de pavimentos rígidos, se pueden consultar metodologías como la expuesta en AASHTO 1993 o la presentada por la Asociación del Cemento Portland (PCA, por sus siglas en ingles).

No obstante, si el problema a solucionar se trata de una estructura de pavimento destinado a servir de superficie de ruedo para cargas mucho mas elevadas que las observadas en carreteras y con configuraciones de ejes en función de los equipos disponibles, las metodologías anteriormente mencionadas no pueden ser aplicadas. Este tipo de estructuras se conoce como pavimentos para cargas pesadas (heavy duty), y son del tipo que se encuentran en puertos.

Este manual presenta la información necesaria para que los ingenieros que se enfrentan al diseño de un pavimento portuario puedan dimensionar el mismo aplicando la metodología propuesta, sin necesidad de realizar extensas búsquedas bibliográficas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	i
PREFACIO.....	ii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS ANEXAS	ix
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Propósito del manual	1
1.2. Visión general del procedimiento de diseño	1
1.3. Definiciones	3
CAPITULO 2: DOCUMENTOS DE REFERENCIA Y NORMATIVA.....	6
2.1. Protocolos y normas de ensayo	6
2.1.1. Materiales granulares y suelos.....	6
2.1.2. Materiales mejorados o estabilizados.....	7
2.1.3. Concreto hidráulico	7
2.1.4. Mezclas asfálticas en caliente.....	8
2.1.5. Adoquines de concreto	9
2.1.6. Caracterización en sitio.....	9
2.2. Documentos de referencia	9
CAPITULO 3: INFORMACIÓN DEL PROYECTO	11
3.1. Zonificación para la pavimentación de obras portuarias.....	11
3.2. EQUIPOS DE MANIPULACIÓN.....	12
3.3. CARACTERÍSTICAS DEL RELLENO	12
3.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DISPONIBLES.....	12
3.5. VIDA ÚTIL.....	13
CAPITULO 4: CARGAS	14
4.1. Cargas de estacionamiento o almacenamiento.....	14
4.2. Cargas de almacenamiento de graneles solidos	14
4.3. Cargas de almacenamiento de mercancía general	15
4.4. Cargas en zonas de almacenamiento de contenedores.....	16
4.5. Cargas de estacionamiento de semirremolques.....	18
4.6. Cargas de los equipos e instalaciones de manipulación de mercancías	19
4.6.1. Grúas pórtico (portal cranes).....	20
4.6.2. Grúas porta contenedores (portainers).....	21

4.6.3.	Pórticos de almacenamiento (transtainers)	22
4.6.4.	Carretillas pórtico (straddle carriers).....	22
4.6.5.	Cargadores frontales (front lift trucks)	24
4.6.6.	Cargadores laterales (side loader lift trucks)	25
4.6.7.	Grúas móviles (mobile cranes).....	26
4.6.8.	Semirremolques.....	27
CAPITULO 5: DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE PAVIMENTACIÓN.....		30
5.1.	Subrasante.....	30
5.2.	Materiales de base y subbase.....	34
5.3.	Materiales estabilizados	36
5.4.	Concreto hidráulico	37
5.5.	Adoquines de concreto.....	39
5.6.	Mezcla Asfáltica en Caliente	40
CAPITULO 6: DISEÑO PRELIMINAR DEL PAVIMENTO.....		45
6.1.	Metodología de la Guía ROM 4.1-94 Proyecto y construcción de pavimentos portuarios	45
6.2.	Índice de intensidad de uso.....	45
6.3.	Caracterización de las cargas	47
6.3.1.	Zona de operación	47
6.3.2.	Zona de almacenamiento de graneles solidos	48
6.4.	Categoría del trafico.....	49
6.5.	Características del Relleno (Subrasante) y Explanada (Coronación)	49
6.6.	Categorización de la explanada	51
6.7.	Selección del tipo de pavimento.....	53
6.8.	Ejemplo de aplicación ROM 4.1-94	57
CAPITULO 7: METODOLOGÍAS DE DISEÑO ESPECIFICAS		59
7.1.	Pavimento asfaltico (Full Deph).....	59
7.1.1.	Generalidades.....	59
7.1.2.	Cargas	59
7.1.3.	Metodología propuesta por el MS-23	60
7.1.4.	Diseño para una rueda simple.....	61
7.1.5.	Diseño para una rueda dual	62
7.1.6.	Diseño para ruedas múltiples	63
7.2.	Pavimento concreto hidráulico	65

7.2.1.	Generalidades.....	65
7.2.2.	Daño por fatiga	66
7.2.3.	Esfuerzos de alabeo	67
7.2.4.	Esfuerzos en losas de concreto – Ecuaciones de Westergaart	68
7.2.5.	Transmisión de esfuerzos – Dovelas.....	70
7.2.6.	Refuerzo por fricción / temperatura	72
7.3.	Pavimento de adoquines.....	73
7.3.1.	Generalidades.....	73
7.3.2.	Cargas	74
7.3.3.	Efectos dinámicos.....	75
7.3.4.	Cargas por contenedores.....	75
7.3.5.	Factor de proximidad de carga.....	75
7.3.6.	Factores de conversión de material.....	76
7.3.7.	Cuadro y grafica de diseño	77
7.3.8.	Selección del tipo y espesor de adoquín	78
7.3.9.	Recomendaciones para elementos de restricción lateral.....	78
CAPITULO 8: BIBLIOGRAFÍA.....		80
CAPITULO 9: ANEXOS		81
9.1.	Catálogo de estructuras de pavimento acorde a ROM 4.1-94	81
9.2.	Anexos asociados a la sección 7.1 Pavimento asfaltico	83
9.3.	Anexos asociados a la sección 7.2 Pavimento concreto hidráulico	92
9.4.	Anexos asociados a la sección 7.3 Pavimento de adoquines.....	94

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Usos de las superficies portuarias	13
Cuadro 2. Alturas máximas de apilamiento	17
Cuadro 3. Cargas en el pavimento por apilamiento de contenedores.....	18
Cuadro 4. Cargas y presiones.....	20
Cuadro 5. Valores típicos de los parámetros K y módulo de resiliencia.....	32
Cuadro 6. Valores típicos de los parámetros K.....	35
Cuadro 7. Valores típicos de módulo de resiliencia para materiales granulares	35
Cuadro 8. Correlaciones para modulo resiliente para materiales granulares	36
Cuadro 9. Calificación del índice de intensidad (I) en función de la zona	47
Cuadro 10. Calificación de las cargas	48
Cuadro 11. Categorización del trafico	49
Cuadro 12. Clasificación de rellenos	49
Cuadro 13. Clasificación de la explanada.....	52
Cuadro 14. Selección capas inferiores	53
Cuadro 15. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Operación	53
Cuadro 16. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Operación ⁽¹⁾	53
Cuadro 17. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Almacenamiento de Graneles.....	54
Cuadro 18. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Almacenamiento de Graneles ⁽¹⁾	54
Cuadro 19. Estructuras de pavimento de mezcla asfáltica – Zonas de Almacenamiento de Graneles	54
Cuadro 20. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Almacenamiento Mercancía	54
Cuadro 21. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Almacenamiento Mercancía	55
Cuadro 22. Estructuras de pavimento de mezcla asfáltica – Zonas de Almacenamiento Mercancía	55
Cuadro 23. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Almacenamiento de Contenedores.....	55
Cuadro 24. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Almacenamiento de Contenedores.....	55

Cuadro 25. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Estacionamiento de semirremolques.....	56
Cuadro 26. Estructuras de pavimento de adoquines – Estacionamiento de semirremolques	56
Cuadro 27. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Estacionamiento	56
Cuadro 28. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Estacionamiento	56
Cuadro 29. Estructuras de pavimento de mezcla asfáltica – Zonas de Estacionamiento..	57
Cuadro 30. Valores de $T_{A/a}$ – Temperatura anual media superior a 13 °C.....	61
Cuadro 31. Dimensiones típicas de dovelas.....	72
Cuadro 32. Espesores utilizados en el análisis por elemento finito.....	74
Cuadro 33. Factor dinámico f_d	75
Cuadro 34. Factor de proximidad	76
Cuadro 35. Factor de conversión de material.....	77
Cuadro 36. Espesor de capas de fundación.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo para el diseño de pavimentos portuarios	2
Figura 2. Zona de almacenamiento de contenedores típica	11
Figura 3. Zona de puertas de acceso	12
Figura 4. Grúas pórtico.....	21
Figura 5. Grúas porta contenedores.....	21
Figura 6. Portal de almacenamiento.....	22
Figura 7. Caretillo pórtico.....	23
Figura 8. Reacciones en ruedas Carretilla pórtico.....	23
Figura 9. Cargador frontal.....	24
Figura 10. Reacciones en ruedas Cargador frontal.....	24
Figura 11. Cargador lateral.....	25
Figura 12. Reacciones en ruedas Cargador lateral.....	26
Figura 13. Grúa móvil.....	27
Figura 14. Reacciones en ruedas grúa móvil.....	27
Figura 15. Semirremolque.....	27
Figura 16. Reacciones en ruedas semirremolques.....	28
Figura 17. Comportamiento resiliente del suelo.....	30
Figura 18. Modelo modulo resiliente para suelos finos	31
Figura 19. Ensayo de tensión indirecta.....	36
Figura 20. Ensayo de flexión en vigas de concreto	38
Figura 21. Clasificación de los adoquines	39
Figura 22. Respuesta de un material viscoelástico.....	41
Figura 23. Ejemplo de curva maestra	42
Figura 24. Grafica correlación frecuencia de carga - Barksdale.....	43
Figura 25. Pasos aplicación de la Guía ROM 4.1	45
Figura 26. Proceso de diseño acorde a MS-23.....	61
Figura 27. Casos de análisis por posición de carga.....	68
Figura 28. Acción de dovela	71
Figura 29. Distribución transversal de carga en dovelas	71
Figura 30. Tipos de restricciones laterales típicas	79
Figura 31. Vigas de concreto en transición de pavimentos.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS ANEXAS

Figura A. 1. Pavimento de concreto vibrado.....	81
Figura A. 2. Pavimento de concreto compactado con rodillo	81
Figura A. 3. Pavimento de concreto armado.....	81
Figura A. 4. Pavimento de concreto armado con fibras	82
Figura A. 5. Pavimento de adoquines.....	82
Figura A. 6. Pavimento asfaltico	82
Figura A. 7. Superficie de grava	82
Figura A. 8. Grafica de diseño. Valores de diseño para $T_{A/a} - 10\ 000$ Repeticiones	83
Figura A. 9. Grafica de diseño. Valores de diseño para $T_{A/a} - 100\ 000$ Repeticiones	84
Figura A. 10. Grafica de diseño. Valores de diseño para $T_{A/a} - 1\ 000\ 000$ Repeticiones ..	85
Figura A. 11. Factores de rueda dual	86
Figura A. 12. Ejemplo de curvas permisible y equivalente para la determinación de T_A ...	87
Figura A. 13. Múltiples ruedas - Factores deflexión de interface.....	88
Figura A. 14. Cuadro ejemplo para determinación de $\Sigma\sqrt{P}$ y P_e	89
Figura A. 15. Ejemplo de curva de relación de P_e versus C	90
Figura A. 16. Ejemplo de solución de múltiples ruedas	91
Figura A. 17. Factor de corrección - Caso placa finita	92
Figura A. 18. Determinación del módulo de reacción combinado K_{∞}	93
Figura A. 19. Grafica de diseño. Carga equivalente simple vs. Espesor de base trata	95

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Propósito del manual

Este manual se aplica en el diseño y construcción de todos los pavimentos portuarios cualquiera que sea su tipo o destino. Se incluyen dentro de los pavimentos portuarios todas las superficies que han de soportar tráfico no restringida y que se encuentran dentro de los límites de una autoridad portuaria. Se ha intentado contemplar todas las opciones de pavimentación posibles en un puerto. Las propuestas están enmarcadas en lo que puede considerarse el estado de la practica a nivel mundial

El manual está orientando preferentemente hacia los pavimentos que se construyen con carácter definitivo, para una vida útil de 15 años o más. Sin embargo, no se excluyen los firmes provisionales, con vidas útiles de hasta 8 años,

1.2. Visión general del procedimiento de diseño

La estructura medular de la guía elaborada para el Diseño de Pavimentos Portuarios en Costa Rica se muestra en la **Figura 1**. La guía se compone de las siguientes secciones:

- **Sección 1:** se define y describe la configuración de equipo, movilización y uso en las zonas definidas para el proyecto en particular. Se describen las cargas de equipos, se parte de una configuración espacial de la terminal, el siguiente paso consiste en definir las cargas y repeticiones.
- **Sección 2:** Se provee una guía para calcular las cargas de diseño y las repeticiones de carga. El pavimento está sujeto tanto a cargas dinámicas de los equipos de movilización de y estáticas provenientes de los propios puntos de apoyo de los contenedores depende del área operacional de la terminal y equipo usado. El siguiente paso consiste en caracterizar la subrasante.
- **Sección 3:** Contempla el proceso de caracterización de materiales, que es esencial para un diseño económico y seguro. Se presentan consideraciones básicas para caracterizar la subrasante del proyecto desde el punto de vista mecánico. El siguiente paso consiste en determinar una estructura preliminar.
- **Sección 4:** La guía provee una sección donde se recomiendan estructuras típicas basadas en la experticia internacional (Puertos del Estado, 1994), en una estructura tipo catálogo. Esto permite realizar un prediseño aproximadamente ajustado a las condiciones de carga y calidad de la subrasante. Permite acortar el consumo de

tiempo en iteraciones a través de las diferentes tipologías y metodologías existentes. El siguiente paso consiste en revisar el diseño preliminar, según haya sido la tipología y materiales seleccionados.

- **Sección 5:** Se presentan los conceptos y metodologías aplicables al diseño de pavimentos asfáltico, de concreto hidráulico o de adoquines. Se revisa la estructura preliminar seleccionada.

Finalmente, una vez definida la estructura de pavimento para el proyecto en cuestión, se procede a establecer el costo o presupuesto asociado.

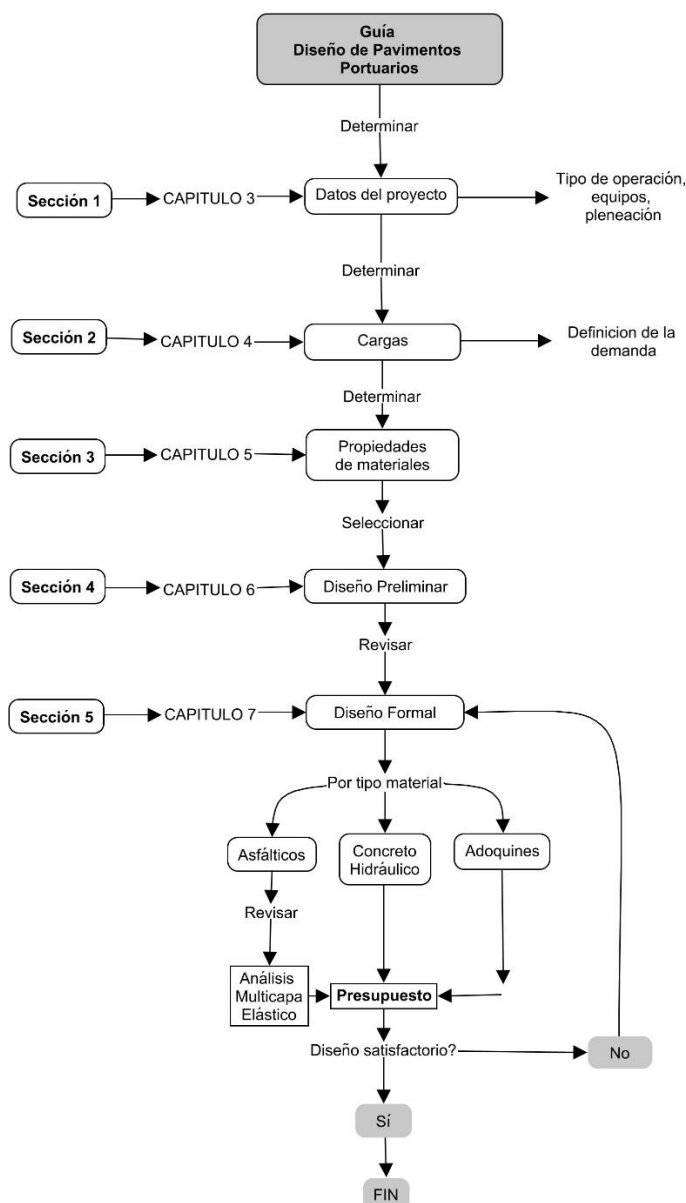


Figura 1. Diagrama de flujo para el diseño de pavimentos portuarios

1.3. Definiciones

Para efectos de esta guía se definen expresamente los términos fundamentales que aplican. No se pretende abarcar la totalidad de definiciones que pueden presentarse en el tema específico de pavimentos portuarios. Se ha utilizado como referencia la exposición realizada en (Puertos del Estado, 1994).

ADOQUÍN: Pieza prefabricada de concreto que puede colocarse a mano para constituir un pavimento.

BASE: Capa de un pavimento que se encuentra inmediatamente bajo el pavimento.

CARGA: Fuerza que genera estados tensionales, esfuerzos o deformaciones en las capas de un pavimento o en el apoyo de este.

CARGA ACCIDENTAL: Carga de carácter fortuito o anormal

CARGA DINÁMICA: Carga cuya actuación genera aceleraciones significativas en la estructura o en elementos estructurales.

CARGA ESTÁTICA: Carga cuya actuación no genera aceleraciones significativas en la estructura o en elementos estructurales, en particular en las capas de un firme.

CARGA DE IMPACTO: Acción que actúa sobre una estructura produciendo en ella una respuesta que alcanza un valor máximo en el momento inicial, reduciéndose con posterioridad hasta la situación de reposo.

CARGA PERMANENTE: Carga que actúa en todo momento.

CARGA VARIABLE: Carga de magnitud y/o posición variable a lo largo del tiempo.

CARGADOR FRONTAL (front lift truck): Equipo de circulación no restringida que se emplea para el traslado de mercancía general y de contenedores.

CARGADOR LATERAL (side loader lift truck): Equipo de circulación no restringida que se emplea para el traslado de contenedores.

CARRETILLA PÓRTICO (straddle carrier): Equipo de circulación no restringida que se emplea para el traslado de mercancía general y de contenedores cuyas ruedas pueden tomar todas las direcciones.

CONTENEDOR: Receptáculo paralelepípedo de dimensiones estandarizadas en cuyo interior se colocan mercancías de tipo general, transportándose íntegramente desde origen a destino.

EJE TÁNDEM: Conjunto de dos ejes de un vehículo que constituyen un sólo apoyo del chasis.

ESTABILIZACIÓN: Proceso que consiste en incorporar a un suelo o a un agregado algún tipo de aditivo (estabilización con aditivos).

PAVIMENTO: Estructura resistente formada por una o varias capas superpuestas sobre una subrasante para soportar el paso de vehículos. Suele estar constituido por la capa de ruedo, la base y la subbase.

PAVIMENTO FLEXIBLE: El que experimenta deflexiones apreciables bajo las cargas del tráfico, como es el caso de los formados por capas granulares y capas asfálticas de pequeño espesor.

PAVIMENTO RÍGIDO: El que no experimenta deflexiones apreciables bajo las cargas del tráfico; habitualmente está formado por un pavimento de concreto.

PAVIMENTO SEMIRRÍGIDO: El que tiene deflexiones intermedias entre los pavimentos flexibles y rígidos.

GRANEL LÍQUIDO: Producto que se manipula en forma líquida.

GRANEL SÓLIDO: Producto sólido en forma de materia suelta que puede ser manipulado de forma continua por medios mecánicos.

GRANEL SÓLIDO PESADO: Granel sólido de alto peso específico.

GRÚA: Equipo de manipulación de mercancías por elevación.

GRÚA PORTACONTENEDORES: Grúa pórtico con una viga lanzadera abatible que tiene capacidad de traslación longitudinal sobre carriles en dirección perpendicular a la pluma e incapacidad de girar sobre un eje vertical.

SUBBASE: Capa de un firme que se encuentra bajo la base.

TEU: Unidad equivalente a un contenedor de 20 pies (Transport Equivalent Unit).

VÍA DE COMUNICACIÓN: Zona destinada exclusivamente al tránsito de mercancías, materiales o suministros desde las zonas de operación hasta las zonas de almacenamiento.

VÍA DE MANIOBRA: Vía de comunicación que une zonas de operación con zonas de almacenamiento.

VÍA DE ACCESO: Vía de comunicación que une zonas de operación o almacenamiento con zonas exteriores a la zona portuaria.

VIDA DE PROYECTO: Período de tiempo que va desde el comienzo de la construcción de la estructura proyectada hasta su inutilización, desmontaje o cambio de uso.

VIDA ÚTIL: Duración de la fase de servicio.

ZONA DE ALMACENAMIENTO: Zona destinada a estancias prolongadas de mercancías.

ZONA DE CIRCULACIÓN NO CANALIZADA: Zona en la que los movimientos de los equipos de manipulación no pueden ser predeterminados.

ZONA DE OPERACIÓN: Zona destinada a la transferencia y manipulación de mercancías, materiales y suministros, en las que no se produce acumulación duradera de éstos.

ZONA COMPLEMENTARIA: Zona excluida del tráfico de mercancías, materiales y suministros.

CAPITULO 2: DOCUMENTOS DE REFERENCIA Y NORMATIVA

Este capítulo incluye una lista de protocolos de ensayo de laboratorio y de campo para los diferentes materiales de pavimentación, así como documentos de referencia recomendados para el uso de esta guía.

2.1. Protocolos y normas de ensayo

De los protocolos mostrados en esta sección, el diseñador debe seleccionar aquellos que considere apliquen y sean necesarios a las condiciones propia del proyecto en cuestión.

2.1.1. *Materiales granulares y suelos*

D448	Especificación estándar para agregado grueso para mezclas de pavimentación bituminosas
D692	Especificación estándar para agregado grueso para mezclas de pavimentación bituminosas
D1073	Especificación estándar para agregado fino para mezclas de pavimentación bituminosas
D2940	Especificación estándar para material agregado calificado para bases o subbases para autopistas o aeropuertos
D546	Método de prueba estándar para el análisis de tamiz de relleno mineral para mezclas de pavimentación bituminosa
D2419	Método de prueba estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino
	Método de prueba estándar para residuos insolubles en agregados de carbonato
D3042	Método de prueba estándar para residuos insolubles en agregados de carbonato
D3319	Práctica estándar para el pulido acelerado de agregados utilizando la rueda británica
D3744	Método de prueba estándar para el índice de durabilidad agregado
D4469	Práctica estándar para calcular el porcentaje de absorción de asfalto por el agregado en una mezcla de pavimento asfáltico
D4791	Método de prueba estándar para partículas planas, partículas alargadas o partículas planas y alargadas en agregado grueso
D5444	Método de prueba estándar para el análisis de tamaño mecánico del agregado extraído
D5821	Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en agregado grueso
D1883	Método de prueba estándar para CBR (California Bearing Ratio) de suelos compactados por laboratorio
D2166	Método de prueba estándar para la resistencia de compresión no confinada del suelo cohesivo
D422	Método de prueba estándar para el análisis de tamaño de partícula de suelos
D698	de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo mediante el esfuerzo estándar (12 400 ft-lbf/ft ³ (600 kN-m/m ³))

- D854 de prueba estándar para la gravedad específica de los sólidos del suelo por el picnómetro de agua
- D1140 de prueba estándar para la cantidad de material en suelos más finos que el tamiz No. 200 (75- μ m)
- D1557 Métodos de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo mediante el esfuerzo modificado (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))

2.1.2. *Materiales mejorados o estabilizados*

- D558 Métodos de prueba estándar para las relaciones humedad-densidad (peso unitario) de las mezclas de suelo y cemento
- D806 Método de prueba estándar para el contenido de cemento de mezclas de cemento y suelo endurecido
- D1632 Práctica estándar para la fabricación y curación de la compresión del suelo-cemento y la flexión de los especímenes de prueba en el laboratorio
- D1633 Métodos de prueba estándar para la resistencia a la compresión de los cilindros de cemento de suelo moldeado

2.1.3. *Concreto hidráulico*

- C29 Método de prueba estándar para la densidad a granel ("peso unitario") y los vacíos en agregado
- C33 Especificación estándar para agregados de concreto
- C40 Método de prueba estándar para impurezas orgánicas en agregados finos para concreto
- C70 Método de prueba estándar para la humedad superficial en agregado fino
- C88 Método de prueba estándar para la solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio
- C117 Método de prueba estándar para materiales más finos que 75- μ m (No. 200) Tamiz en áridos minerales por lavado
- C123 Método de prueba estándar para partículas ligeras en agregado
- C127 Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso
- C128 Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino
- C131 Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación del agregado grueso de pequeño tamaño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles
- C136 Método de prueba estándar para el análisis de tamiz de agregados finos y gruesos
- C142 Método de prueba estándar para bultos de arcilla y partículas friables en agregados
- C535 Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación del agregado grueso de gran tamaño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles
- C566 Método de prueba estándar para el contenido total de humedad evaporable del agregado por secado

C702	Práctica estándar para reducir muestras de agregado a tamaño de prueba
C31	Práctica Estándar para la Fabricación y Curación de Especímenes de Prueba de Concreto en el Campo
C39	Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes de concreto cilíndrico
C42	Método de prueba estándar para la obtención y prueba de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto
C78	Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión del concreto (utilizando viga simple con carga de tercer punto)
C192	Práctica estándar para la fabricación y curación de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio
C293	Método de prueba estándar para la resistencia flexión del concreto (uso de viga simple con carga de punto central)
C469	Método de prueba estándar para el módulo estático de elasticidad y la relación de Poisson de concreto en compresión
C496	Método de prueba estándar para dividir la resistencia a la tracción de especímenes de concreto cilíndrico
C138	Método de prueba estándar para la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) de concreto
C143	Método de prueba estándar para el desplome del concreto hidráulico-cemento
C172	Práctica estándar para el muestreo de concreto recién mezclado
C173	Método de prueba estándar para el contenido de aire de concreto recién mezclado por el método volumétrico
C231	Método de prueba estándar para el contenido de aire de concreto recién mezclado por el método de presión
C1064	Método de prueba estándar para la temperatura del concreto hidráulico-cemento recién mezclado

2.1.4. Mezclas asfálticas en caliente

D6931	Método de prueba estándar para la resistencia de la tracción indirecta (IDT) de mezclas bituminosas
D7369	Método de prueba estándar para determinar el módulo resistente de mezclas bituminosas mediante la prueba de tensión indirecta
D7460	Método de prueba estándar para determinar el fallo de fatiga del concreto asfáltico compactado sometido a flexión repetida
D7552	Método de prueba estándar para determinar el módulo de cizallamiento complejo (G^*) de mezclas bituminosas utilizando un reómetro de cizallamiento dinámico
D1074	Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de mezclas bituminosas
D1560	Métodos de prueba estándar para la resistencia a la deformación y la cohesión de mezclas bituminosas por medios de aparatos Hveem
D5581	Método de prueba estándar para la resistencia al flujo de plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall (muestra de 6 pulgadas de diámetro)
D6925	Método de prueba estándar para la preparación y determinación de la densidad relativa de los especímenes de asfalto de mezcla caliente (HMA) por medios del compactador giratorio Superpave

- D6926 Práctica estándar para la preparación de especímenes bituminosos utilizando el aparato Marshall
- D6927 Método de prueba estándar para la estabilidad Marshall y el flujo de mezclas bituminosas
- D7115 Método de prueba estándar para la medición del compactador giratorio Superpave (SGC) ángulo interno de giro utilizando la carga simulada

2.1.5. *Adoquines de concreto*

- C936 Especificación estándar para unidades de pavimentación de concreto sólido

2.1.6. *Caracterización en sitio*

- D1195 Método de prueba estándar para pruebas de carga de placas estáticas repetitivas de suelos y componentes de pavimento flexibles, para su uso en la evaluación y diseño de pavimentos de aeropuertos y carreteras
- D1196 Método de prueba estándar para pruebas de carga de placas estáticas no competitivas de suelos y componentes de pavimento flexibles, para su uso en la evaluación y diseño de pavimentos de aeropuertos y carreteras
- D4602 Guía estándar para pruebas no destructivas de pavimentos que utilizan equipos de deflexión dinámica de carga cíclica
- D4694 Método de prueba estándar para desviaciones con un dispositivo de carga de impulso de tipo de caída de peso
- D6951 Método de prueba estándar para el uso del penetrómetro de cono dinámico en aplicaciones de pavimento poco profundo
- E2583 Método de prueba estándar para medir desviaciones con un deflectómetro de peso ligero (LWD)
- E2835 Método de prueba estándar para medir desviaciones mediante un dispositivo portátil de prueba de carga de placas de impulso

2.2. **Documentos de referencia**

PIANC. (2015). Design and maintenance of container terminal pavements. Estados Unidos: PIANC.

Puertos del Estado. (1990). ROM 0.2 Recomendaciones generales: Recomendaciones para las acciones de diseño. Madrid, España: Ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente.

Puertos del Estado. (1994). ROM 4.1-94 Proyecto y construcción de pavimentos portuarios. Madrid, España: Ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente de España.

Royal Haskoning. (2010). Paving design for container terminals. United Kingdom: Royal Haskoning.

Nichol, & Moffat. (2010). Operational area consideration for pavement design. Los Angeles, Estados Unidos: The port of Los Angeles.

Knapton, J. (2012). Port and industrial pavement design with concrete pavers: A comprehensive guide. Inglaterra: Interlocking Concrete Pavement Institute.

Lancaster, J., Richards, I., Tighe, S., & Wardle, L. (2007). Heavy duty industrial pavement design guide. Australia: MINCAD.

CAPITULO 3: INFORMACIÓN DEL PROYECTO

3.1. Zonificación para la pavimentación de obras portuarias

Según se lee en el ROM 4.1 (Reglamento de Obras Marítimas de España, 1994), el diseño de pavimentos portuarios requiere de realizar una clasificación de las superficies acorde al uso de estas y posteriormente acorde a la actividad que se va a desarrollar.

Dentro de las terminales se suele distinguir tres zonas en función de las actividades que en ellas se realizan:

1. **Zona de operación:** Donde se realiza el intercambio modal tierra-mar y donde es posible realizar un almacenamiento transitorio de la mercancía.
2. **Zona de almacenamiento:** Soporta las operaciones de transporte, almacenamiento y entrega/recepción los contenedores. Su disposición en planta depende fundamentalmente de la forma de explotar la terminal, y de las características del tráfico portuario de los contenedores. Es fundamental la elección de los equipos de manipulación que se utilicen. La **Figura 2** muestra un ejemplo de zona de almacenamiento real:



Figura 2. Zona de almacenamiento de contenedores típica
Fuente: Tomado de (Nichol & Moffat, 2010)

3. **Zona de servicio:** Donde se ubican las dependencias del personal, parqueos, talleres, etc.
4. **Zona de puertas de acceso a camiones:** Se utilizan para obtener información respecto a la entrada y salida de camiones con contenedores. Un ejemplo se muestra en la **Figura 3:**



Figura 3. Zona de puertas de acceso
Fuente: Tomado de (Nichol & Moffat, 2010)

El **Cuadro 1** resume de manera general la clasificación aplicable a las diferentes zonas dentro de una misma superficie portuaria.

3.2. EQUIPOS DE MANIPULACIÓN

La consideración de los equipos de manipulación que se van a utilizar en la explotación portuaria requiere el conocimiento de sus características:

- Peso total de cada equipo.
- Carga máxima que puede manipular.
- Número de ruedas y carga por rueda.
- Presión de inflado.
- Carga transmitida al pavimento.
- Sistema de giro.
- Velocidad media de circulación.
- Forma de realizar la operación.

3.3. CARACTERÍSTICAS DEL RELLENO

Definir el tipo de relleno utilizado, así como las características de la subrasante sobre los que se apoya, son necesarios para elegir el pavimento y, en particular, para decidir sobre el eventual empleo de capas de base y/o subbase.

3.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES DISPONIBLES

Se debe elegir entre unos u otros materiales, atendiendo tanto a su disponibilidad como a su coste, conduce en última instancia a la solución estructural de proyecto.

3.5. VIDA ÚTIL

El concepto de vida útil empleado en puertos equivale al concepto de período de proyecto tal como se emplea en el diseño de pavimentos para carreteras. La vida útil del pavimento portuario va unida a la propia concepción del desarrollo de un puerto. Determina el número de operaciones que el pavimento debe soportar sin que deba ser dejado fuera de servicio. La vida útil de un firme portuario definitivo se establece entre 15 y 25 años.

Cuadro 1. Usos de las superficies portuarias

Usos	Zonas	Situaciones
		Por rodadura
		Por elevación
COMERCIAL	OPERACIÓN	Por rodadura y elevación
Graneles líquidos		Por sistemas continuos
Graneles sólidos ordinarios		Deposito
Graneles sólidos pesados		Circulación de equipos de
Mercancía general convencional	ALMACENAMIENTO	movilidad no restringida
Mercancía general pesada		Circulación de equipos de
Mercancía general unificada		movilidad restringida
• Contenedores	VÍAS DE COMUNICACIÓN	Vías de maniobra
• Semirremolques		Viales de acceso
Otros tráficos	COMPLEMENTARIAS	estacionamiento
INDUSTRIAL	Análogo a uso comercial para mercancía general pesada	
MILITAR	Análogo a uso comercial para mercancía general convencional	
	OPERACIÓN	Clasificación y preparación
	CLASIFICACIÓN,	Depósitos
	PREPARACIÓN Y VENTA	
PESQUERO	VÍAS DE COMUNICACIÓN	Vías de acceso
		Vías de maniobra
	COMPLEMENTARIAS	Circulación
		Estacionamiento
DEPORTIVO O DE	OPERACIÓN O VARADA	Grandes embarcaciones
RECREO		Pequeñas embarcaciones
	COMPLEMENTARIAS	Circulación
		Estacionamiento

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

CAPITULO 4: CARGAS

Para cada una de las zonas definidas dentro de las terminales de operaciones portuarias se definen diferentes clasificaciones de cargas actuantes. Las cargas se clasifican en primer lugar por el efecto sobre el pavimento y en segundo lugar por la intensidad de uso con que se aplican durante la vida útil de cada estructura de pavimento.

4.1. Cargas de estacionamiento o almacenamiento

En (Puertos del Estado, 1994), se definen como cargas de naturaleza variable, debidas fundamentalmente al peso de mercancías almacenadas o apiladas, ya sea directamente sobre la superficie o en el interior de elementos auxiliares para su transporte y manipulación.

El valor de la acción se determina teniendo en cuenta el uso previsto para la superficie, la zona de esta en que actúa y la forma en que solicita al firme, tomando en consideración los siguientes factores:

- Naturaleza de la mercancía depositada o apilada, con sus características físicas como pueden ser en su caso el peso específico y el ángulo de rozamiento interno.
- Forma de presentación de la mercancía (mercancía general, graneles sólidos, contenedores, semirremolques, etc.).
- Forma y dimensiones de los acopios y apilamientos.
- Cantidad máxima que puede manipularse.
- Métodos y equipos de manipulación.

Estas cargas se consideran verticales, repartidas o concentradas según la naturaleza de los materiales apilados o almacenados y su forma de actuación o apoyo; son cargas cuya actuación no supone aceleraciones significativas en los firmes. A los efectos del dimensionamiento de éstos, se consideran cargas repartidas las debidas al almacenamiento de graneles sólidos y, salvo algunos casos, de mercancía general; por el contrario, se consideran como concentradas las cargas aplicadas por contenedores y semirremolques, así como también las debidas a productos manufacturados apoyados sobre durmientes.

4.2. Cargas de almacenamiento de graneles solidos

Se considera el máximo peso de los materiales por unidad de superficie, transitoriamente estacionados en la zona de operación o almacenados en la zona de almacenamiento en las condiciones de acopio previstas.

Para cada material el esfuerzo unitario se determina como:

$$Q_{v1} = \gamma * H_a \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

γ : peso unitario del material almacenado, en kN/m³.

H_a : altura máxima de almacenamiento o estacionamiento, en m.

A falta de criterios específicos de proyecto o de explotación se tomarán las siguientes presiones de contacto de almacenamiento de graneles sólidos:

En zonas de operación:

- Graneles sólidos ordinarios: 0.04 MPa
- Graneles sólidos pesados: 0.07 MPa

En zonas de almacenamiento o estacionamiento:

- Graneles sólidos ordinarios: 0.08 MPa
- Graneles sólidos pesados: 0.15 MPa

Por último, hay que señalar, que todas estas sobrecargas fijas de almacenamiento o estacionamiento serán únicamente aplicables a la fase de servicio del pavimento que se esté considerando en cada momento.

4.3. Cargas de almacenamiento de mercancía general

Se considera el máximo peso de las mercancías por unidad de superficie, transitoriamente estacionadas en la zona de operación o almacenadas en la zona de almacenamiento en las condiciones de estiba previstas. Estas cargas son las que hay que tener en cuenta no sólo en las correspondientes zonas de uso comercial (mercancía general pesada o convencional) sino también, a falta de criterios específicos de proyecto, en las de uso industrial (mercancía general pesada) y de uso militar (mercancía general convencional).

Para cada material el esfuerzo unitario se determina según la Ecuación 1.

Por otro lado, debe considerarse que pueden presentarse cargas concentradas producidas por productos manufacturados (productos siderúrgicos, prefabricados de concreto, etc.) apoyados sobre durmientes, con presiones de contacto de hasta 2.5 MPa. A falta de criterios específicos de proyecto o de explotación se tomarán las siguientes cargas y presiones de contacto de almacenamiento de mercancía general:

En zonas de operación:

- Mercancía general convencional: 400 kN y 0.8 MPa
- Mercancía general pesada: 900 kN y 1.8 MPa

En zonas de almacenamiento o estacionamiento:

- Mercancía general convencional: 700 kN y 1.5 MPa
- Mercancía general pesada: 1200 kN y 2.0 MPa

Por último, hay que señalar, que todas estas sobrecargas fijas de almacenamiento o estacionamiento serán únicamente aplicables a la fase de servicio del pavimento que se esté considerando en cada momento.

4.4. Cargas en zonas de almacenamiento de contenedores

Las cargas de los contenedores se transmiten al firme por elementos de apoyo de 0,178 x 0,162 m² situados en las esquinas, los cuales sobresalen de su cara inferior 0,0125 m y son empleados para aislar del suelo la mercancía y facilitar su manipulación.

En ocasiones, cuando existen apilamientos de varios contenedores en altura y sobre todo cuando se apoyan sobre una superficie flexible, se pueden producir contactos con el pavimento en otros puntos distintos de las esquinas, llamados puntos de descarga (esta situación no se da sin embargo en el caso de los contenedores frigoríficos, puesto que los largueros inferiores son más rígidos).

La unidad de medida en el transporte de los contenedores es el TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) o contenedor equivalente de 20 pies de longitud.

Las dimensiones exteriores del contenedor normalizado de 20 pies (6.1 m) son: 20 pies (6.1 m) de largo por 8 pies (2.4 m) de ancho por 8,5 pies (2.6 m) de altura. Su volumen exterior es de 1.360 pies cúbicos equivalentes a 38.51 metros cúbicos. Su capacidad es de 1165,4 pies cúbicos equivalentes a 33 metros cúbicos. Existe una carencia de estandarización en términos de alto, que va desde 4 pies y 3 pulgadas (1,30 m) a 9 pies y 6 pulgadas (2,90 m), siendo la altura más frecuente la de 8 pies y 6 pulgadas (2,59 m).²

Los más habituales actualmente son los que tienen 20 pies (1 TEU) y 40 pies (2 TEU). Existen también contenedores de 10 pies (0.5 TEU) y de 30 pies (1.5 TEU) y están comenzando a utilizarse los de 50 pies (2.5 TEU). El TEU también se utiliza como unidad de medida del transporte de cajas móviles sobre semirremolques.

Las cargas totales de los contenedores son muy variables. Para un contenedor de 20 pies la carga máxima es de unos 200 kN, pero se puede estimar que la carga media no supera los 130 kN. Por su parte, para un contenedor de 40 pies la carga máxima es de unos 300 kN, pudiéndose estimar una carga media no superior a 200 kN.

Las presiones de contacto sobre el pavimento dependen de la carga, de la forma de almacenar los contenedores (aislados, en fila simple o en fila múltiple o bloque), de las alturas empleadas (de una a cinco alturas generalmente, aunque puede sobrepasar esta

última altura), de la flexibilidad o rigidez del propio pavimento y de que se produzcan o no los citados puntos de descarga.

A falta de datos específicos fijados en el proyecto o por criterios de explotación portuaria, las cargas a considerar para el dimensionamiento de los firmes en las zonas de almacenamiento de contenedores serían las correspondientes a almacenamientos de 40 pies en bloque y en cinco alturas: 1524 kN aplicados en un área de 0,356 x 0,324 m² (lo que supone una presión sobre el pavimento de 13,2 MPa), aunque una situación muy común es la de almacenamiento en un máximo de 3 alturas (la carga en cada apoyo interior del bloque sería entonces de 914 kN y la presión de 7,9 MPa). (Puertos del Estado, 1994)

Las formas de almacenamiento (distribución en planta y alturas) dependen directamente de criterios logísticos y de explotación de la instalación y de los equipos de manipulación empleados. A falta de criterios específicos en el **Cuadro 2** se indican las distribuciones y alturas máximas a considerar según los equipos de manipulación que se empleen. En el caso de filas o bloques, la separación o distancia libre entre dos contenedores contiguos puede variar entre ser prácticamente nula (lo que ocurre normalmente cuando se trata de contenedores vacíos) a ser de 0,40 o 0,80 m para permitir la lectura de los códigos que llevan escritos en los laterales (lo que ocurre normalmente cuando se trata de contenedores llenos).

Cuadro 2. Alturas máximas de apilamiento

Equipo de manipulación	Forma de distribución	Altura máxima Nº. Contenedores
Cargador frontal	Filas simples o dobles	4
Cargador lateral	Filas simples o dobles	4
Carretilla pórtico	Filas simples	3
Grúa automóvil	Bloque pequeño	4
Transtainer (Luz media, < 30 m)	Bloque mediano	4
Transtainer (Luz grande, > 30 m)	Bloque grande	5

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

La probabilidad de que todos los contenedores estén totalmente cargados en altura es en principio relativamente pequeño y depende de los criterios específicos de explotación de la instalación. Por esta razón, para la estimación de las cargas aplicadas algunos autores proponen la introducción de coeficientes reductores de peso según la altura de almacenamiento (hasta el 40 % para apilamientos en 5 alturas). Sin embargo, hay sistemas

de explotación en los cuales los contenedores se agrupan por su carga, con lo cual pueden darse apilamientos de cinco contenedores totalmente cargados.

El **Cuadro 3** presenta una referencia de cargas puntuales y esfuerzos transmitidos al pavimento para el caso de apilamiento de contenedores para diferentes arreglos de almacenamiento.

Cuadro 3. Cargas en el pavimento por apilamiento de contenedores

Altura apilamiento	Reducción peso bruto	Presión de contacto (MPa)			
			Simple	Filas	Bloques
1	0	2.59	76.2	152.4	68.6
2	10%	4.67	137.2	274.3	548.6
3	20%	6.23	182.9	365.8	731.5
4	30%	7.27	213.4	426.7	853.4
5	40%	7.78	228.6	457.7	914.4
6	40%	9.33	274.3	548.6	1097.0
7	40%	10.9	320.0	640.0	1280.0
8	40%	12.5	365.8	731.6	1463.2

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

4.5. Cargas de estacionamiento de semirremolques

Una forma habitual de explotación portuaria es el almacenamiento sobre semirremolques (mercancía general movilizada en contenedores o en cajas móviles; a veces, sobre cajas abiertas, elementos de gran volumen como, por ejemplo, bobinas), que quedan de esta forma aparcados a la espera de que la cabeza tractora los traslade. Los ejes traseros de estos semirremolques (simples, tándem o trídem) no producen especiales deterioros en los firmes, ya que cumplen las condiciones para circular por carretera. Sin embargo, los distintos dispositivos de que van provistos estos semirremolques para apoyarse en el suelo en su parte delantera cuando se encuentran desenganchados del tractor pueden producir importantes deterioros. Según dicho dispositivo los semirremolques se clasifican en tres tipos:

- Los provistos en su parte delantera de dos parejas de ruedas metálicas de 0.088 m de anchura y 0.225 m de diámetro cada una de ellas; con el semirremolque a plena carga (cargas de 140 kN en su parte delantera) pueden dar presiones de contacto de hasta 40 MPa, con una superficie de contacto teórica de 0.088 x 0.010 m².

- Los que disponen para el apoyo delantero de dos placas metálicas de 0.225×0.150 m², que producen una presión de contacto del orden de 2 MPa para una carga total de 140 kN en la parte delantera.
- Los que tienen un aparato de apoyo delantero consistente en una vigueta con una superficie de apoyo de 0.130×2.145 m², que produce una presión de contacto sobre el pavimento de 0.5 MPa para cargas de 140 kN en la parte delantera.

En suma, y salvo en el último de los tipos descritos, se producen unas elevadas presiones de contacto. Aunque éstas pueden resultar menores en el caso de superficies de apoyo relativamente deformables, no resultan aconsejables determinados pavimentos, como por ejemplo los de mezcla bituminosa, en los que con tiempo caluroso los apoyos se incrustarían incluso varios centímetros. Sin embargo, existe la posibilidad de pavimentar de manera diferenciada una franja (con concreto, adoquines, etc.) en la que se situarían los apoyos delanteros, pavimentando todo el resto de la zona como las zonas complementarias de estacionamiento (y siendo posible así la pavimentación con mezclas bituminosas salvo en dichas franjas). A falta de datos o de criterios específicos fijados en el proyecto o en la explotación de la instalación se considerarán para el dimensionamiento de los firmes en zonas de estacionamiento de semirremolques las siguientes cargas y presiones: 70 kN y 40 MPa, respectivamente.

Estas cargas de estacionamiento de semirremolques hay que tenerlas en cuenta no sólo en las correspondientes zonas de uso comercial sino también en las de uso militar.

4.6. Cargas de los equipos e instalaciones de manipulación de mercancías

Son las cargas de naturaleza variable transmitidas al pavimento por los sistemas y equipos de manipulación de mercancías, materiales o suministros.

El proyectista debe considerar de acuerdo con los criterios preestablecidos de planificación portuaria y los específicos del cliente o de la autoridad portuaria, las características de los equipos de manipulación de mercancías que operan en la zona, su ubicación y la forma en que solicitan al pavimento. El diseñador debe disponer de todos los datos relativos a los equipos concretos de manipulación que van a operar en la zona, los cuales deben ser suministrados por los fabricantes de dichos equipos.

A los efectos de cómo se transmiten las cargas y de la influencia en el dimensionamiento de los firmes, los equipos de manipulación se pueden clasificar en función de su movilidad:

- equipos de circulación restringida, sobre carriles o sobre vigas carril.
- equipos de circulación no restringida, sobre neumáticos o sobre orugas.

En el **Cuadro 4** se da un resumen de las características fundamentales de los distintos equipos de manipulación a efectos de dimensionamiento de los pavimentos.

Se debe considerar que posibles situaciones en las que puedan producirse cargas máximas por punto de apoyo o máximas presiones de contacto superiores a las indicadas (1100 kN y 2.6 MPa, respectivamente) requieren un análisis especial.

Por otro lado, la existencia de esfuerzos horizontales importantes (por giros, aceleraciones y frenadas, etc.) no se considera a los efectos del dimensionamiento estructural de los pavimentos, pero sí debe tenerse en cuenta al establecer las características superficiales que deben tener los pavimentos.

Cuadro 4. Cargas y presiones

Equipo de manipulación	Carga máxima por punto de apoyo (kN)	Máxima presión de contacto (MPa)
Pórtico de almacenamiento	450	1.1
Carretilla pórtico	130	1.1
Cargador frontal de 5 ton	30	0.8
Cargador frontal de 20 ton	110	0.7
Cargador frontal de 40 ton	220	0.6
Cargador lateral	230	0.6
Grúa automóvil de 10 ton	150	0.4
Grúa automóvil de 30 ton	400	0.9
Grúa automóvil de 50 ton	550	1.3
Grúa automóvil de 70 ton	750	1.8
Grúa automóvil de 140 ton	1100	2.6
Tractor más semirremolque de 40 ton	35	2.2
Tractor más semirremolque de 80 ton	70	2.2

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

4.6.1. Grúas pórtico (*portal cranes*)

Estos equipos son las grúas de muelle: se encuentran en la zona de operaciones y se dedican a la transferencia de las mercancías entre los modos terrestre y marítimo. Pueden trabajar con gancho para mercancía general (y excepcionalmente para contenedores) o con cuchara para graneles. Son giratorias y se pueden desplazar paralelamente al cantil. Su circulación es restringida sobre carriles que a su vez se disponen sobre vigas o sobre

pilotes. Por esta razón, las cargas que transmiten no actúan sobre los pavimentos. La **Figura 4** muestra un ejemplo de este tipo de gruas:



Figura 4. Grúas pórtico.

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

4.6.2. Grúas porta contenedores (portainers)

Son equipos especializados en el movimiento de contenedores entre los diferentes modos de transporte y están también situados en la zona de operaciones. Disponen de una pluma abatible formando un largo voladizo. No son giratorias, el carretón se mueve perpendicularmente al cantil y pueden desplazarse a lo largo del muelle como las grúas pórtico. Son también de circulación restringida sobre carriles cimentados en la forma descrita en el apartado anterior. La **Figura 5** muestra un ejemplo de este tipo de equipo:



Figura 5. Grúas porta contenedores.

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

4.6.3. Pórticos de almacenamiento (*transtainers*)

Se dedican a la manipulación de contenedores en las zonas de almacenamiento de estos, incluso en 5 alturas en el caso de los pórticos con luces superiores a 30 m. Se desplazan sobre neumáticos o sobre carriles. Pueden resultar especialmente dañinos, pues transmiten cargas del orden de 450 kN por rueda y presiones de contacto de 1.1 MPa. Sin embargo, tienen circulación restringida a caminos de rodadura preestablecidos, diseñados normalmente en forma de viga; incluso, debido a que en la intersección de dos vigas es donde se producen los giros de los que llevan neumáticos, se suelen colocar en estos puntos planchas de acero con unas dimensiones de 1.5 x 1.5 m² en planta y 0.020 m de espesor. En resumen, el camino de rodadura debe ser sobre viga flotante, consiguiéndose así que el dimensionamiento de los firmes pueda independizarse de las características de estos equipos. La **Figura 6** esquemática este tipo de equipo:

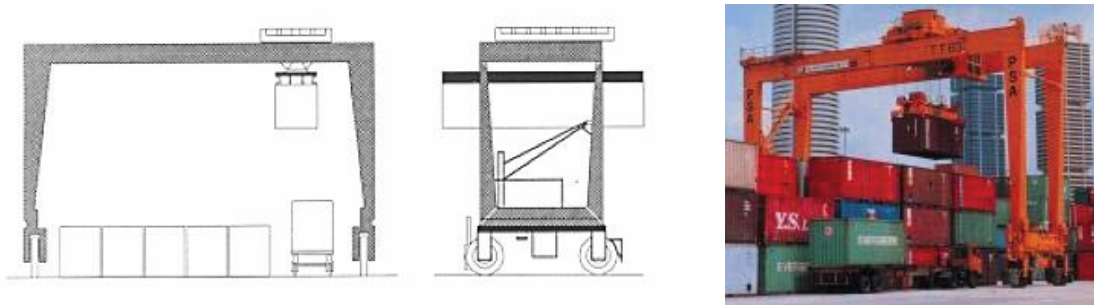


Figura 6. Portal de almacenamiento.
Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

4.6.4. Carretillas pórtico (*straddle carriers*)

Son vehículos cargadores que circulan sin restricciones por toda la zona de maniobra y almacenamiento, destinados a la manipulación de contenedores, admitiendo almacenamientos incluso en 3 alturas. Sus ruedas pueden tomar todas las direcciones posibles, con lo que al girar ángulos rectos en muy cortos recorridos o incluso parados los grandes esfuerzos horizontales que se producen pueden causar deterioros importantes al pavimento. En el peor de los casos alcanzan hasta 260 kN por par de ruedas gemelas y presiones de contacto de hasta 1.1 MPa. La **Figura 7** esquemática este tipo de equipo:

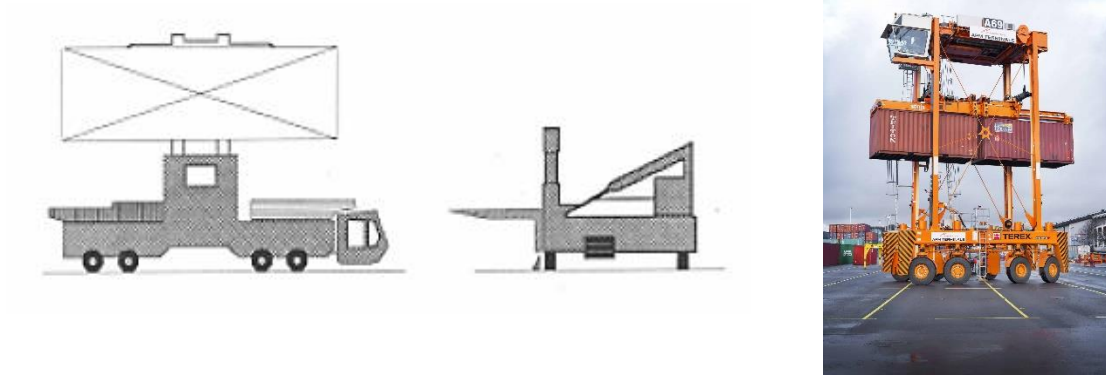


Figura 7. Caretillo pórtico.

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

La estimación de las cargas de rueda para este tipo de equipo se realiza empleando el esquema mostrado en la **Figura 8**:

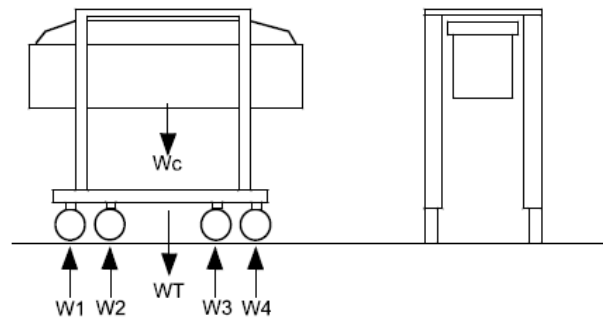


Figura 8. Reacciones en ruedas Carretilla pórtico.

Fuente: Modificado de (Knapp, 2012)

$$W_i = U_i + \frac{W_c}{M}$$

Ecuación 2

Donde:

W_i = Carga por rueda (kN)

U_i = Carga por rueda equipos descargado (kN)

W_c = Peso contenedor (kN)

M = Numero de ruedas

4.6.5. Cargadores frontales (front lift trucks)

También de circulación no restringida, son los vehículos más agresivos frente al pavimento de cuantos se utilizan en la explotación portuaria. Se emplean para manipular contenedores, admitiendo almacenamientos incluso en 4 alturas, y también para mercancía general, en cuyo caso son mucho más pequeños y menos potentes. Todos tienen ruedas gemelas en el eje frontal y ruedas simples en el eje posterior. Entre los que se dedican a la manipulación de contenedores hay dos grandes grupos: los que sólo manejan contenedores de 20 pies y los que pueden manejar contenedores de 40 pies.

En este último caso, pueden llegar a cargar sobre el eje delantero hasta 720 kN, lo que implica una carga por rueda de 120 kN. Esta carga puede llegar hasta 150 kN en el caso de que el vehículo esté dotado de una pluma telescópica. En el caso del cargador frontal de horquilla (forklift) se llegan a aplicar incluso cargas de 220 kN por rueda al manejar contenedores de 40 pies con presiones de contacto de 0.6 MPa. La **Figura 9** esquemática este tipo de equipo:



Figura 9. Cargador frontal.

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

La estimación de las cargas de rueda para este tipo de equipo se realiza empleando el esquema mostrado en la **Figura 10**:

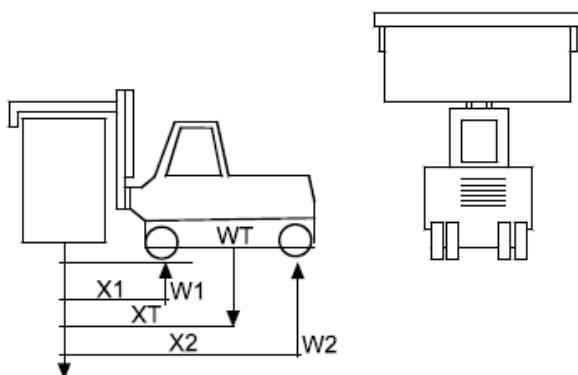


Figura 10. Reacciones en ruedas Cargador frontal.

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

$$W_1 = \frac{A_1 \cdot W_c + B_1}{M} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$W_2 = \frac{A_2 \cdot W_c + B_2}{2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

W_1 = Carga en la rueda frontal (kN)

W_2 = Carga en la rueda trasera (kN)

W_c = Peso contenedor (kN)

M = Numero de llanas en el eje frontal (2,4 o 6)

A_1, A_2, B_3 y B_4 =

$$A_1 = \frac{-X_2}{X_1 - X_2} \quad A_2 = \frac{X_1}{X_2 - X_1} \quad B_1 = \frac{W_T(X_T - X_2)}{X_1 - X_2} \quad B_2 = \frac{W_T(X_T - X_1)}{X_2 - X_1}$$

4.6.6. Cargadores laterales (side loader lift trucks)

Son vehículos de circulación no restringida, empleados a veces en la manipulación de mercancía general, pero sobre todo en la de contenedores, admitiendo almacenamientos incluso de 4 alturas. La situación más dañina con estos vehículos no se produce en marcha, sino en el momento de cargar o descargar, ya que se apoyan en unos gatos estabilizadores que soportan entre el 70 y el 95 % del peso conjunto del vehículo y del contenedor. El número de gatos varía entre 2 para las máquinas pequeñas y 4 para las grandes que manejan contenedores de 40 pies. En estos últimos las presiones de contacto máximas pueden llegar a 0.6 MPa, siendo la carga de 230 kN sobre cada apoyo. La **Figura 11** esquemática este tipo de equipo:

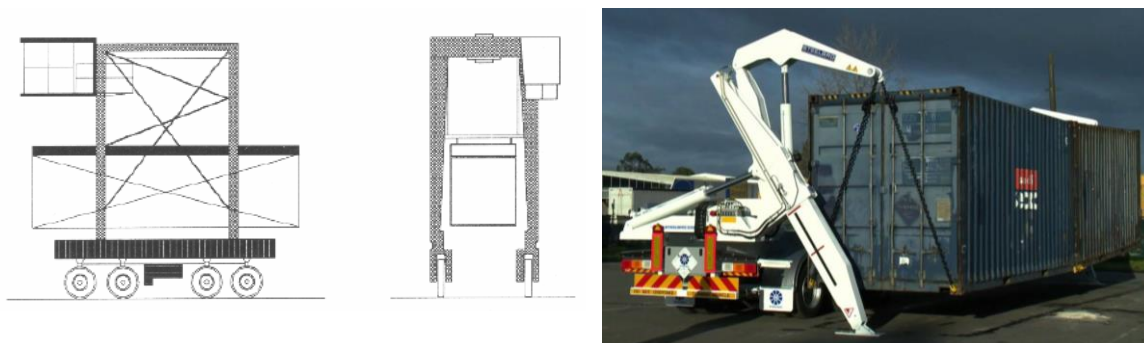


Figura 11. Cargador lateral.

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

La estimación de las cargas de rueda para este tipo de equipo se realiza empleando el esquema mostrado en la **Figura 12**:

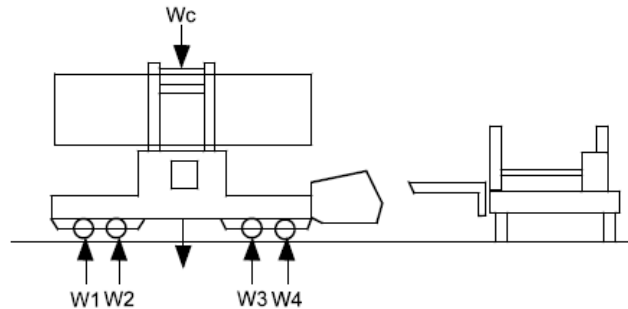


Figura 12. Reacciones en ruedas Cargador lateral.

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

$$W_i = U_i + \frac{W_c}{M}$$

Ecuación 5

Donde:

W_i = Carga por rueda (kN)

U_i = Carga por rueda equipos descargado (kN)

W_c = Peso contenedor (kN)

M = Numero de ruedas

4.6.7. Grúas móviles (*mobile cranes*)

Se utilizan fundamentalmente en la manipulación de mercancía general. Cuando manipulan contenedores admiten almacenamientos incluso de 4 alturas. Tienen capacidades de elevación que van, con radios cortos, de 10 a 140 t, aunque las longitudes de pluma pueden llegar a los 12 m o incluso algo más. Las peores condiciones de trabajo se producen operando lateralmente o hacia atrás sobre gatos estabilizadores. En esas circunstancias, en las grúas de 140 t la carga sobre cada apoyo es de 1100 kN con una presión de 2,6 MPa. La **Figura 13** esquemática este tipo de equipo:

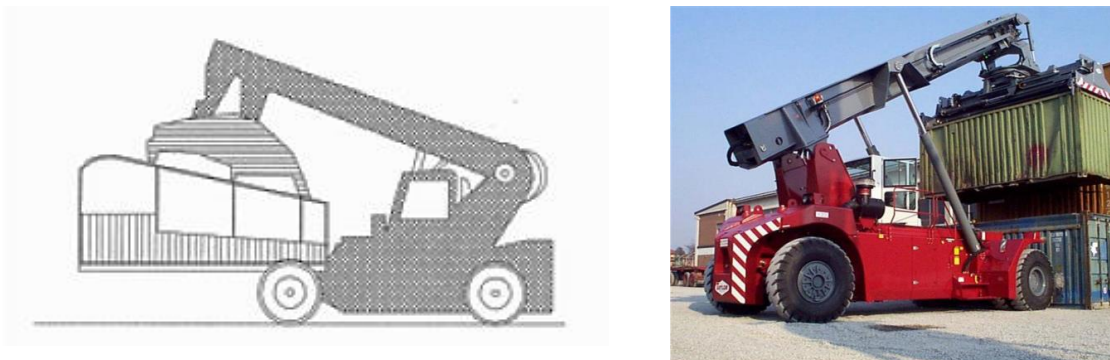


Figura 13. Grúa móvil.

Fuente: Modificado de (*Puertos del Estado, 1994*)

La estimación de las cargas de rueda para este tipo de equipo se realiza empleando el esquema mostrado en la **Figura 14**:

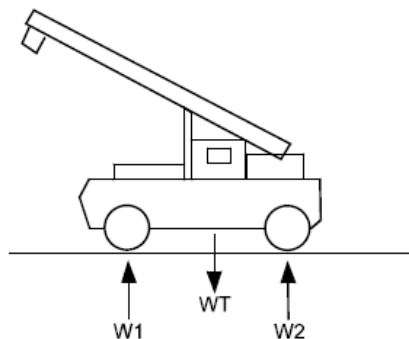


Figura 14. Reacciones en ruedas grúa móvil.

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

4.6.8. Semirremolques

Se emplean tanto para el traslado como para el almacenamiento (en este caso desenganchando el tractor) de mercancía general y de contenedores. La **Figura 15** esquemática este tipo de equipo:



Figura 15. Semirremolque.

Fuente: Modificado de (*Puertos del Estado, 1994*)

La estimación de las cargas de rueda para este tipo de equipo se realiza empleando el esquema mostrado en la **Figura 16**:

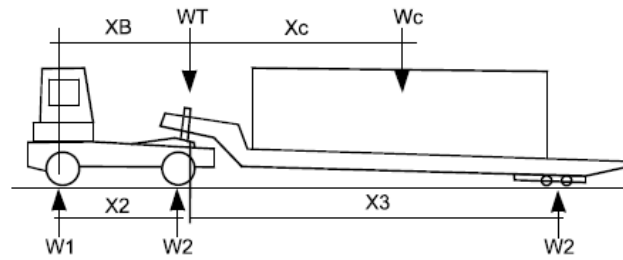


Figura 16. Reacciones en ruedas semirremolques.

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

$$W_1 = U_1 + \frac{W_c \cdot 1 - A \cdot 1 - B}{M_1} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$W_2 = U_2 + \frac{W_c \cdot 1 - A \cdot B}{M_2} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$W_3 = U_3 + \frac{W_c \cdot A}{M_3} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

W_1 = Carga por rueda eje frontal (kN)

W_2 = Carga por rueda eje trasero camión (kN)

W_3 = Carga por rueda eje trasero carreta (kN)

U_i = Pesos equipos descargado (kN)

W_c = Peso contenedor (kN)

M_i = Numero de ruedas

3.5.1.1. Cargas de tráfico pesado convencional

El tráfico pesado convencional es el que puede circular sin restricciones por las redes de carreteras. En los puertos este tráfico se puede dar en todas las zonas, pero es el característico de los viales de acceso; así mismo ha de ser tenido en cuenta en el dimensionamiento de los pavimentos de las zonas complementarias.

Según las características de los neumáticos las presiones máximas de contacto varían de 0.6 a 0.9 MPa aproximadamente, aunque por efectos dinámicos pueden llegar a alcanzarse presiones de 1.5 MPa.

CAPITULO 5: DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE PAVIMENTACIÓN

Este capítulo tiene como objetivo presentar brevemente los conceptos relacionados a los parámetros mecánicos que son requeridos para el análisis y/o diseño de pavimentos portuarios. Se trata de una exposición somera, que presenta los métodos para la obtención de los parámetros de entrada, así como correlaciones clásicas aplicables para aquellos proyectos en los cuales no se cuenta con el presupuesto para realizar una campaña de caracterización avanzada de materiales.

5.1. Subrasante

En función del tipo y la magnitud de las solicitaciones, las repeticiones de carga acumuladas, las características asociadas al clima y la localización de las diferentes capas de material; el comportamiento esfuerzo - deformación de un suelo puede ser de dos tipos: resiliente y plástico. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora. La **Figura 17** ilustra el mecanismo de acumulación de deformación permanente:

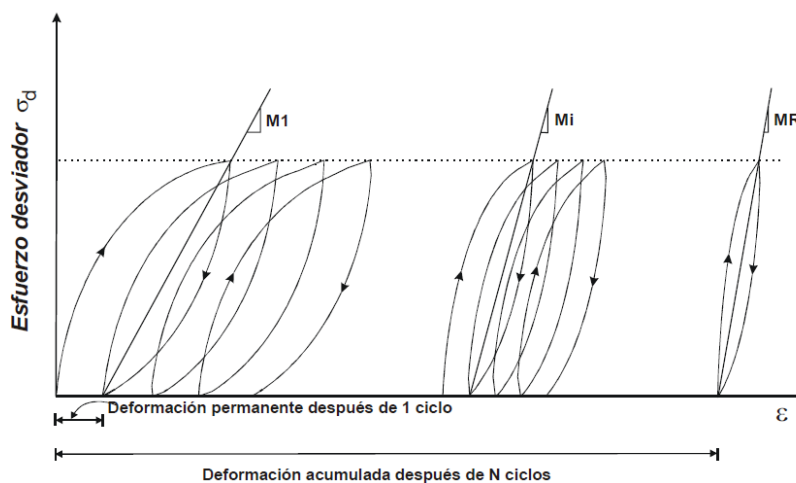


Figura 17. Comportamiento resiliente del suelo

Fuente: Tomado de (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

El módulo de resiliencia de suelos finos decrece con el incremento en el esfuerzo desviador σ_d . En el laboratorio $\sigma_2 = \sigma_3$, por lo tanto, el esfuerzo desviador se puede definir como:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Ecuación 9}$$

La **Figura 17** muestra la relación general entre módulo de resiliencia y esfuerzo desviador para suelos finos obtenidos en pruebas de laboratorio en carga repetida:

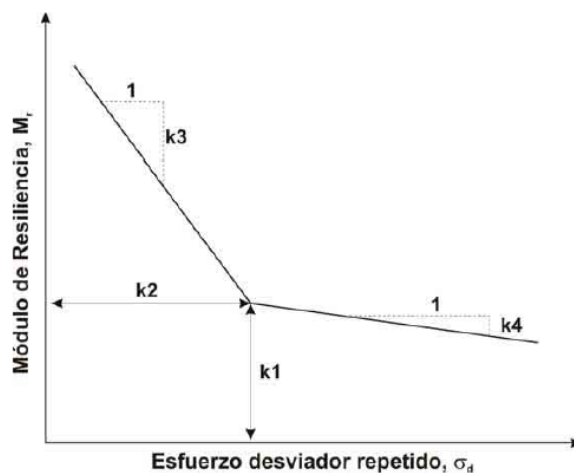


Figura 18. Modelo modulo resiliente para suelos finos

Fuente: Tomado de (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Cuando $\sigma_d < K_2$, se tiene que:

$$M_r = K_1 + K_3(K_2 - \sigma_d) \quad \text{Ecuación 10}$$

Cuando $\sigma_d > K_2$, se tiene que:

$$M_r = K_1 + K_4(\sigma_d - K_2) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde K_1 , K_2 , K_3 y K_4 son constantes del material.

El **Cuadro 5** muestra algunos valores típicos de parámetros para el modelo descrito anteriormente, así como valores mínimos y máximos de acuerdo con la consistencia del suelo:

Cuadro 5. Valores típicos de los parámetros K y módulo de resiliencia

Consistencia	K₁ (kPa)	K₂ (kPa)	K₃	K₄	M_{Rmax}	M_{Rmin}
Muy blanda	6900	43	1110	0	39000	6900
Blanda	21000	43	1110	178	53000	12600
Media	53000	43	1110	178	85000	32500
Rígida	85000	43	1110	178	117000	52500

Fuente: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Considerando que en la mayoría de los casos para el diseño de pavimentos no se cuenta con ensayos específicos de módulo de resiliencia, se han desarrollado investigaciones tendientes a establecer correlaciones entre éste y otras características como el valor CBR y el valor de resistencia R.

Se han reportado correlaciones entre el California Bearing Ratio (CBR) y el módulo de resiliencia (usando pruebas de compactación dinámica). La correlación está dada por la siguiente relación:

$$M_R (\text{psi}) = 1500 * \text{CBR} \quad \text{Ecuación 12}$$

Esta correlación es razonable para suelos finos con un CBR menor de 10 (condición saturada).

Otra característica importante en la modelación del suelo de subrasante es el módulo de balasto o módulo de reacción (rigidez de la cama de resortes). La modelación del suelo de fundación se efectúa utilizando una fundación Winkler, esta considera que el suelo de fundación se representa por un conjunto de resortes sin interacción entre ellos, por lo que la fundación se deflecta proporcionalmente a la carga aplicada, sin que se produzcan esfuerzos de corte en las áreas adyacentes. La constante de proporcionalidad entre la deflexión y la fuerza aplicada es el valor K (Murúa, 2020).

La determinación de este parámetro se realiza mediante la ejecución del Ensayo de Placa de Carga. Alternativamente puede estimarse a través de correlaciones con ensayos de suelo rutinarios y/o a través de las características físicas del suelo.

Existen dos tipos de ensayos de placa de carga: ensayos con cargas estáticas repetitivas (AASHTO T221) y ensayos con cargas estáticas no repetitivas (AASHTO T222). El valor K se determina como la razón entre la carga y la deformación elástica, se define como la razón entre la carga y deformación para una deformación de 1,25 mm (0,05”).

$$K = p / \delta$$

Ecuación 13

Donde:

K = módulo de reacción

p = presión unitaria aplicada por medio de placa rígida,

δ = deflexión correspondiente

En caso de no contarse con ensayos de placa, se puede utilizar la siguiente correlación (Murúa, 2020).:

$$\begin{aligned} K &= 2,55 + 52,5 * \log(\text{CBR})^{4,34} && \text{si } \text{CBR} < 10 \\ K &= 46 + 9,08 * [\log(\text{CBR})]^4 && \text{si } \text{CBR} \geq 10 \end{aligned}$$

Ecuación 14

Donde:

K = Módulo de reacción de la subrasante (MPa/m)

CBR = Índice soporte california (%)

Considerando la complejidad y los altos presupuestos que se destina en la ejecución de obras portuarias, es recomendable la inversión de un porcentaje adecuado del presupuesto en la caracterización de los materiales nativos existentes. Dentro de los ensayos que se podrían contemplar en la campaña geotecnia se podrían nombrar:

1. ASTM D1586: Ensayo de penetración estándar (SPT, por sus siglas en ingles).
2. ASTM D6067: Ensayo de penetración con cono (CPT, por sus siglas en ingles).
3. ASTM D4719: Ensayo con presurómetro en perforaciones pre excavadas.
4. AASHTO T307: Ensayo para determinar el módulo resiliente de suelos y materiales granulares

Estos ensayos permiten tener un mejor acercamiento al comportamiento real de los geo materiales en sitio, así como una caracterización mecanicista que no dependa únicamente de parámetros correlacionados de valores de CBR.

5.2. Materiales de base y subbase

Un material granular sujeto a carga cíclica, experimenta una deformación cuya magnitud es función de varios factores, como el nivel de la carga aplicada, área de contacto, condiciones de confinamiento, características del propio material, etc. La deformación total, tiene dos componentes: una definida como deformación recuperable o elástica, la cual es medible una vez que la carga deja de actuar sobre el material; la otra componente, denominada deformación permanente, se define como “la deformación vertical no recuperable (plástica) que experimenta un material de espesor definido, en cada ciclo de carga aplicado” (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002). Este tipo de comportamiento se aprecia en la **Figura 17**.

Existe una relación simple entre módulo de resiliencia y la suma de esfuerzos principales que puede expresarse como:

$$M_R = K_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde K_1 y K_2 son obtenidas experimentalmente y θ es la suma de los esfuerzos principales, el cual puede ser:

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad \text{Ecuación 16}$$

Se ha propuesto un modelo que considera los efectos del esfuerzo de constante en los materiales granulares, el cual se define de la siguiente manera:

$$M_R = K_a \left(\frac{\theta}{P_o} \right)^{k_b} \left(\frac{\sigma_d}{P_o} \right)^{k_c} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

P_o = Unida de presión de referencia

K_a , K_b , K_c = Constantes de regresión

El **Cuadro 6** muestra algunos valores típicos de parámetros para el modelo descrito anteriormente, así como valores mínimos y máximos de acuerdo con la consistencia del suelo:

Cuadro 6. Valores típicos de los parámetros K

Tipo de material	K ₁ (MPa)		K ₂	
	Media	Desviación Estándar	Media	Desviación Estándar
Arena limosa	11.17	0.54	0.62	0.13
Grava arenosa	30.89	29.56	0.53	0.17
Arena-grava	30.00	18.13	0.59	0.13
Roca triturada	49.70	51.64	0.45	0.23

Fuente: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

En caso de que para el proyecto en específico no se cuente con ensayos específicos para la determinación del módulo resiliente de los materiales granulares (base y subbase), existe abundante bibliografía que presenta correlaciones con ensayos típicos. Se presentan a continuación en el **Cuadro 7** rangos de valores típicos para el módulo de resiliencia:

Cuadro 7. Valores típicos de módulo de resiliencia para materiales granulares

Clasificación AASHTO	Descripción	SUCS	Y _d (kN/m ³)	CBR (%)	Valor K (MPa/m)	M _R (MPa)
Suelos de grano grueso						
A-1-a Bien graduado	Grava	GW, GP	19.6-	60-80	81.44-	70.37-
A-1-a Mal graduado			22.0		122.16	140.74
A-1-a Mal graduado	Arena gruesa	SW	18.9-	35-60	81.44-	70.37-
A-1-b			20.4		108.58	140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3-	20-40	54.29-	42.23-
A-3			20.4		108.58	105.55
A-3	Arena fina	SP	16.5-	15-25	40.72-	35.18-
			18.9		81.44	14.07
Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje de finos)						
A-2-4 Gravosa	Grava limosa	GM	20.4-	40 - 80	81.44-	70.37-
A-2-5 Gravosa	Grava areno limosa		22.8		135.73	211.11
A-2-4 Arenosa	Arena limosa	SM	18.9-	20 - 40	81.44-	70.37-
A-2-5 Arenosa	Arena liosa con grava		21.2		108.58	140.74
A-2-6 Gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9-	20 - 40	54.29-	56.29-
A-2-7 Gravosa	Grava arcillosa con arena		22.0		122.16	140.74
A-2-6 Arenosa	Arena arcillosa	SC	16.5-	10 - 20	40.72-	35.18-
A-2-7 Arenosa	Arena arcillosa con grava		20.4		95.00	105.55

Fuente: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Adicionalmente en el siguiente **Cuadro 8**, se presentan correlaciones en función del CBR o del valor R:

Cuadro 8. Correlaciones para modulo resiliente para materiales granulares

θ (kPa)	Correlación (CBR o valor R)	
690	$740 \cdot \text{CBR}$	$1000 + 780 \cdot R$
207	$440 \cdot \text{CBR}$	$1100 + 450 \cdot R$
138	$340 \cdot \text{CBR}$	$1000 + 350 \cdot R$
69	$250 \cdot \text{CBR}$	$1000 + 250 \cdot R$

Fuente: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

5.3. Materiales estabilizados

Existen varios medios para mejorar la condición de un suelo que ha de ser utilizado para en este tipo de construcciones. La información expuesta en esta sección se refiere a procedimientos químicos (estabilizaciones):

- Cal
- Cemento Portland
- Ceniza Volante (Fly Ash)
- Asfaltos
- Otros

Similar a los estudios hechos en suelos cohesivos y granulares, existe una gran variedad de dispositivos que son utilizados para la medición del módulo de resiliencia en suelos estabilizados. Una manera de estimar el módulo resiliente en materiales estabilizados químicamente es usando el ensayo de tensión indirecta, el cual se esquematiza en la **Figura 19**:

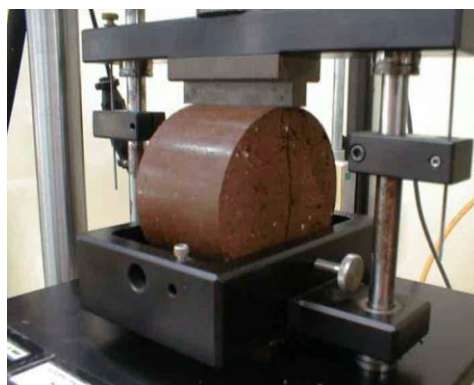
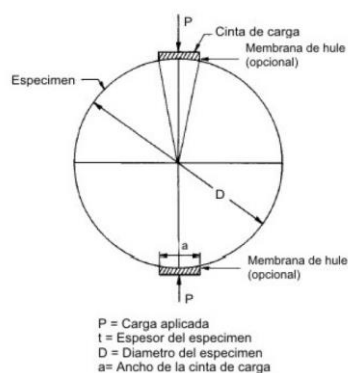


Figura 19. Ensayo de tensión indirecta

Fuente: Tomado de (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

El módulo de resiliencia y la relación de Poisson se calculan de la siguiente manera:

$$E_R = \frac{P(v_R + 0.27)}{t\Delta H_I} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$v_R = \frac{3.59\Delta H_I}{\Delta V_I} - 0.27 \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde,

E_R = Modulo de resiliencia, MPa

v_R = Relación de Poisson

P = Carga repetida

t = Espesor del espécimen, mm

ΔH_I = Deformación horizontal recuperable, mm

ΔV_I = formación vertical recuperable, mm

A nivel de investigaciones se han obtenido correlaciones que permiten estimar el valor de modulo resiliente para materiales estabilizados químicamente. La primera correlación es entre el módulo de resiliencia (M_R) y el CBR (California Bearing Ratio):

$$M_R \text{ (MPa)} = 112 + 3.04 \cdot \text{CBR} \quad \text{Ecuación 20}$$

Una segunda correlación es la establecida entre el M_R y la resistencia la compresión no confinada (UCS):

$$M_R \text{ (MPa)} = 102 + 233 \cdot \text{UCS} \quad \text{Ecuación 21}$$

5.4. Concreto hidráulico

El parámetro principal para efectos de diseño de pavimentos rígidos es el módulo de ruptura (M_R) del concreto, también conocido como resistencia a la flexión, es un indicador de la resistencia a la tensión y puede ser definido como el esfuerzo máximo a tensión para que ocurra la ruptura durante un ensayo de flexión de una viga de concreto simplemente apoyada. El M_R tiene un profundo efecto sobre el potencial de agrietamiento por fatiga de las losas de concreto para cualquier magnitud dada de esfuerzo repetido a la flexión o tensión. El procedimiento de prueba recomendado para obtener el M_R es el método de prueba estándar para la resistencia a la flexión del concreto ASTM C78 que utiliza la viga simple y carga al tercio medio.

La **Figura 20** muestra el esquema de ensayo en flexión con apoyo en los tercios medios de la viga:

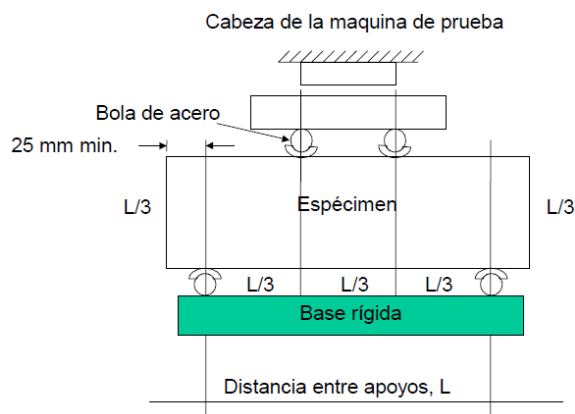


Figura 20. Ensayo de flexión en vigas de concreto
Fuente: Tomado de (*Garnica Aguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002*)

La resistencia máxima a la flexión (módulo de ruptura) se calcula con la fórmula para la flexión de la viga simple con carga en el tercio medio, cuando el espécimen se rompe entre los dos puntos interiores de carga (tercio medio de la viga):

$$MR \text{ (MPa)} = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Si la viga falla fuera de estos puntos por no más de 5% de la distancia entre los apoyos (L):

$$MR \text{ (MPa)} = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

MR = Resistencia a la flexión, MPa

P = Carga máxima aplicada, MPa

L = Distancia entre los apoyos del espécimen, mm

b = Ancho del espécimen, mm

d = Altura del espécimen, mm

El módulo de elasticidad o módulo de Young (E) de cualquier material es una medida del comportamiento esfuerzo-deformación del material. En el análisis mecanicista de pavimentos, el módulo de elasticidad del concreto tiene un fuerte efecto sobre la deflexión

del pavimento y los esfuerzos en toda la estructura de pavimento. El procedimiento recomendado para obtener E se establece en la norma ASTM C469.

En la práctica, el ensayo de mayor aplicación es la falla en compresión de cilindros de concreto. Por esta razón, existen correlaciones que permiten estimar tanto el módulo de ruptura como el módulo de elasticidad del concreto.

Para el caso de estimar el valor de MR, se recomienda la aplicación del modelo de la American Concrete Institute (ACI):

$$MR = 0.62 (f'c)^{0.5} \text{ (MPa)} \quad \text{Ecuación 24}$$

Para el caso de estimar el módulo de elasticidad, se recomienda emplear la correlación presentada por American Concrete Institute (ACI):

$$E = 0.043 \rho^{3/2} (f'c)^{0.5} \text{ (GPa)} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

f'_c = Resistencia a la compresión medida en cilindros de 15 cm x 30 cm, a los 28 días de edad, en MPa

ρ = Peso unitario del concreto fresco, kg/m³

5.5. Adoquines de concreto

Según (Echaveguren, 2013), los adoquines se clasifican internacionalmente como tipo A, B y C. La **Figura 21** ilustra los tipos de adoquines:

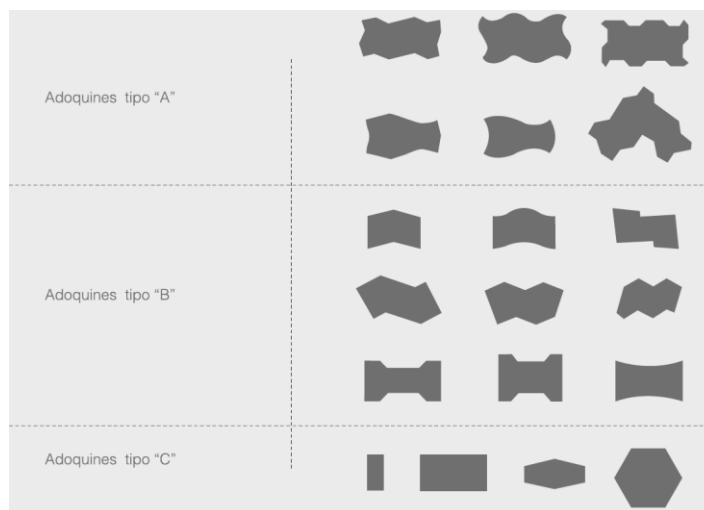


Figura 21. Clasificación de los adoquines
Fuente: Tomado de (Echaveguren, 2013)

Los adoquines tipo "A" corresponden a unidades dentadas que se traban unas con otras proporcionando las mejores condiciones de inter-trabazón ante la aplicación de fuerzas verticales y horizontales. Los adoquines tipo "B" ofrecen una menor inter-trabazón y permiten un mejor desempeño ante desplazamientos paralelos a unos de sus ejes. Los adoquines tipo "C", en tanto, tienen formas regulares en sus caras y no ofrecen una inter-trabazón favorable para resistir movimientos longitudinales o rotacionales.

En la norma ASTM C936 Especificaciones estándar para unidades solidas de concreto para pavimento (Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units) se proporcionan requisitos físicos que deben cumplir los adoquines, específicamente:

- Dimensiones: la tolerancia de ancho y largo debe ser ± 2 mm y para el espesor debe ser de ± 3 mm.
- Resistencia: para proyectos donde las exigencias de carga sean importantes se recomienda que la resistencia individual sea de 50 MPa y que la resistencia promedio de la muestra sea superior a 55 MPa. No obstante, en proyectos con menor sollicitación o con fines ornamentales pueden aceptarse resistencias en un rango comprendido entre los 40 MPa y 50 MPa.
- Absorción: la absorción promedio debe ser inferior al 5 % e individualmente inferior al 7%.
- Resistencia a la abrasión: para proyectos donde las exigencias de carga sean importantes se recomienda que la resistencia individual sea de 50 MPa y que la resistencia promedio de la muestra sea superior a 55 MPa. No obstante, en proyectos con menor sollicitación o con fines ornamentales pueden aceptarse resistencias en un rango comprendido entre los 40 MPa y 50 MPa.
- Resistencia ciclos de hielo y deshielo: cada pieza no debe perder más del 1% de masa seca después de 50 ciclos de hielo y deshielo.

5.6. Mezcla Asfáltica en Caliente

En términos generales, la mezcla asfáltica en caliente presenta un comportamiento visco elástico, esto significa que sus propiedades dependen de la temperatura y de la velocidad de aplicación de la carga.

El módulo dinámico se refiere al valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal (Leiva, 2014). E^* es el módulo viscoelástico del material, el valor absoluto del módulo

complejo $[E^*]$, por definición es el módulo dinámico. Esta propiedad es determinada mediante los procedimientos ASTM D3496 y D3497, AASTHO TP62.

Acorde a (Leiva, 2014), para materiales con comportamiento viscoelásticos lineales como las mezclas asfálticas, la relación esfuerzo deformación bajo una carga sinusoidal continua, es definida como el módulo complejo dinámico (E^*). La **Figura 22** presenta la respuesta de un material viscoelástico, observe el desfase existente entre esfuerzo y deformación:

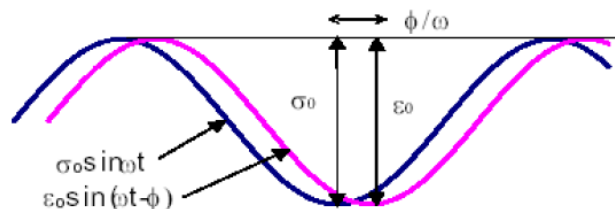


Figura 22. Respuesta de un material viscoelástico
Fuente: Tomado de (Leiva, 2014)

La definición matemática del módulo complejo se muestra a continuación:

$$E^* = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\epsilon_0 \sin(\omega t - \phi)} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

σ_0 = esfuerzo pico (máximo)

ϵ_0 = deformación unitaria pico (máxima)

ϕ = ángulo de fase (grados)

ω = velocidad angular

t = tiempo, segundos

A partir de los resultados obtenidos de un ensayo de laboratorio para modulo dinámico, se puede construir la curva maestra, que modela el comportamiento del valor de modulo dinámico para una determinada temperatura y frecuencia de aplicación de carga.

“Para la construcción de curvas maestras se utiliza el principio de superposición de tiempo - temperatura. Se aplica un factor o una constante de cambio con respecto al logaritmo del tiempo para obtener una curva suavizada.” (Leiva, 2014)

Una curva maestra de rigidez puede ser expresada matemáticamente por una función sinusoidal descrita como

$$\text{Log} |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}}$$

Ecuación 27

Donde:

t_r = tiempo de carga a la temperatura de referencia

δ = mínimo valor de E^*

$\delta + \alpha$ = máximo valor de E^*

β, γ = parámetros que describen la función sinusoidal

α = variable que es función de la graduación

La **Figura 23** muestra un ejemplo de curva maestra obtenida mediante la técnica de superposición tiempo temperatura:

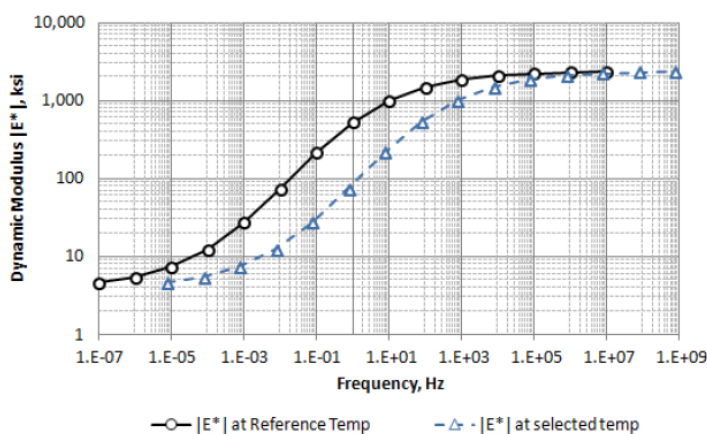


Figura 23. Ejemplo de curva maestra
Fuente: Tomado de (Leiva, 2014)

En términos generales, el módulo dinámico puede ser realizado por medición directa en laboratorio o mediante correlaciones o modelos calibrados en laboratorio.

La siguiente expresión representa el modelo de Witsack, el cual es uno de los más difundidos en la práctica (Leiva, 2014):

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932 \rho_{200} - 0.001767 (\rho_{200})^2 - 0.002841 \rho_4 - 0.058097 V_a - 0.802208 \left(\frac{V_{bef}}{V_{bef} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021 \rho_4 + 0.003958 \rho_{38} - 0.000017 \rho_{38}^2 + 0.005470 \rho_{34}}{1 + e^{(-0.003313 - 0.313351 \log(f) - 0.393562 \log(\pi))}}$$

Ecuación 28

Donde:

$|E^*|$ = módulo dinámico, psi

n = viscosidad del ligante, 10^6 poise

f = frecuencia de carga, Hz

V_a = contenido de vacíos %

V_{bef} = contenido de asfalto efectivo, % por volumen

P_{34} = % retenido acumulado en la maya 3/4" (19 mm)

P_{38} = % retenido acumulado en la maya 3/8" (9 mm)

P_4 = % retenido acumulado en la maya #4 (4.75 mm)

P_{200} = % pasando la maya #200 (0.075 mm)

Finalmente, en términos prácticos la velocidad de aplicación de carga debe ser transformada a un valor de frecuencia, en caso de emplear el concepto de modulo dinámico. La duración del pulso de carga depende del tipo de carga que se asuma (sinusoidal o triangular), de la velocidad del tránsito esperado y la profundidad de la carpeta asfáltica. Es posible utilizar una correlación entre el tipo de carga, la profundidad, la velocidad del vehículo y la duración del pulso de carga, la frecuencia de carga se obtiene como el inverso del tiempo de carga. La **Figura 24** muestra la gráfica de correlación propuesta por Barksdale (Huang, 2004):

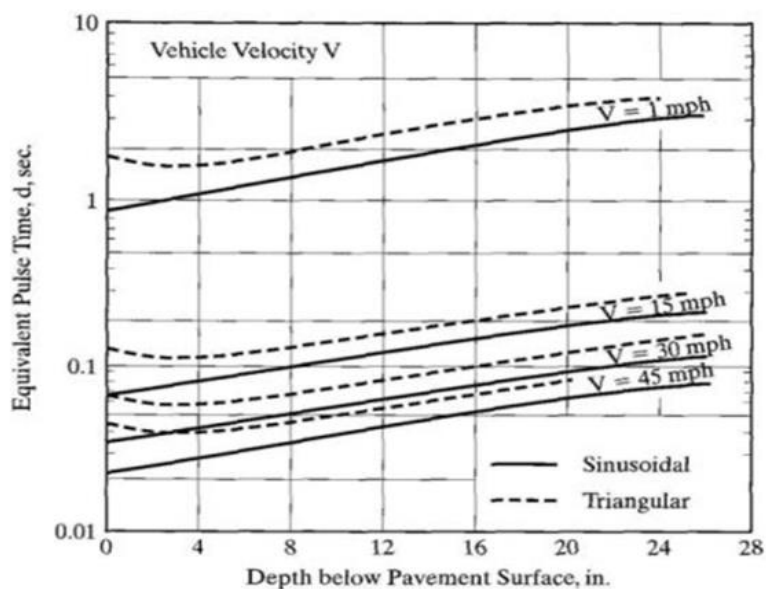


Figura 24. Grafica correlación frecuencia de carga - *Barksdale*
Fuente: Tomado de (Leiva, 2014)

La siguiente expresión, correlaciona el tiempo de aplicación de carga usando un pulso de carga sigmoidal:

$$\text{Log}(t) = -0.95 * \text{Log}(v) + 0.0207 * h - 0.087$$

Ecuación 29

Donde:

v: velocidad (mph)

h: Espesor de capa (in)

CAPITULO 6: DISEÑO PRELIMINAR DEL PAVIMENTO

Si se cuenta con información general del tipo de uso de la terminal, tipos de cargas, materiales y es posible realizar un dimensionamiento denominado por “catálogo”, según se determina en (Puertos del Estado, 1994). Esta metodología puede ser empleada inclusive en caso de no contar con información específica respecto al tráfico, materiales o uso. Se presenta en este capítulo las consideraciones necesarias para emplear esta metodología, la cual se basa en la ROM 4.1-94 Proyecto y construcción de pavimentos portuarios (Puertos del Estado, 1994), la cual expone una metodología de diseño de pavimento por catálogo.

6.1. Metodología de la Guía ROM 4.1-94 Proyecto y construcción de pavimentos portuarios

En términos generales, se puede establecer que la metodología planteada en la Guía ROM 4.1-94 para el diseño de pavimentos portuarios consiste en la aplicación de ocho pasos generales, según se describe a continuación en la **Figura 25**:

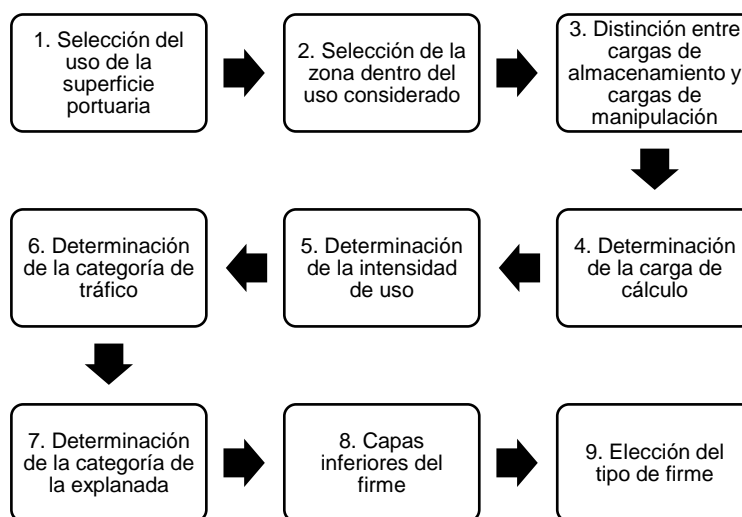


Figura 25. Pasos aplicación de la Guía ROM 4.1

6.2. Índice de intensidad de uso

El índice de intensidad de uso se refiere al número de veces que durante la vida útil se aplican unas determinadas cargas en una superficie y representa además la mayor o menor importancia de esa superficie en relación con la explotación portuaria y, por tanto, la mayor o menor incidencia en esta explotación de los deterioros que se pudieran producir en un

firme (Puertos del Estado, 1994). Se clasifican como Reducidas, Medias o Elevadas. Ante la ausencia de datos se recomienda usar MEDIA.

Los índices de intensidad se establecen acorde al tipo de zona en estudio, en la Guía ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994), se identifican de la siguiente manera:

I. Zona de operación

Mercancías y materiales manipulados por rodadura por unidad de longitud de atraque en el año medio de la vida útil: $I_{1.1}$ (t/m).

Ante la ausencia de datos precisos, este valor se puede obtener multiplicando las mercancías totales (embarcadas más desembarcadas) por factor tal que:

- Rodadura 1,00
- Elevación 0,30
- Rodadura y elevación 0.70
- Continuos 0,10

Si no se cuenta con información relacionada a la explotación portuaria, se asume que la manipulación se lleva a cabo por rodadura.

II. Zonas de almacenamiento de graneles sólidos

Materiales almacenados por unidad de superficie en la zona en el año medio de la vida útil: $I_{1.2}$ (t/m²).

III. Zonas de almacenamiento de mercancía general

Mercancías almacenadas por unidad de superficie en la zona en el año medio de la vida útil: $I_{1.3}$ (t/m²).

IV. Zonas de almacenamiento de contenedores

Contenedores manipulados por unidad de superficie en la zona en el año medio de la vida útil: $I_{1.4}$ (TEU/m²).

V. Zonas de estacionamiento de semirremolques

Contenedores y cajas móviles trasladados en semirremolques por unidad de superficie en la zona en el año medio de la vida útil: $I_{1.5}$ (TEU/m²). Si los índices de explotación en estas zonas sólo se pudiesen estimar en toneladas de carga transportada y no se cuenta con las equivalencias, se adoptará la siguiente: 10 t = 1 TEU. El **Cuadro 9** muestra la calificación de índice de intensidad:

Cuadro 9. Calificación del índice de intensidad (I) en función de la zona

	Calificación del Índice de Intensidad, I		
	Reducida	Media	Elevada
Zona operación $I_{1.1}$ (t/m)	$I_{1.1} < 300$	$300 \leq I_{1.1} \leq 3000$	$I_{1.1} > 3000$
Zona almacenamiento			
Graneles sólidos $I_{1.2}$ (t/m²)	$I_{1.2} < 3$	$6 \leq I_{1.2} \leq 60$	$I_{1.2} > 60$
Mercancía General $I_{1.3}$ (t/m²)	$I_{1.3} < 2$	$2 \leq I_{1.3} \leq 20$	$I_{1.3} > 20$
Contenedores $I_{1.4}$ (TEU/m²)	$I_{1.4} < 0.2$	$0.2 \leq I_{1.4} \leq 2$	$I_{1.4} > 2$
Semirremolque $I_{1.5}$ (TEU/m² o t/m²)	$I_{1.5} < 0.2$ ó $I_{1.5} < 2$	$0.2 \leq I_{1.5} \leq 2$ ó $2 \leq I_{1.5} \leq 20$	$I_{1.5} > 2$ ó $I_{1.5} > 20$
Vías de comunicación	Intensidad de uso más alta entre las zonas que comunica la vía		
Vías de acceso	Intensidad media diaria de vehículos pesados		
Zona complementaria			
Circulación	Intensidad media diaria de vehículos pesados		
Estacionamiento	Menos de 10 sitios	Entre 10 y 100 sitios	Mas de 100 sitios

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

6.3. Caracterización de las cargas

En la Guía ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994) es necesario calificar la magnitud de las cargas, con el fin de posteriormente realizar una relación carga-intensidad. Las cargas deben ser calificadas como bajas, medias o altas para las diferentes situaciones posibles.

6.3.1. Zona de operación

I. Carga de cálculo de almacenamiento

Cuando no se dispone de datos, se considerará ALTA considerando o previendo futuros cambios en la explotación, así como considerar el impacto de las cargas (Puertos del Estado, 1994). Cuando se cuenta con datos relativamente precisos, se pueden clasificar las cargas en términos de carga Q_v y presiones p_v que se transmiten al pavimento en cada caso:

- Baja: $Q_v < 120$ kN y $p_v < 0,7$ MPa, simultáneamente.
- Media: 120 kN $\leq Q_v \leq 500$ kN o bien $0,7$ MPa $\leq p_v \leq 1,0$ MPa.
- Alta: $Q_v > 500$ kN y $p_v > 1,0$ MPa, simultáneamente.

II. Carga de cálculo de manipulación

Depende de los equipos previstos y por tanto de las cargas Q_v y presiones p_v que transmiten al pavimento en cada punto de apoyo (Puertos del Estado, 1994):

- Baja: $Q_v < 120$ kN y $p_v < 1,1$ MPa

- Media: $120 \text{ kN} \leq Q_v \leq 700 \text{ kN}$ o bien $1,1 \text{ MPa} \leq p_v \leq 1,5 \text{ MPa}$
- Alta: $Q_v > 700 \text{ kN}$ y $p_v > 1,5 \text{ MPa}$

6.3.2. Zona de almacenamiento de graneles solidos

I. Carga de cálculo de almacenamiento

Depende de las presiones de contacto p_v producidas con la altura máxima de almacenamiento:

- Baja: $0,15 \text{ MPa} > p_v$
- Media: $0,15 \text{ MPa} \leq p_v$

A falta de datos precisos, se recomienda considerar una carga BAJA en el caso de graneles sólidos ordinarios y una carga MEDIA en el de los graneles sólidos pesados.

II. Carga de cálculo de manipulación

Depende de los equipos que se empleen y por tanto de las cargas Q_v y presiones p_v que se transmiten al pavimento en cada punto de apoyo:

- Baja: $Q_v < 120 \text{ kN}$ y $p_v < 1,1 \text{ MPa}$
- Media: $120 \text{ kN} \leq Q_v$ o $1,1 \text{ MPa} \leq p_v$

En el **Cuadro 10** se presenta resumen de la categorización de cargas aplicable:

Cuadro 10. Calificación de las cargas

	Cargas equipos manipulación	Carga almacenamiento
Zona almacenamiento		
Baja	$Q_v < 120 \text{ kN}$ y $P_v < 1,1 \text{ MPa}$	$Q_v < 120 \text{ kN}$ y $p_v < 0,7 \text{ MPa}$
Media	$120 \text{ kN} < Q_v < 700 \text{ kN}$ ó $1,1 \text{ MPa} \leq P_v \leq 1,5 \text{ MPa}$	$120 \text{ kN} \leq Q_v \leq 500 \text{ kN}$ ó $0,7 \text{ MPa} \leq p_v \leq 1,0 \text{ MPa}$
Alta	$Q_v > 700 \text{ kN}$ y $P_v > 1,5 \text{ MPa}$	$Q_v > 500 \text{ kN}$ y $p_v > 1,0 \text{ MPa}$
Zona complementaria		
Baja	$Q_v < 120 \text{ kN}$ y $P_v < 1,1 \text{ MPa}$	$Q_v < 100 \text{ kN}$ y $p_v < 4 \text{ MPa}$ Hasta 2 alturas
Media	$120 \text{ kN} < Q_v < 700 \text{ kN}$ ó $1,1 \text{ MPa} \leq P_v \leq 1,5 \text{ MPa}$	$100 \text{ kN} \leq Q_v \leq 1200 \text{ kN}$ ó $4 \text{ MPa} \leq p_v \leq 10 \text{ MPa}$ 3-4 alturas
Alta	$Q_v > 700 \text{ kN}$ y $P_v > 1,5 \text{ MPa}$	$Q_v > 1200 \text{ kN}$ y $p_v > 10 \text{ MPa}$

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

6.4. Categoría del tráfico

La metodología expuesta en ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994), utiliza los valores definidos como intensidad de uso y magnitud de la carga, según se define en la sección 6.2 y 6.3 respectivamente, para definir una categoría de tráfico acorde a:

- Tráfico muy pesado: A
- Tráfico pesado: B
- Tráfico medio: C
- Tráfico ligero: D

La categorización se realiza utilizando la matriz mostrada en el **Cuadro 11**:

Cuadro 11. Categorización del tráfico

Intensidad de uso	Caracterización de la carga		
	Baja	Media	Alta
Reducida	D	C	B
Media	D	B	A
Elevada	C	B	A

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

6.5. Características del Relleno (Subrasante) y Explanada (Coronación)

En el método expuesto por ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994), se categorizan el o los materiales que servirán como cimiento de la estructura de pavimento. Las terminales portuarias pueden ser construidas sobre rellenos hidráulicos (materiales recuperados del fondo marino) o rellenos de vertido directo (materiales terrestres acarreados). El **Cuadro 12** presenta los criterios de clasificación de rellenos portuarios:

Cuadro 12. Clasificación de rellenos

Tipo de relleno	Clasificación
Hidráulicos	Contenido de finos menor del 10 %
	Contenido de finos entre el 10 y el 35 %
	Contenido de finos mayor del 35 %
De vertido directo	Con materiales terrestres
	• Rellenos granulares
	• Rellenos cohesivos
	• Pedraplenes limpios
	• Pedraplenes sucios
	Antrópicos y no convencionales

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Los conceptos principales relacionados a los materiales de relleno y explanación se presentan a continuación:

Relleno hidráulico: Son los rellenos que construyen mediante un proceso de sedimentación de partículas sólidas suspendidas en un material que procede de un dragado. Dicha suspensión se caracteriza principalmente por su caudal y por el contenido de sólidos en suspensión (Puertos del Estado, 1994).

Relleno vertido directo: Hace referencia a la forma en que se ejecuta el relleno, el cual se realiza mediante barcazas o desde tierra. Acorde al tipo de material empleado, se pueden distinguir los siguientes:

- I. Rellenos con materiales terrestres: Obtenidos de préstamos terrestres.
 - Rellenos granulares: Realizados con gravas o arenas, o una mezcla de ambas.
 - Rellenos cohesivos: Arcillas, limos arcillosos.
 - Pedraplenes limpios o escolleras de granulometría abierta: Materiales rocosos con escaso contenido en finos.
 - Pedraplenes sucios o escolleras de granulometría cerrada: Materiales rocosos de calidad y alto contenido de finos.
- II. Rellenos antrópicos y no convencionales. Los rellenos antrópicos son los realizados con productos de desecho: escombros y residuos sólidos urbanos (Puertos del Estado, 1994).

Explanada: El termino hace referencia a la capa de material colocado sobre el relleno y que conforma una coronación y sobre la cual se apoya el pavimento. Según se especifica en ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994), acorde al tipo de material empleado, se pueden distinguir los siguientes:

- I. Suelos adecuados:
 - Tamaño máximo de partícula igual o menor a 10 cm.
 - Contenido de finos que pasan el tamiz de 0.075 mm inferior al 35 %.
 - Límite líquido < 40.
 - Densidad máxima (Proctor Estándar) no menor a 1,750 t/m³.
 - Índice CBR debe ser superior a 5 %.
 - Hinchamiento, menor a 2 %.
 - Contenido de materia orgánica inferior al 1 %.
- II. Suelos seleccionados:

- Tamaño máximo de partícula igual o menor a 8 cm.
 - Contenido de finos que pasan el tamiz de 0.075 mm inferior al 25 %.
 - Límite líquido < 30.
 - Índice Plástico < 10
 - Densidad máxima (Proctor Estándar) no menor a 1,750 t/m³.
 - Índice CBR debe ser superior a 10 %.
 - No debe presentar hinchamiento.
 - No deben presentar contenido de materia orgánica.
- III. Mezcla de gruesos y finos de cantera o tajo:
- Mezcla sin clasificar de materiales gruesos y finos, obtenidos de frentes de cantera y de la cual se eliminan partículas de tamaño que exceda el 50 % del espesor de la capa.
- IV. Suelos seleccionados con CBR > 20 %
- Cumplen las especificaciones de los suelos seleccionados.
 - Índice CBR superior a 20 %.

6.6. Categorización de la explanada

En la guía ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994), se debe realizar una clasificación de la explanada – subrasante -, para cual se deben considerar aspectos como: la naturaleza del relleno y su grado de consolidación, y los materiales empleados en la coronación.

Se distinguen seis categorías de rellenos (Puertos del Estado, 1994):

- I. Rellenos malos no consolidados (MNC): Rellenos hidráulicos con alto contenido de finos (> 35 %) o rellenos antrópicos de vertido directo, no sometidos a ningún tratamiento de consolidación.
- II. Rellenos malos consolidados (MC): Rellenos hidráulicos con alto contenido de finos (> 35 %) o rellenos antrópicos de vertido directo, pero sometidos a alguno de los tratamientos de consolidación.
- III. Rellenos regulares no consolidados (RNC): Rellenos hidráulicos con contenido de finos entre el 10 y el 35 % o rellenos no convencionales de vertido directo, no sometidos a ningún tratamiento de consolidación.
- IV. Rellenos regulares consolidados (RC): Rellenos hidráulicos con contenido de finos entre el 10 y el 35 % o rellenos no convencionales de vertido directo, pero sometidos a alguno de los tratamientos de consolidación.

- V. Rellenos buenos no consolidados (BNC). Rellenos hidráulicos con bajo contenido de finos (< 10 %) o rellenos de vertido directo con materiales terrestres, no sometidos a ningún tratamiento de consolidación.
- VI. Rellenos buenos consolidados (BC): Rellenos hidráulicos con bajo contenido de finos (< 10 %) o rellenos de vertido directo con materiales terrestres, pero sometidos a alguno de los tratamientos de consolidación.

Respecto a la coronación en la guía ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994), se presentan las siguientes situaciones:

- I. Ausencia de coronación.
- II. Coronación con suelos adecuados.
- III. Coronación con suelos seleccionados.
- IV. Coronación con suelos seleccionados con CBR > 20 %.
- V. Coronación con mezcla de gruesos y finos de cantera o tajo.

Si se combinan los diferentes tipos de rellenos y las distintas situaciones de coronación, se obtienen cuatro categorías de explanación:

- Explanada deficiente E0
- Explanada aceptable E1
- Explanada buena E2
- Explanada muy buena E3

Utilizada la clasificación de relleno y coronación, se realiza una calificación de la explanación según el **Cuadro 13**:

Cuadro 13. Clasificación de la explanada

Coronación	MNC	RNC	BNC	MC	RC	BC
Suelos adecuados	E0	E0	E0	E1	E1	E1
Suelos seleccionados	E1	E1	E1	E1	E2	E2
Mezcla de gruesos y finos de cantera o tajo	E1	E1	E1	E2	E2	E3
Suelos seleccionados con CBR > 20 %	E1	E1	E2	E2	E3	E3

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

6.7. Selección del tipo de pavimento

Una vez determinado el parámetro de Índice de Intensidad (Sección 6.2) y la categorización de la explanada (Sección 6.6) se procede a realiza una sección de la estructura de pavimento acorde al catálogo establecido en ROM 4.1-94 (Puertos del Estado, 1994), acorde a lo definido en el **Cuadro 15** al **Cuadro 29**. Los esquemas de las estructuras propuestas en el catálogo se presentan en el **Anexo 8**.

Cuadro 14. Selección capas inferiores

Categoría Explanación	Subbase	Base
E0 ⁽¹⁾	0,40 m	0,25 m
E1	0,25 m	0,25 m
E2	--	0,25 m
E3	--	--

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

(1) Sólo es admisible en el caso de pavimentos provisionales.

Cuadro 15. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Operación

Trafico A	Trafico B	Trafico C	Trafico D
Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa			
0.32 m	0.29 m	0.26 m	0.23 m
Pavimento de concreto compactado con rodillo			
0.32 m	0.29 m	0.26 m	0.23 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado			
0.28 m	0.25 m	0.22 m	0.20 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas			
0.28 m	0.25 m	0.22 m	0.20 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

(1) Sólo es admisible en el caso de pavimentos provisionales.

Cuadro 16. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Operación ⁽¹⁾

Trafico A ⁽²⁾	Trafico B ⁽²⁾	Trafico C	Trafico D
0.12 m	0.10 m	0.10 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

- (1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m.
- (2) La capa de base estará constituida por algunos de los siguientes tipos: concreto magro (Contenido cemento 150 kg/m³ (0,15 m), concreto f'c = 17.5 MPa (0,15 m) o suelo cemento (0,20 m).

Cuadro 17. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Almacenamiento de Graneles

Trafico B	Trafico C	Trafico D
Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa		
0.26 m	0.23 m	0.20 m
Pavimento de concreto compactado con rodillo		
0.26 m	0.23 m	0.20 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas		
0.20 m	0.18 m	0.18 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cuadro 18. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Almacenamiento de Graneles ⁽¹⁾

Trafico B	Trafico C	Trafico D
0.10 m	0.10 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

- (1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m.

Cuadro 19. Estructuras de pavimento de mezcla asfáltica – Zonas de Almacenamiento de Graneles

Trafico B	Trafico C	Trafico D
0.30 m	0.25 m	0.20 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cuadro 20. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Almacenamiento Mercancía

Trafico A	Trafico B	Trafico C	Trafico D
Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa			
0.32 m	0.29 m	0.26 m	0.23 m
Pavimento de concreto compactado con rodillo			
0.32 m	0.29 m	0.26 m	0.23 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado			
0.28 m	0.25 m	0.22 m	0.20 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas			
0.25 m	0.22 m	0.20 m	0.18 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cuadro 21. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Almacenamiento Mercancía

Trafico A ⁽²⁾	Trafico B ⁽²⁾	Trafico C	Trafico D
0.12 m	0.10 m	0.10 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

- (1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m.
- (2) La capa de base estará constituida por algunos de los siguientes tipos: concreto magro (Contenido cemento 150 kg/m³ (0,15 m), concreto f'c = 17.5 MPa (0,15 m) o suelo cemento (0,20 m).

Cuadro 22. Estructuras de pavimento de mezcla asfáltica – Zonas de Almacenamiento Mercancía

Trafico A	Trafico B	Trafico C	Trafico D
0.40 m	0.35 m	0.30 m	0.25 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cuadro 23. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Almacenamiento de Contenedores

Trafico A	Trafico B	Trafico C	Trafico D
Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa			
0.35 m	0.32 m	0.29 m	0.26 m
Pavimento de concreto compactado con rodillo			
0.35 m	0.32 m	0.29 m	0.26 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado			
0.31 m	0.28 m	0.25 m	0.22 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas			
0.28 m	0.25 m	0.22 m	0.20 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cuadro 24. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Almacenamiento de Contenedores

Trafico A ⁽²⁾	Trafico B ⁽²⁾	Trafico C	Trafico D
0.12 m	0.10 m	0.10 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

- (1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m.
- (2) La capa de base estará constituida por algunos de los siguientes tipos: concreto magro (Contenido cemento 150 kg/m³ (0,15 m), concreto f'c = 17.5 MPa (0,15 m) o suelo cemento (0,20 m).

Cuadro 25. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Estacionamiento de semirremolques

Trafico A	Trafico B
Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa	
0.26 m	0.23 m
Pavimento de concreto compactado con rodillo	
0.26 m	0.23 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas	
0.20 m	0.18 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cuadro 26. Estructuras de pavimento de adoquines – Estacionamiento de semirremolques

Trafico A	Trafico B
0.10 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

- (1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m.
- (2) La capa de base estará constituida por algunos de los siguientes tipos: concreto magro (Contenido cemento 150 kg/m³ (0,15 m), concreto f'c = 17.5 MPa (0,15 m) o suelo cemento (0,20 m).

Cuadro 27. Estructuras de pavimento de concreto hidráulico – Zonas de Estacionamiento

Trafico A	Trafico B	Trafico C	Trafico D
Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa			
0.26 m	0.23 m	0.20 m	0.20 m
Pavimento de concreto compactado con rodillo			
0.26 m	0.23 m	0.20 m	0.20 m
Pavimento continuo de concreto hidráulico reforzado con fibras metálicas			
0.20 m	0.18 m	--	--

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Cuadro 28. Estructuras de pavimento de adoquines – Zonas de Estacionamiento

Trafico A ⁽²⁾	Trafico B ⁽²⁾	Trafico C	Trafico D
0.10 m	0.08 m	0.08 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

Fuentes:

- (1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m.
- (2) La capa de base estará constituida por algunos de los siguientes tipos: concreto magro (Contenido cemento 150 kg/m³ (0,15 m), concreto f'c = 17.5 MPa (0,15 m) o suelo cemento (0,20 m).

Cuadro 29. Estructuras de pavimento de mezcla asfáltica – Zonas de Estacionamiento

Trafico A	Trafico B	Trafico C	Trafico D
0.18 m	0.15 m	0.12 m	0.08 m

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

6.8. Ejemplo de aplicación ROM 4.1-94

Se presenta un ejercicio breve con el objetivo de mostrar la aplicación de la metodología propuesta en ROM 4.1-94. Se sigue la secuencia que se planteada en la **Figura 25**. Las características supuestas para la obra portuaria donde se requiere dimensionar el pavimento son:

- Terminal de contenedores
- Área = $S = 300.000 \text{ m}^2$
- Longitud = $L = 700 \text{ m}$
- Apilamiento en cinco alturas, 400 000 TEU
- Equipos: Cargador frontal (Front lift trucks) y Grúa automóvil 70 t

Paso 1. Selección del uso de la superficie portuaria: Comercial, mercancía general ‘Contenedores’.

Paso 2. Selección de la zona dentro del uso considerado:

- Zona de operación
- Zona de almacenamiento

Paso 3. Distinción entre cargas de almacenamiento y cargas de manipulación:

Cargas de almacenamiento

- Zona operación: Alta
- Zona almacenamiento: se considera como carga máxima 5 alturas de contenedores de 40 pies, equivalente a una presión sobre el pavimento de 13,2 MPa. (Tomado de **Sección 4.4**)

Cargas de equipos de manipulación:

- Grúa automóvil de 70 t: Q_{\max} : 750 kN y 1,8 MPa (Tomado de **Cuadro 4**)
- Cargador frontal: 30 kN y 0,8 MPa (Tomado de **Cuadro 4**)

Paso 4. Determinación de la carga de cálculo (Tomado de **Cuadro 10**):

- Zona operación:

Almacenamiento = Alta

Manipulación $Q_v > 700 \text{ kN}$ y $p_v > 1,5 \text{ MPa}$ → Alta

- Zona almacenamiento:
 $Q_v > 1200 \text{ kN}$ y $p_v > 10 \text{ MPa}$ = Cargas altas
 Manipulación $Q_v > 700 \text{ kN}$ y $p_v > 1,5 \text{ MPa}$ → Alta

Paso 5. Determinación de la intensidad de uso

- Zona operación $I_{1.1}$ (t/m). Mercancías y materiales manipulados por rodadura por unidad de longitud de atraque en el año medio de la vida útil.
 $I = 400.000 \text{ TEU} \times 10 \text{ t} / 700 \text{ m} = 5.714 \text{ t/m} > 3.000 \text{ t/m}$ → Elevada
- Zona de almacenamiento de contenedores $I_{1.4}$ (TEU/m²). Contenedores manipulados por unidad de superficie en la zona, en el año medio de la vida útil.
 $I = 400.000 \text{ TEU} / 300.000 = 1,33 \text{ TEU/m}^2 < 2 \text{ TEU/m}^2$ → Media

Paso 6. Determinación de la categoría de tráfico. Acorde al **Cuadro 11**:

- Zona operación: Carga Alta + Intensidad Elevada → Tráfico A
- Zona almacenamiento: Carga Alta + Intensidad Media → Tráfico A

Paso 7. Determinación de la categoría de la explanada. Se considera un relleno vertido directo con rellenos antrópicos (escombros) con precarga (MC) con coronación con de **Mezcla de gruesos y finos de cantera o tajo** de 1,05 m de espesor. Según **Sección 6.6 y Cuadro 13** → E2 Buena.

Paso 8. Capas inferiores del pavimento. Del **Cuadro 14**, para una explanada tipo E2 → Base de 0,25 m. de espesor.

Paso 9. Elección del tipo de pavimento. Para Tráfico A, empleando el catálogo mostrado del **Cuadro 15 al Cuadro 29 y Anexo 8**, se recomiendan las siguientes opciones:

- Zona de operación: Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa espesor de 0.32 m o Pavimento de Adoquines con espesor de 0.12 m.
- Zona de almacenamiento: Pavimento de concreto hidráulico vibrado MR = 4 MPa, espesor de 0.35 m.

CAPITULO 7: METODOLOGÍAS DE DISEÑO ESPECIFICAS

7.1. Pavimento asfaltico (Full Deph)

7.1.1. Generalidades

El documento de referencia empleado para el diseño de pavimentos portuarios asfalticos es el "MS-23 Thickness Desing Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads" (Asphalt Institute, 2006).

El manual MS-23 presenta un procedimiento para diseñar pavimentos asfálticos para vehículos pesados. El procedimiento se basa en el concepto de que el diseño puede lograr calculando primero una carga de una sola rueda "equivalente". El espesor de diseño depende de la resistencia de la subrasante y de la temperatura media anual del aire (MAAT). El procedimiento de diseño se basa en conceptos de diseño elástico multicapa, este enfoque supone que la aplicación de una carga en el pavimento produce dos respuestas elásticas críticas:

- Deformación horizontal (ϵ_t) en la parte inferior de la capa asfáltica.
- Deformación de compresión vertical (ϵ_c) en la parte superior de la subrasante.

Acorde a la sección 2.03 Minimum Thickness of Asphalt Concrete (Asphalt Institute, 2006), se recomienda un **espesor mínimo de 180 mm (7 pulgadas)** de mezcla asfáltica en caliente.

7.1.2. Cargas

La metodología expuesta en el manual MS-23 (Asphalt Institute, 2006), requiere de almenos los siguientes datos de equipos y neumáticos:

- P = Carga de una sola rueda (kN).
- p = Presión de contacto (MPa).
- a = Radio de área circular (mm).
- D = Distancia de centro a centro entre neumáticos (mm).

Todos los diseños se determinan suponiendo que la carga se transmite al pavimento en un área circular cargada. El radio (a) de esta área circular equivalente es requerido por el procedimiento de diseño. El radio del área circular equivalente se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$a = \sqrt{([P/p \pi])}$$

Las cargas de diseño se estiman acorde al CAPITULO 4: CARGAS.

7.1.3. Metodología propuesta por el MS-23

La metodología se basa en el análisis de una rueda simple, de alguna magnitud P y presión de **contacto** p. Cuando es requerido considerar el efecto de ruedas adyacentes, se emplean factores de ajuste, convirtiendo múltiples cargas a una carga equivalente. Los pasos sugeridos en el MS-23 son (Asphalt Institute, 2006):

- (1) Determinar si, a partir del espaciamiento de ruedas, el problema puede ser considerado como una rueda simple, dual o múltiple.
- (2) Determinar si, a partir de la carga de rueda y configuración, el problema puede ser considerado como una rueda simple.
- (3) Determinación del módulo resiliente de la subrasante
- (4) Determinación de variables de entrada: Carga de rueda P, presión de contacto p, área de contacto a y numero de repeticiones de carga.
- (5) Utilizar cuadro o grafica de diseño
- (6) Determinar el valor $T_{A/a}$. Calcular el espesor T_A :

$$T_A = (T_{A/a}) * a$$

Un problema puede ser tratado como una sola rueda si las ruedas están separadas por una distancia superior a **ocho veces el radio de la zona de carga circular (a)**, determinada como se describió anteriormente.

El diagrama de flujo asociado a la metodología mostrada en el MS-23 (Asphalt Institute, 2006), se muestra en la **Figura 26**:

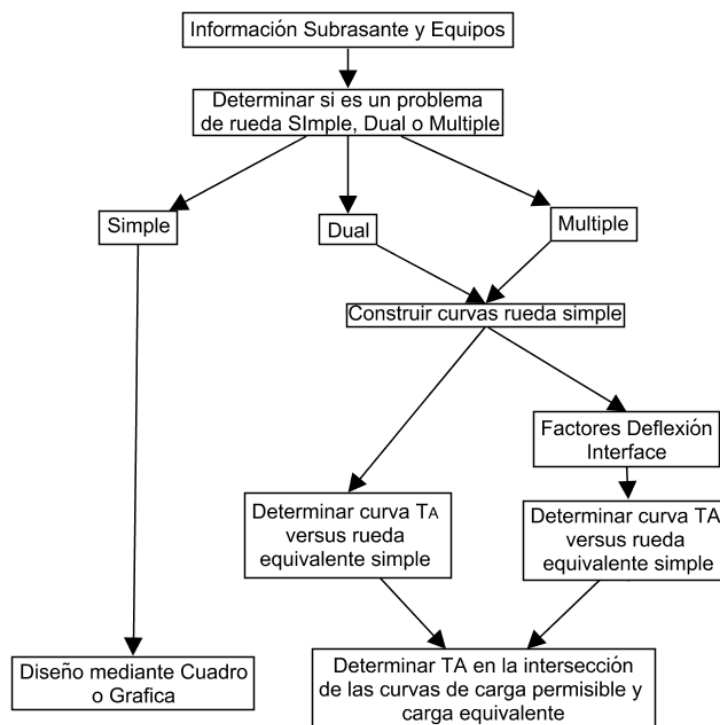


Figura 26. Proceso de diseño acorde a MS-23

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

7.1.4. Diseño para una rueda simple

Para el caso de una rueda simple, según se señala en (Asphalt Institute, 2006), se realiza una selección del valor de $T_{A/a}$ empleando el **Cuadro 30** o las gráficas mostradas en la **Figura A. 8**, **Figura A. 9** o **Figura A. 10**, según corresponda.

Cuadro 30. Valores de $T_{A/a}$ – Temperatura anual media superior a 13 °C

Mr Subrasante	Repeticiones Carga	Presión de contacto, kPa					
		275	415	550	690	1035	1380
30 MPa (CBR = 3%)	10 000	0.59	0.81	1.00	1.16	1.50	1.79
	100 000	0.75	1.00	1.22	1.41	1.79	2.12
	1 000 000	0.92	1.22	1.46	1.68	2.11	2.47
50 MPa (CBR = 5%)	10 000	0.47	0.47	0.88	1.04	1.37	1.63
	100 000	0.63	0.63	1.10	1.28	1.66	1.97
	1 000 000	0.81	0.81	1.33	1.55	1.97	2.33
100 MPa (CBR = 10%)	10 000	0.39 ⁽¹⁾	0.48 ⁽¹⁾	0.67	0.84	1.17	1.44
	100 000	0.40	0.67	0.89	1.07	1.45	1.75
	1 000 000	0.60	0.88	1.13	1.35	1.75	2.10
150 MPa (CBR = 15%)	10 000	0.39 ⁽¹⁾	0.48 ⁽¹⁾	0.55 ⁽¹⁾	0.67	1.03	1.29
	100 000	0.39 ⁽¹⁾	0.51	0.73	0.93	1.30	1.60
	1 000 000	0.42	0.74	0.98	1.20	1.59	1.93

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

Fuentes:

- (1) Valor mínimo de $T_{A/a}$

7.1.5. Diseño para una rueda dual

El procedimiento para el diseño con un eje dual consiste en determinar una carga de rueda simple equivalente, que pueda ser usada con el **Cuadro 30** o las gráficas mostradas en la **Figura A. 8, Figura A. 9 o Figura A. 10**, según corresponda.

7.1.5.1. Grafica carga de rueda simple permisible

Se requiere construir graficas de T_A versus carga de rueda simple (P), la gráfica se denomina “grafica de rueda simple permisible”, se determina siguiendo el siguiente procedimiento (Asphalt Institute, 2006):

- (1) Determinar el M_r de la subrasante.
- (2) Determinar la presión de contacto, p .
- (3) Seleccionar un rango de valores de carga de una sola rueda (P). El valor más bajo debe ser igual a la carga más pesada en una rueda y la más alta aproximadamente el 60 % del peso total del equipo o vehículo.
- (4) Calcular el radio de contacto (a) para cada carga (P) seleccionada.
- (5) Determinar $T_{A/a}$ del **Cuadro 30** o las gráficas mostradas en la **Figura A. 8, Figura A. 9 o Figura A. 10**, para los valores dados de M_r y p .
- (6) Para cada valor de (a) determinado en el punto 4, calcular $T_A = (T_{A/a}) * a$.
- (7) Tabular P y T_A y obtenerla grafica de diseño de carga de rueda simple permisible para el problema.

7.1.5.2. Grafica carga de rueda simple equivalente

Se requiere construir graficas de T_A versus carga de rueda simple equivalente (P_e), la gráfica se denomina “grafica de carga de rueda simple equivalente”, se determina siguiendo el siguiente procedimiento (Asphalt Institute, 2006):

- (1) Determinar D, el espaciado de centro a centro entre neumáticos dobles.
- (2) Determinar la relación de espacio de la rueda (D/a), utilizando el valor del radio de contacto, a, determinado para la carga de un solo neumático (P) (la mitad de la carga de neumáticos dobles).
- (3) Seleccionar un rango de valores de $T_{A/a}$ utilizar la **Figura A. 11** para determinar un rango factores de carga (L). Para la mayoría de los casos, los valores $T_{A/a}$ de 1.0 a 4.0 proporciona el rango necesario. Esto se puede hacer de la siguiente manera:

Entrar a la gráfica de **Figura A. 11** utilizando el valor de D/a determinado en punto 2 y leer los valores de L correspondientes a los valores de $T_{A/a}$ seleccionado.

- (4) Calcular $P_e = 2P/L$ para cada valor de $T_{A/a}$ seleccionado.
- (5) Determine $T_A = a (T_{A/a})$ para cada valor de $T_{A/a}$ seleccionado.
- (6) Graficar los valores P_e versus T_A determinados en los puntos 4 y 5.

7.1.5.3. Determinación del espesor T_A para carga dual

El valor de T_A , se determina de la intersección de las curvas obtenidas en las secciones **7.1.5.1 y 7.1.5.2**. Un ejemplo de estas curvas se muestra en la **Figura A. 12**.

7.1.6. Diseño para ruedas múltiples

El procedimiento de diseño para múltiples cargas de ruedas se basa en la información obtenida de la **Figura A. 13**. El **Cuadro 30** se utiliza para obtener una curva de carga de una sola rueda admisible versus espesor, mientras que la **Figura A. 13** se utiliza para determinar la relación entre la carga de una sola rueda equivalente (P_e) y T_A . El diseño T_A se determina por la intersección de estas dos curvas de la misma manera que para las cargas de doble rueda. La grafica carga de rueda simple permisible se determina acorde a la sección **7.1.5.1**.

El método usado para calcular la gráfica de P_e versus T_A utiliza el factor de deflexión de la interface como se muestra en la **Figura A. 13**.

Utilizando superposición, la deflexión de la interfaz total en cualquier ubicación (x, y) bajo cualquier configuración de rueda múltiples es la suma de las deflexiones individuales causadas por cada neumático en la coordenada (x, y) (Asphalt Institute, 2006).

Como se indica en (Asphalt Institute, 2006): El concepto de utilizar la teoría de deflexión de interfaz para determinar la carga de una sola rueda equivalente a un eje de ruedas múltiples se basa en la hipótesis de que la carga de una sola rueda equivalente (P_e) causará la misma deflexión máxima (en la superficie de la subrasante) que la que ocurre bajo el sistema de carga de múltiples ruedas. Acorde a las siguientes ecuaciones:

$$\Delta_{\max} = \frac{P_e a_e}{M_r} F_e = \max \sum \left(\frac{P_r a_r}{M_r} F_r \right) d \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\left(\sqrt{P_e} F_e \right) = \max \sum \sqrt{P_r} F_r \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

Pe: Carga de una sola rueda equivalente

Pr: Carga en una rueda situada a una distancia (r) del punto de la máxima deflexión en el sistema de ruedas múltiples.

7.1.6.1. Grafica carga de rueda simple equivalente para múltiples ruedas

El procedimiento para obtener una curva de carga de rueda simple equivalente para la carga de varias ruedas implica 15 pasos divididos en tres fases:

(1) Determinar los factores de deflexiones máximos (C) para varios valores de prueba de T_A . Los pasos asociados son:

- Determinar los valores para el equipo de diseño.

P = carga de una sola rueda para cada rueda

p = presión de contacto

a = radio de contacto para cada rueda

r = distancias radiales desde cada rueda hasta el punto esperado de deflexión máxima.

- Seleccionar valores de prueba de T_A , usar aproximadamente entre $0.5a - 2.0a$, calculados para la carga más pesada de la rueda.
- Registrar los valores determinados en los puntos 1 y 2 en un cuadro con el mostrado en el **Figura A. 14**.
- Calcular valores de $T_{A/a}$ y r/a para cada rueda.
- Seleccionar los valores del factor de deflexión (F) de la **Figura A. 13** correspondiente a valores de $T_{A/a}$ y r/a determinados en el punto 4
- Calcular $\sqrt{P F}$ para cada rueda.
- Para cada valor de T_A utilizado seleccione el valor máximo de $\sqrt{P F}$. (La ubicación del punto de deflexión máxima está determinada por el valor máximo de la $\sqrt{P F}$ llamado C. El punto de ubicación de la deflexión máxima puede ser diferente para los valores bajos de T_A que los obtenidos para valores altos de T_A .)

(2) Determinar valores de Pe. Los valores de C determinados anteriormente se utilizan para determinar Pe.

- Seleccionar valores de Pe que van desde la carga más pesada en una rueda hasta aproximadamente 60 % del peso total del equipo.
- Calcular a_e y $T_{A/a}$ para cada valor asumido de Pe y T_A , utilizando el valor dado de p.

- Determinar un factor de deflexión de interfaz F_e en $r/a = 0$ para cada valor de $T_{A/ae}$ utilizando **Figura A. 13**.
 - Calcular $C = \sqrt{P_e F_e}$ para cada valor de P_e y F_e .
 - Graficar los valores de C versus P_e para cada valor asumido de T_A , como se ilustra en la **Figura A. 15**.
- (3) Curva de carga de una sola rueda equivalente. Esta curva se obtiene trazando los valores de T_A asumidos en el punto 2 frente a los valores de P_e determinados.
- De la gráfica de C versus P_e obtenida, se obtiene un valor de P_e correspondiente al valor de C determinado, cada T_A seleccionado.
 - Graficar T_A versus P_e para los valores de C , como se ilustra en la **Figura A. 16**.

7.2. Pavimento concreto hidráulico

7.2.1. Generalidades

El documento de referencia empleado para el diseño de pavimentos portuarios asfálticos es el “Container Terminal and Intermodal Rail Yard Operational Area Consideration for Pavement Design” del Puerto de los Angeles (Nichol & Moffat, 2010).

El procedimiento de diseño se basa en proporcionar una capacidad estructural suficiente del pavimento para un tipo específico de carga de equipos de manipulación de contenedores. Los principales factores de diseño estructural incluyen:

- Espesor de losa
- Resistencia a la flexión del hormigón de losa
- Soporte de la fundación (desde la base y la subrasante)
- Repetición de carga del equipo y cargas de ruedas

También se supone que se proporciona un espaciado de juntas relativamente corto y una transferencia de carga adecuada en las juntas.

Acorde a (Nichol & Moffat, 2010), la resistencia a la flexión de diseño no debe ser menor de 4.5 MPa. Además, el valor del módulo de reacción, K , debe ser obtenido en la parte superior de la base. La base y la subrasante combinadas deben tener un valor K de diseño mínimo de 54.5 MPa/m (200 lb/in³) para evitar una deformación permanente excesiva de la subrasante debido a desviaciones de esquina de losa. El valor

combinado de K, denominado K_{∞} , se puede determinar utilizando la gráfica mostrada en la **Figura A. 18**.

7.2.2. Daño por fatiga

La carga repetida del equipo provoca daños por fatiga en las losas de concreto, lo que resulta en micro fisuramiento en la parte inferior de la losa. Además, si el “bombeo” de finos y la pérdida de apoyo se presentan en las esquinas de losa, el esfuerzo crítico podría aumentar hasta que se desarrolle una ruptura en la esquina (Nichol & Moffat, 2010).

La losa y la base son caracterizadas utilizando la teoría de Westergaard. Una suposición importante de diseño es que se proporciona una transferencia de carga adecuada en las juntas para que la tensión de carga que se produce en las articulaciones no sea significativamente mayor que la tensión en el interior de la losa.

El número de aplicaciones de tensión permitidas para agrietar la losa de hormigón se controla por la relación de tensión crítica a la resistencia a la flexión del hormigón. La relación utilizada en el procedimiento de diseño para relacionar la relación tensión/resistencia a la flexión con el número de aplicaciones de tensión al agrietamiento fue desarrollada por el Portland Cement Association (PCA):

$$\begin{aligned} \log N &= 11,737 - 12,077 \cdot SR && (\text{Para } SR \geq 0,55) \\ N &= \left(\frac{4,2477}{SR - 0,4325} \right)^{3,268} && (\text{Para } 0,45 < SR < 0,55) \\ N &= \text{no limitado} && (\text{Para } SR \leq 0,45) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde SR se define como el cociente entre el esfuerzo de tensión máximo esperado en el fondo de la losa y el valor de la resistencia a la tensión del concreto, medida con base en el módulo de ruptura, MR:

$$SR = \sigma / MR \quad \text{Ecuación 35}$$

7.2.3. Esfuerzos de alabeo

Según se explica en (Packard, 1996) la distorsión de un miembro originalmente lineal o plano en forma curva como la deformación de una losa debido a la fluencia o las diferencias de temperatura o contenido de humedad en las zonas adyacentes a sus caras opuestas”

El alabeo puede presentarse en las losas de forma convexa o cóncava dependiendo del diferencial de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa, provocando esfuerzos de compresión y tensión.

Los esfuerzos por alabeo se determinan de la siguiente manera:

$$\text{Centro de losa en X: } \sigma_x = \frac{E\alpha_t\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_x + \nu C_y) \quad \text{Ecuación 36}$$

$$\text{Centro de losa en Y: } \sigma_y = \frac{E\alpha_t\Delta T}{2(1-\nu^2)}(C_y + \nu C_x) \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\text{Borde de losa: } \sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta T}{2} \quad \text{Ecuación 38}$$

$$\text{Esquina de losa: } \sigma = \frac{E\alpha_t\Delta T}{3(1-\nu)} \left[\sqrt{\frac{a}{l}} \right] \quad \text{Ecuación 39}$$

$$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

l = radio de rigidez relativa

ν = razón de Poisson del concreto

h = espesor de la losa

E = módulo de elasticidad del concreto

k = módulo de reacción de la subrasante

a = radio del área cargada en el borde de la losa

ΔT = Gradiente de temperatura = $T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}$

α_t = coeficiente de expansión térmica del concreto

Los valores de C_x y C_y son función de la geometría y las rigideces (L_x/l) y (L_y/l) que se determinan de Gráfico de Bradbury, que se muestra en la **Figura A. 17**.

7.2.4. Esfuerzos en losas de concreto – Ecuaciones de Westergaart

Para el caso de análisis de esfuerzos por aplicación de cargas de equipos o tránsito, se aplican las relaciones establecidas por Westergaart. Los casos de análisis según la posición de la carga se muestran en la **Figura 27**:

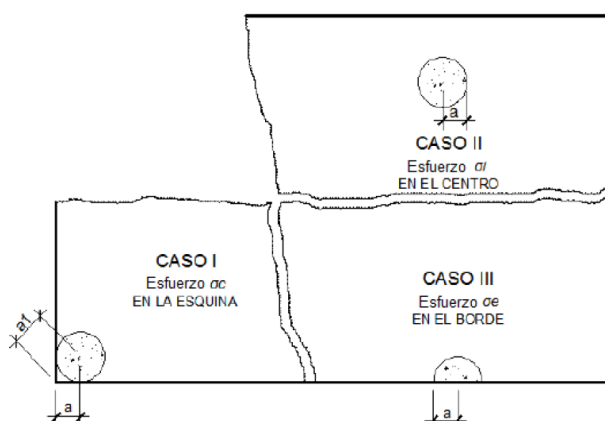


Figura 27. Casos de análisis por posición de carga

7.2.4.1. Caso I: Esfuerzo de esquina

Esfuerzo esquina:
$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1.0 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right)^{0.6} \right]$$
 Ecuación 41

Deflexión esquina:
$$\Delta_c = \frac{P}{k \cdot \ell^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right) \right]$$
 Ecuación 42

7.2.4.2. Caso II: Esfuerzo en el centro

Esfuerzo centro:
$$\sigma_i = \frac{3(1.0 + \nu)P}{2\pi h^2} \left[\ln\left(\frac{\ell}{b}\right) + 0.6159 \right]$$
 Ecuación 43

Si $a < 1.724h$, b:
$$\sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$$
 Ecuación 44

Si $a \geq 1.724h$, b:
$$a = b$$
 Ecuación 45

Deflexión centro:
$$\Delta_i = \frac{P}{8k \cdot \ell^2} \left\{ 1.0 + \frac{1.0}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2\ell}\right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{\ell}\right)^2 \right\}$$
 Ecuación 46

7.2.4.3. Caso III: Esfuerzo en el borde

Esfuerzo
borde área
circular:
$$\sigma_{e(\text{círculo})} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{l} \right]$$
 Ecuación 47

Esfuerzo
borde área
semicircular:
$$\sigma_{e(\text{semicírculo})} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 3.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{(1+2\nu)a}{2l} \right]$$
 Ecuación 48

Deflexión
borde área
circular:
$$\Delta_{e(\text{círculo})} = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1.0 - \frac{(0.76+0.4\nu)a}{l} \right]$$
 Ecuación 49

Deflexión
borde área
semicircular:
$$\Delta_{e(\text{semicírculo})} = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1.0 - \frac{(0.323+0.17\nu)a}{l} \right]$$
 Ecuación 50

7.2.5. Transmisión de esfuerzos – Dovelas

Las juntas se utilizan para limitar los esfuerzos por alabeo y deformación en el pavimento que se deben a la temperatura y los gradientes de humedad a través de la losa.

El espaciado estándar de juntas para pavimentos es de 3.8 m (longitudinal) por 4.5 m (transversal). Para losas con un espesor superior a 30 cm, el espaciado de las juntas se puede aumentar a un máximo de 6.0 m. El espaciado transversal de las articulaciones no variar del espaciado longitudinal en más del 25 % (Nichol & Moffat, 2010).

Se determina el esfuerzo admisible entre dovela y concreto:

$$f_b = \left(\frac{4-d}{3} \right) f'_c \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde:

d = Diámetro de dovela (pulgadas)

f'c = Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de edad (psi)

Se debe estimar la capacidad de soporte de una dovela:

$$\sigma_b = \frac{KP(2 + \beta z)}{4\beta^3 E_d I_d} \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde:

P = carga en una dovela (lb)

K= Módulo de soporte de dovela (presión necesaria para producir una deflexión unitaria de la dovela dentro de la masa que la rodea, valores típicos: 300,000 a 1,500,00 pci).

z = abertura de la junta (pulgadas)

Se determina el factor de rigidez relativa, β :

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{Kd}{4E_d I_d}} \quad \text{Ecuación 53}$$

Donde:

E_d = Módulo de Elasticidad de dovela (29 x 10⁶ psi)

I_d = Momento de inercia de dovela = $\pi d^4/64$

Se debe comparar el esfuerzo determinado por la Ecuación 51 versus el esfuerzo aplicado acorde a la Ecuación 52.

Cuando una carga W se aplica sobre una losa cerca de la junta, la carga se transfiere a la losa adyacente a través del grupo de dovela, como se muestra en la **Figura 28**:

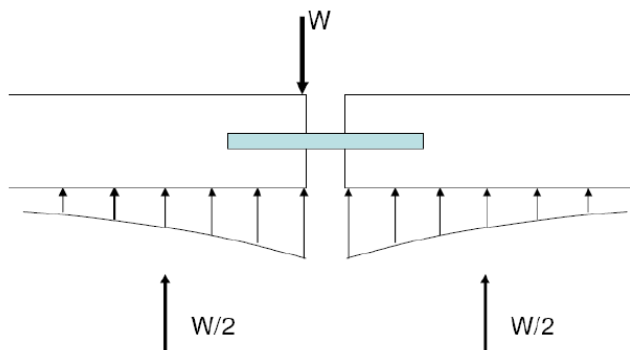


Figura 28. Acción de dovela

Se considera que la dovela bajo el centro de la carga es la más efectiva (1.0) y que la efectividad decrece linealmente hasta una distancia igual a $1.8 \cdot l$ (donde ocurre el momento máximo negativo), donde l se estima como:

$$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25} \quad \text{Ecuación 54}$$

Donde:

l = radio de rigidez relativa

h = espesor de la losa

Al conocer el valor de l , se puede determinar la carga en cada dovela según se muestra en el diagrama de carga de la **Figura 29**:

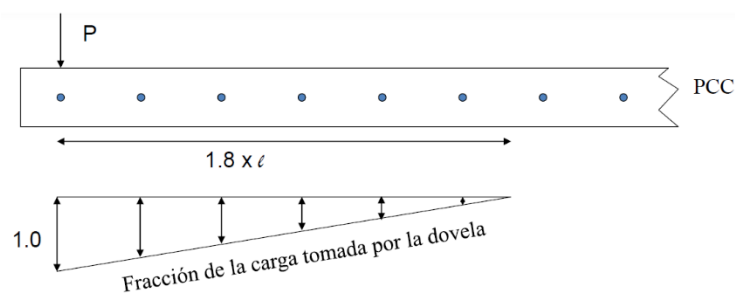


Figura 29. Distribución transversal de carga en dovelas

Como se mostró anteriormente, existen formas teóricas de estimar diámetros y longitudes de dovelas, sin embargo, es común emplear criterios prácticos para su diseño, como el mostrado en el **Cuadro 31**:

Cuadro 31. Dimensiones típicas de dovelas

Espesor losa (cm)	Diámetro Dovela (pulgada)	Longitud dovela (cm)
12.5	5/8	30
15.0	3/4	36
18.0	7/8	36
20.0	1.0	36
23.0	1 1/8	40
25.0	1 1/4	46
28.0	1 3/8	46
31.0	1 1/2	51

Fuente: Modificado de (Nichol & Moffat, 2010)

7.2.6. Refuerzo por fricción / temperatura

Acorde a (Nichol & Moffat, 2010), el propósito principal del refuerzo de acero es mantener las grietas unidas para asegurar una transferencia de carga adecuada a través de la grieta. Las fuerzas de fricción desarrolladas por el movimiento de losa debido al cambio de temperatura semestral desde el centro de la losa hasta el extremo libre y debe ser igual a la tensión total en el hormigón. En términos generales, el área de refuerzo de acero requerido se determina como:

$$A_s = \frac{\gamma_c h L f_a}{2 f_s} \quad \text{Ecuación 55}$$

A_s = área de acero requerida / ancho unitario

γ_c = peso unitario del concreto

h = espesor de la losa

L = longitud de la losa

f_a = factor de fricción = 1.5

f_s = esfuerzo admisible del acero

7.3. Pavimento de adoquines

7.3.1. Generalidades

El documento de referencia empleado para el diseño de pavimentos portuarios de adoquines es el "Port and industrial pavement design with concrete pavers: A comprehensive guide" (Knapton, 2012).

El método utiliza base mejorada con cemento como el material base. La guía permite intercambiar un material en otro durante el proceso de diseño, es decir el diseñador puede generar alternativas de diseño usando diferentes materiales y por tanto investigar un rango completo de opciones.

El procedimiento de diseño se basa en el principio de que el pavimento de adoquines es diseñado para mantenerse en servicio a través de la vida de diseño. En términos de comportamiento estructural, la falla en pavimentos para cargas pesadas ocurre por una deformación unitaria en compresión excesiva de la subrasante o una deformación unitaria en tensión excesiva en la base. Con deformaciones superficiales del orden de 50 mm a 75 mm, normalmente existe falla (Knapton, 2012).

El método utiliza gráficas, las cuales fueron producidas analizando pavimentos para cargas pesadas típicos mediante la técnica de elemento finito. El criterio de fatiga es tomado en cuenta mediante la definición de esfuerzos limitados a los que el pavimento estará expuesto ante la pasada de una carga.

Para limitar los esfuerzos, se utilizó un método semi empírico de diseño de pavimento para evaluar los niveles de esfuerzos en posiciones críticas en la estructura del pavimento. El método de calibración fue el método de diseño de pavimentos de carretera del Reino Unido modificado para adoquines de concreto. Este método se basa en British Standard (BS) 7533 que se deriva del UK Transport and Road Research Laboratory (TRRL) Road Note 29 y de la investigación original de AASHTO.

La norma BS 7533 se utilizó para producir una serie de ejemplos de diseño que cubren un amplio rango de situaciones de diseño de pavimento. Estos fueron analizados utilizando un modelo de elementos finitos elásticos lineales para este manual para establecer deformaciones permisibles. Las estructuras analizadas y finalmente utilizadas en la generación de las gráficas de diseño se muestran en el **Cuadro 32**:

Cuadro 32. Espesores utilizados en el análisis por elemento finito

CBR Subrasante	CBR 1%	CBR 2%	CBR 5%
Espeor coronamiento	600 mm	350 mm	Omitido
Subbase	150 mm	150 mm	150 mm
Ejes estándar (millones)	Espesor de Base		
0 a 1.5	100 mm	125 mm	125 mm
1.5 a 4	125 mm	125 mm	125 mm
4 a 8	175 mm	175 mm	175 mm
8 a 12	200 mm	200 mm	200 mm
12 a 25	225 mm	225 mm	225 mm

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

No es objetivo de este manual presentar una revisión exhaustiva de los criterios y métodos aplicados en el desarrollo de metodología propuesta, mayores detalles se pueden obtener en (Knapton, 2012).

7.3.2. Cargas

Las cargas son racionalizadas a una carga simple equivalente. El valor de la carga de diseño depende del rango de peso de contenedores que transitan. El diseño se basa en la carga crítica, la cual se define como la carga cuyo valor y número de repeticiones conduce a la mayor cantidad de daños en el pavimento. Pocas repeticiones de un valor de carga alto pueden infligir menos daño que un mayor número de cargas más pequeñas. Todo el perfil de carga debe expresarse como un número de pasadas de la carga crítica.

La evaluación de la carga crítica y el número efectivo de repeticiones se realiza de la siguiente forma:

$$D = (W/12,000)^{3.75} (P/0.8)^{1.25} N \quad \text{Ecuación 56}$$

Donde:

D = Efecto de daño

W = Carga de rueda correspondiente con un peso específico de contenedor (kg)

P = Presión de inflado (MPa)

N = Porcentaje de distribución de contenedores de 20 ft y 40 ft. Si se cuenta con información local propia del proyecto, se debe utilizar esta. Si no se cuenta con información, se puede emplear el **Cuadro A. 1**, que procede de estadísticas de puertos del Reino Unido.

Las cargas de diseño se estiman acorde al CAPITULO 4: CARGAS.

7.3.3. Efectos dinámicos

Los efectos dinámicos de la movilización y transporte de cargas, relacionados a aceleración, frenado e irregularidad de la superficie, son tomados en cuenta mediante el factor de f_d . Este factor se obtiene a acorde a tipo de condición y tipo de equipo, según se muestra en el **Cuadro 33**:

Cuadro 33. Factor dinámico f_d

Condición	Tipo de equipo	f_d ⁽¹⁾
Frenado	Cargador frontal	± 30 %
	Carretilla pórtico	± 50 %
	Cargador lateral	± 20 %
	Camión y remolque	± 10 %
Giros	Cargador frontal	40 %
	Carretilla pórtico	60 %
	Cargador lateral	30 %
	Camión y remolque	30 %
Aceleración	Cargador frontal	± 10 %
	Carretilla pórtico	± 10 %
	Cargador lateral	± 10 %
	Camión y remolque	± 10 %
Irregularidad Superficie	Cargador frontal	20 %
	Carretilla pórtico	20 %
	Cargador lateral	20 %
	Camión y remolque	20 %

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

Fuentes:

- (1) Fuente: Cuando apliquen dos o más condiciones dinámicas simultáneamente, el valor de f_d corresponde a la suma de los diversos valores que apliquen.

7.3.4. Cargas por contenedores

Para la estimación de carga y presiones relacionadas al apilamiento de contenedores, se debe consultar el **Cuadro 3**.

7.3.5. Factor de proximidad de carga

Si solo se considera la aplicación de una carga de rueda, la máxima deformación unitaria a tensión ocurrirá en el centro del punto de aplicación de la carga. Cuando dos o más cargas por ruedas están muy cercanas, el esfuerzo radial correspondiente a la carga crítica debe incrementado. Se aplica el concepto de “profundidad efectiva”, que representa la profundidad desde la superficie del pavimento hasta la parte inferior de la base, se estima de la siguiente manera:

$$300.3 \sqrt[3]{\frac{35000}{CBR \times 10}}$$

Ecuación 57

Donde:

CBR = Valor del CBR de la subrasante (%)

El **Cuadro 34** muestra el factor de proximidad como función de la separación de ruedas y de la profundidad efectiva, en caso de no tener valores exactos, se puede realizar interpolación lineal:

Cuadro 34. Factor de proximidad

Separación Ruedas (mm)	Profundidad efectiva		
	1016 mm	2032 mm	3048 mm
300	1.82	1.95	1.98
600	1.47	1.82	1.91
910	1.19	1.65	1.82
1220	1.02	1.47	1.71
1830	1.00	1.19	1.47
2440	1.00	1.02	1.27
3660	1.00	1.00	1.02
4975	1.00	1.00	1.00

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

7.3.6. Factores de conversión de material

La metodología de diseño planteada por (Knapton, 2012), fue elaborada utilizando como referencia una base granular tratada con cemento, con una resistencia a la compresión de 10.0 MPa y una resistencia a la flexión de 2.0 MPa. El espesor determinado mediante esta metodología puede ser transformado por un espesor equivalente de un material alternativo empleando el Factor de Conversión de Material, según se describe en el **Cuadro 35**:

Cuadro 35. Factor de conversión de material

Capa de pavimento	Modulo (MPa)	Resistencia Compresión (MPa)	Factor de Conversión
Concreto de calidad ⁽¹⁾	--	29.0	0.80
	--	38.6	0.70
Base tratada con asfalto ⁽²⁾	2414	--	0.93
	1172	--	1.40
	621	--	2.80
Base tratada con cemento	7586	10.0	1.00
	5655	5.5	1.27
	4276	2.9	1.75
	3241	1.0	2.80
Subbase granular	145	CBR = 100%	2.00
	94	CBR = 22%	2.80
	83	CBR = 15%	3.00
	48	CBR = 6%	4.67

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

Fuentes:

(1) Fuente: Medida a los 28 días de edad

(2) Fuente: Medida a los 7 días de edad

7.3.7. Cuadro y grafica de diseño

Finalmente, el método mostrado en (Knapton, 2012) para el diseño de pavimento de adoquines en obras portuarias, requiere de definir el espesor de: coronamiento, subbase y base.

Cuadro 36. Espesor de capas de fundación

CBR Subrasante	Coronamiento (mm)	Subbase (mm)
1.0 %	600	150
2.0 %	350	150
3.0 %	250	150
5 – 7 %	No requerido	225
> 7 %	No requerido	150

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

Para definir el espesor de base necesario, se debe determinar empleando la **Figura A. 19**, utilizando como parámetros de entrada la carga equivalente simple de diseño y cantidad de pasadas. Este espesor determinado, puede ser convertido a un espesor equivalente de otro material empleando el **Cuadro 35**.

7.3.8. Selección del tipo y espesor de adoquín

Según se explica en (Knapton, 2012), la experiencia previa en el diseño de pavimento de adoquines ha demostrado que se gana poco distinguiendo la rigidez ofrecida por la superficie de ruedo. Por tanto, la selección del material debe ser basada en factores funcionales más que en estructurales. En el caso de los adoquines, se tienen las siguientes restricciones:

- Deben ser colocados a 45° o en 90° con patrón de “espina de pescado”.
- Los adoquines deben cumplir con ASTM C936.
- Espesor mínimo de 80 mm.
- Deben ser colocados en una cama de arena con espesor entre 25 mm y 40 mm.
- Para efectos de diseño, se debe considerar un módulo elástico adoquín-cama igual a 2400 MPa con una relación de Poisson igual a 0.30.

7.3.9. Recomendaciones para elementos de restricción lateral

De acuerdo con Interlocking Concrete Pavment Institute (ICPI):

“Las restricciones de bordes son un componente esencial de los pavimentos adoquines. Las restricciones mantienen los adoquines firmemente juntos, lo que permite un entravamiento constante de las unidades en todo el pavimento. Previenen separarse por efecto de las fuerzas horizontales del tráfico.” (ICPI, 2019)

Se requieren restricciones a lo largo del perímetro de los pavimentos adoquines o cuando hay un cambio en el material del pavimento.

La regla general es que la base debe extenderse más allá de la restricción al menos la misma dimensión que el espesor del material base. Por ejemplo, una base de 150 mm de espesor debe extenderse al menos 150 mm más allá.

La **Figura 30** y **Figura 31** muestran las tipologías típicas de elementos de restricción o borde empleados lateralmente y en cambios de tipo de pavimento:

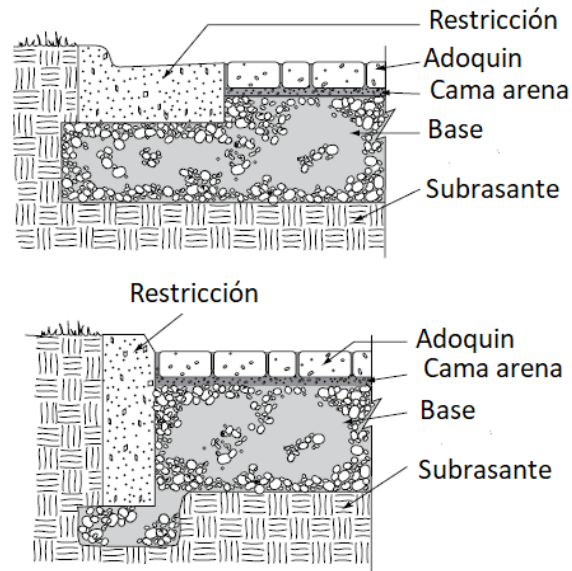


Figura 30. Tipos de restricciones laterales típicas
Fuente: Modificado de (ICPI, 2019)

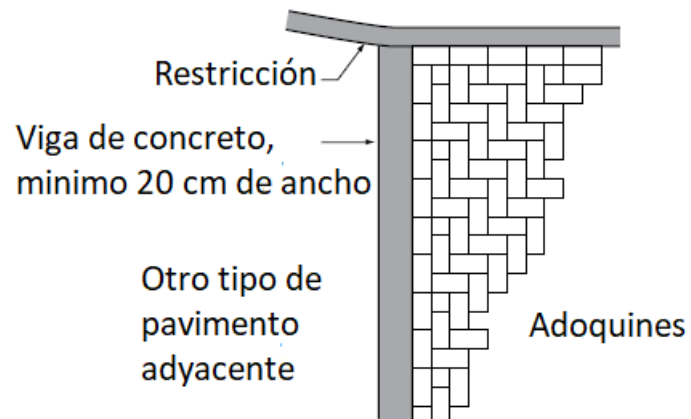


Figura 31. Vigas de concreto en transición de pavimentos
Fuente: Modificado de (ICPI, 2019)

CAPITULO 8: BIBLIOGRAFÍA

- (1) Asphalt Institute. (2006). *MS-23 Thickness Design: Asphalt Pavements for Heavy Wheel Loads*. Estados Unidos: The Asphalt Institute.
- (2) Echaveguren, T. (2013). *Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón*. Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.
- (3) Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. Ciudad de México, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- (4) Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Estados Unidos: Prentice Hall.
- (5) Knapton, J. (2012). *Port and industrial pavement design with concrete pavers: A comprehensive guide*. Inglaterra: Interlocking Concrete Pavement Institute.
- (6) Leiva, F. (2014). *Modulo Dinamico de Mezclas Asfálticas*. San José: LANAMME.
- (7) Murúa, R. S. (2020). *Manual de Diseño de Pisos Industriales*. Santiago, Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.
- (8) Nichol, & Moffat. (2010). *Container Terminal and Intermodal Rail Yard - Operational area consideration for pavement design*. Los Angeles, Estados Unidos: The port of Los Angeles.
- (9) Packard, R. (1996). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Estados Unidos: Portland Cement Association.
- (10) Puertos del Estado. (1994). *ROM 4.1-94 Proyecto y construcción de pavimentos portuarios*. Madrid, España: Ministerio de obras públicas, transportes y medio ambiente de España.
- (11) Royal Haskoning. (2010). *Paving design for container terminals*. United Kingdom: Royal Haskoning.

CAPITULO 9: ANEXOS

9.1. Catálogo de estructuras de pavimento acorde a ROM 4.1-94

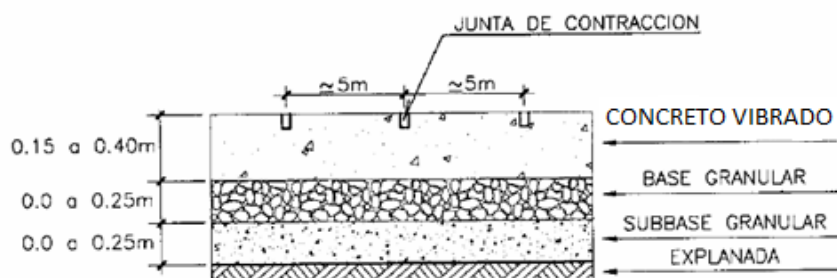


Figura A. 1. Pavimento de concreto vibrado

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

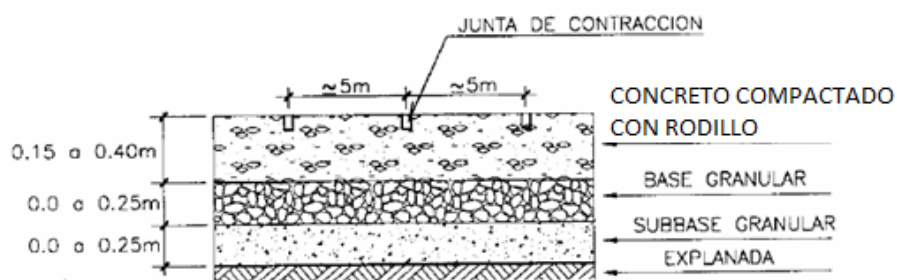


Figura A. 2. Pavimento de concreto compactado con rodillo

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

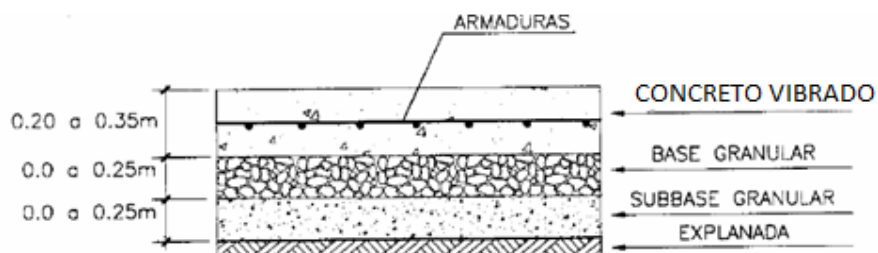


Figura A. 3. Pavimento de concreto armado

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

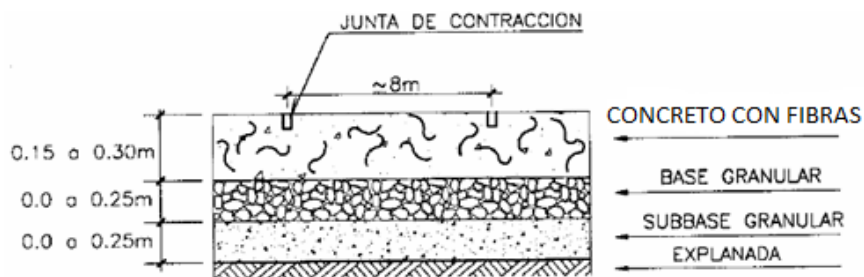


Figura A. 4. Pavimento de concreto armado con fibras

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

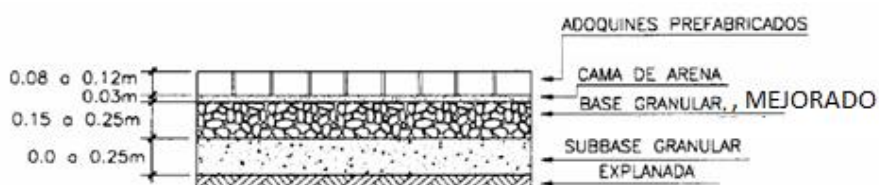


Figura A. 5. Pavimento de adoquines

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

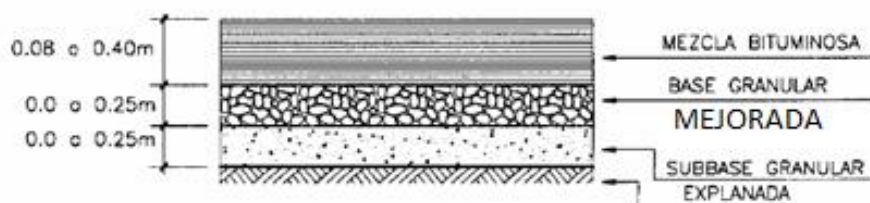


Figura A. 6. Pavimento asfáltico

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

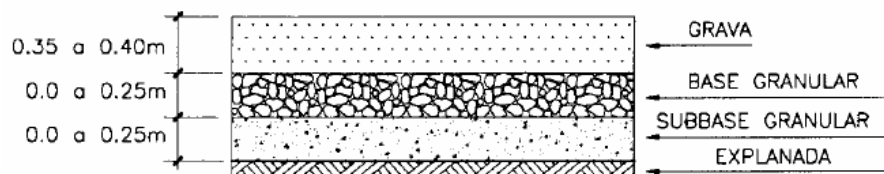


Figura A. 7. Superficie de grava

Fuente: Modificado de (Puertos del Estado, 1994)

9.2. Anexos asociados a la sección 7.1 Pavimento asfáltico

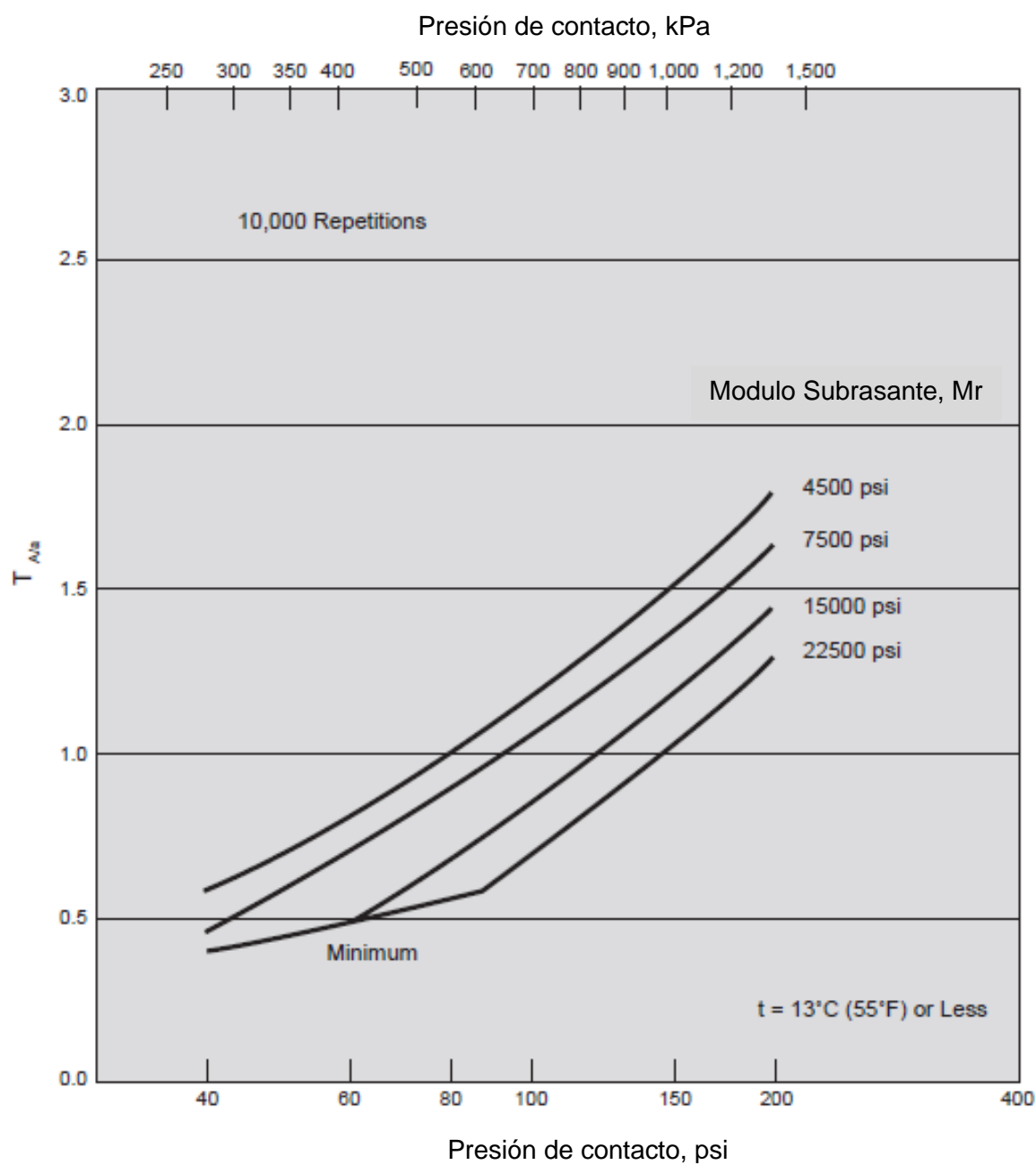


Figura A. 8. Grafica de diseño. Valores de diseño para $T_{A/a}$ – 10 000 Repeticiones
 Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

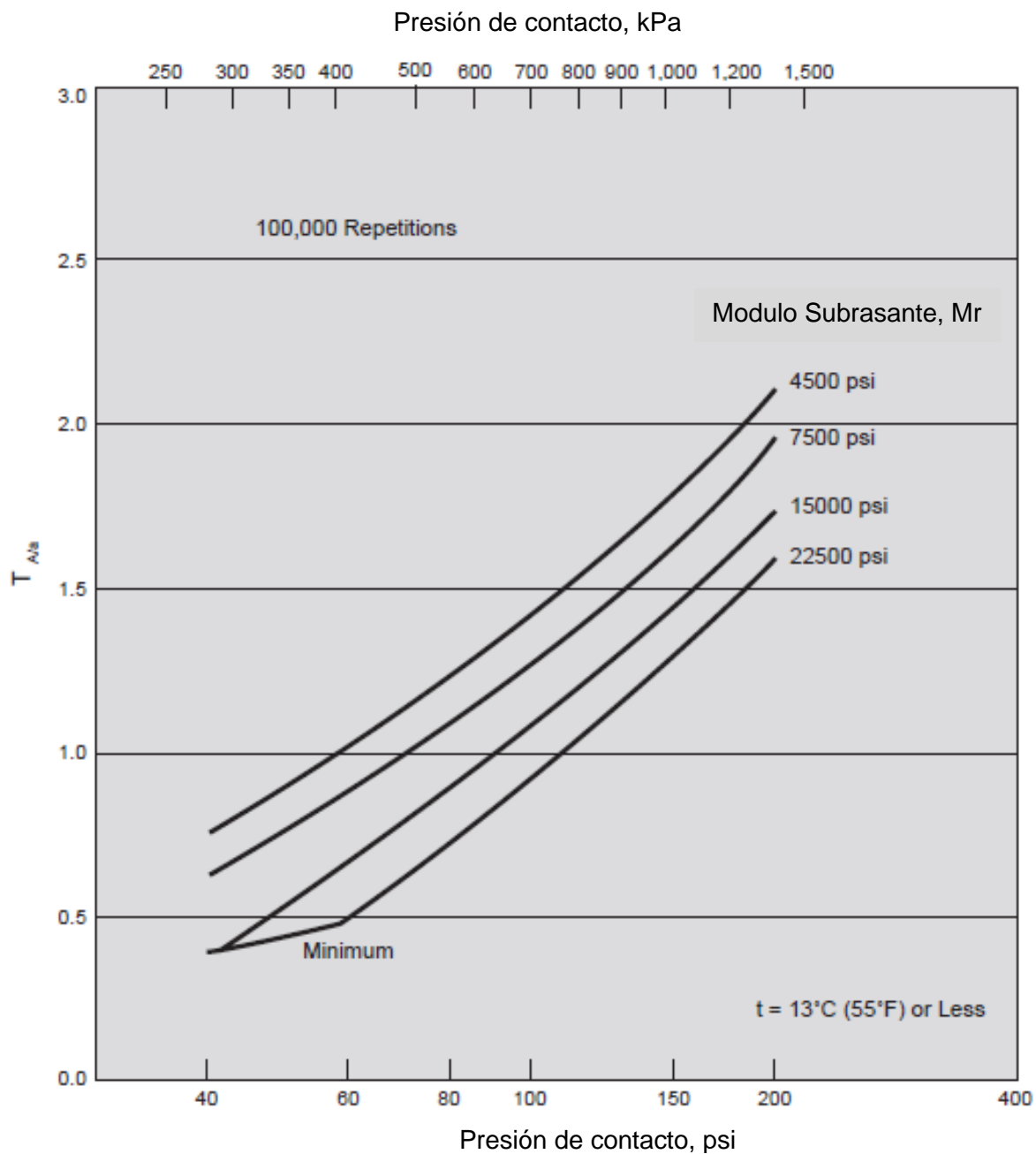


Figura A. 9. Grafica de diseño. Valores de diseño para $T_{A/a}$ – 100 000 Repeticiones

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

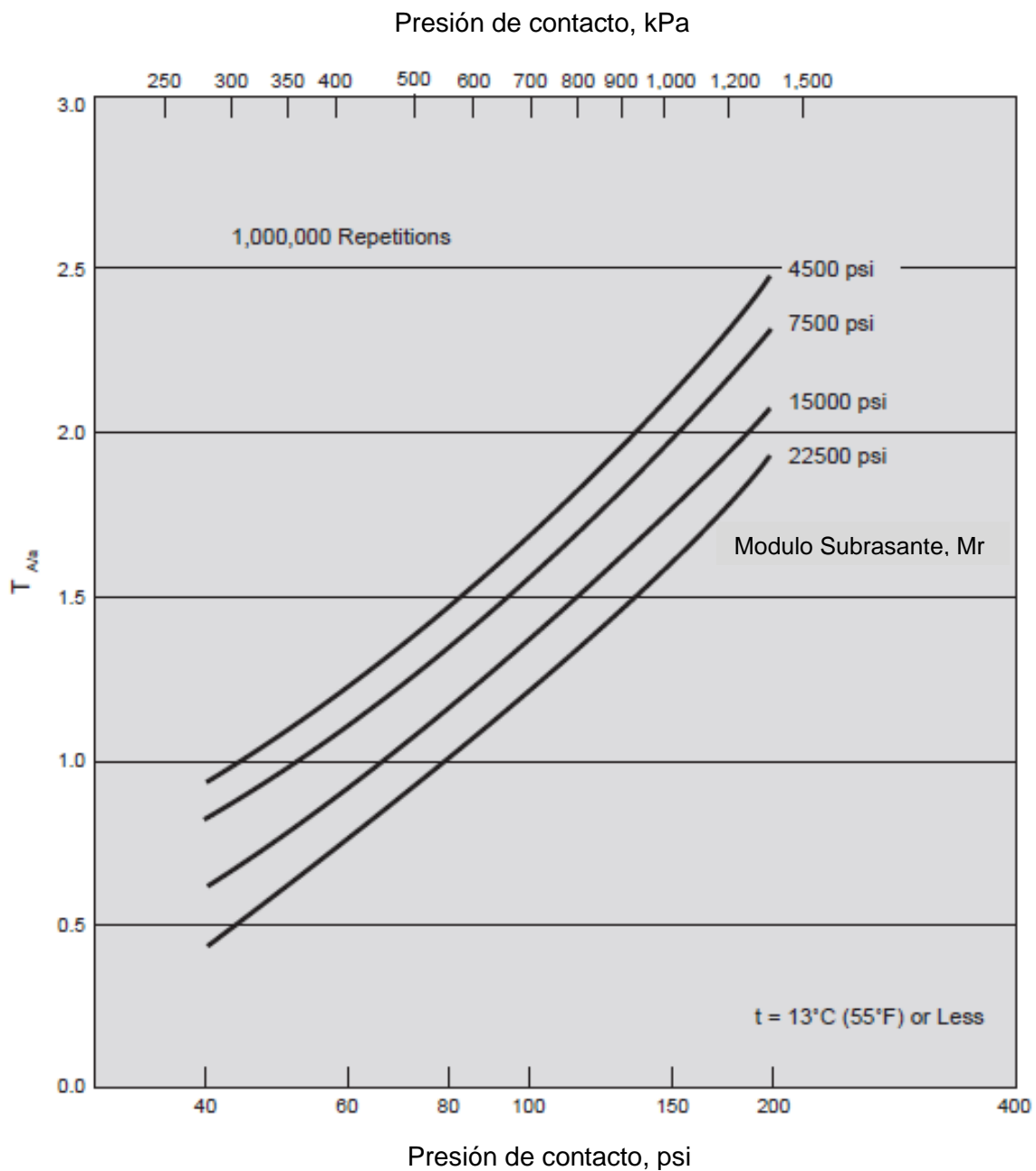


Figura A. 10. Grafica de diseño. Valores de diseño para $T_{A/a}$ – 1 000 000 Repeticiones
Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

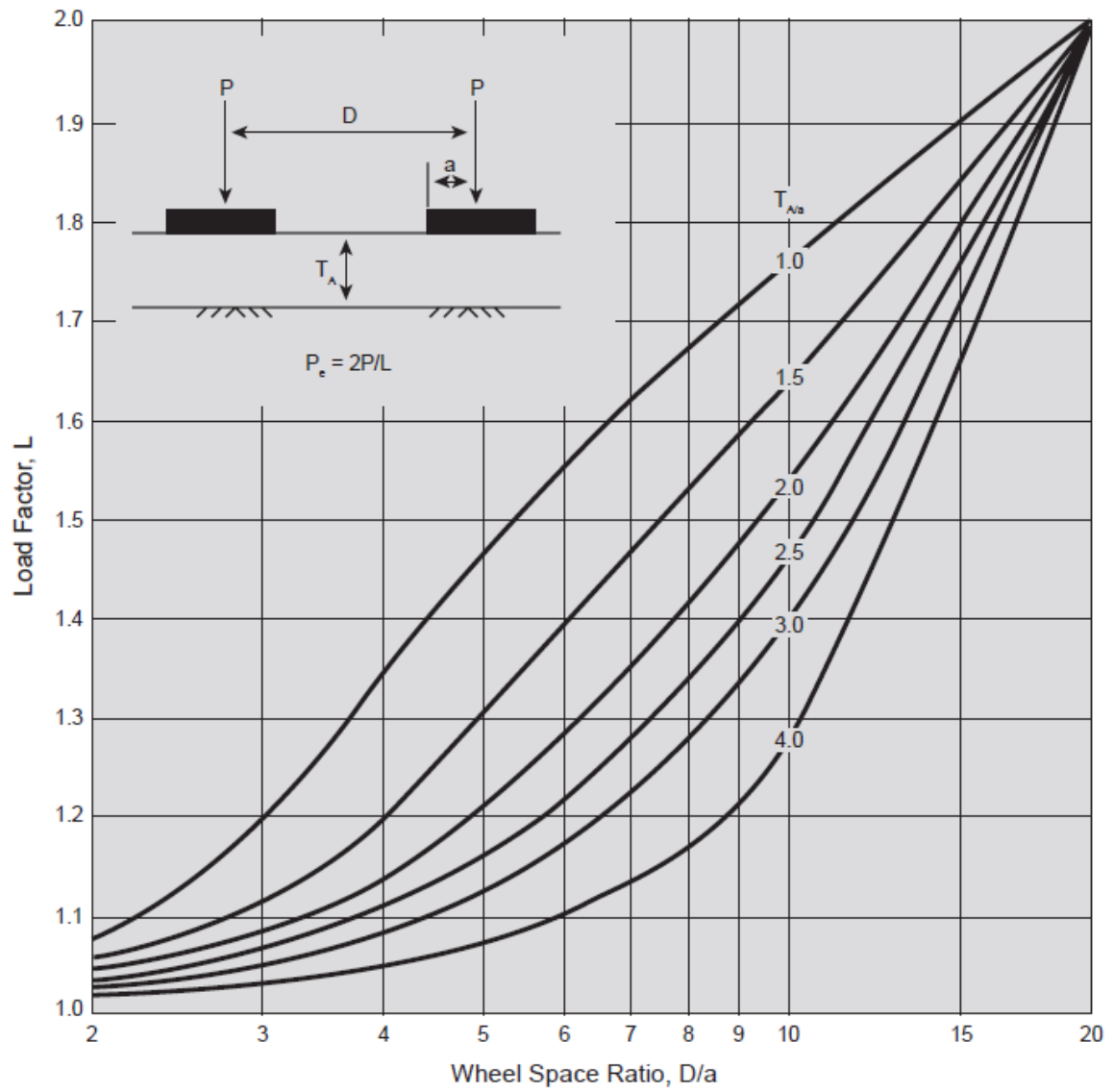


Figura A. 11. Factores de rueda dual

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

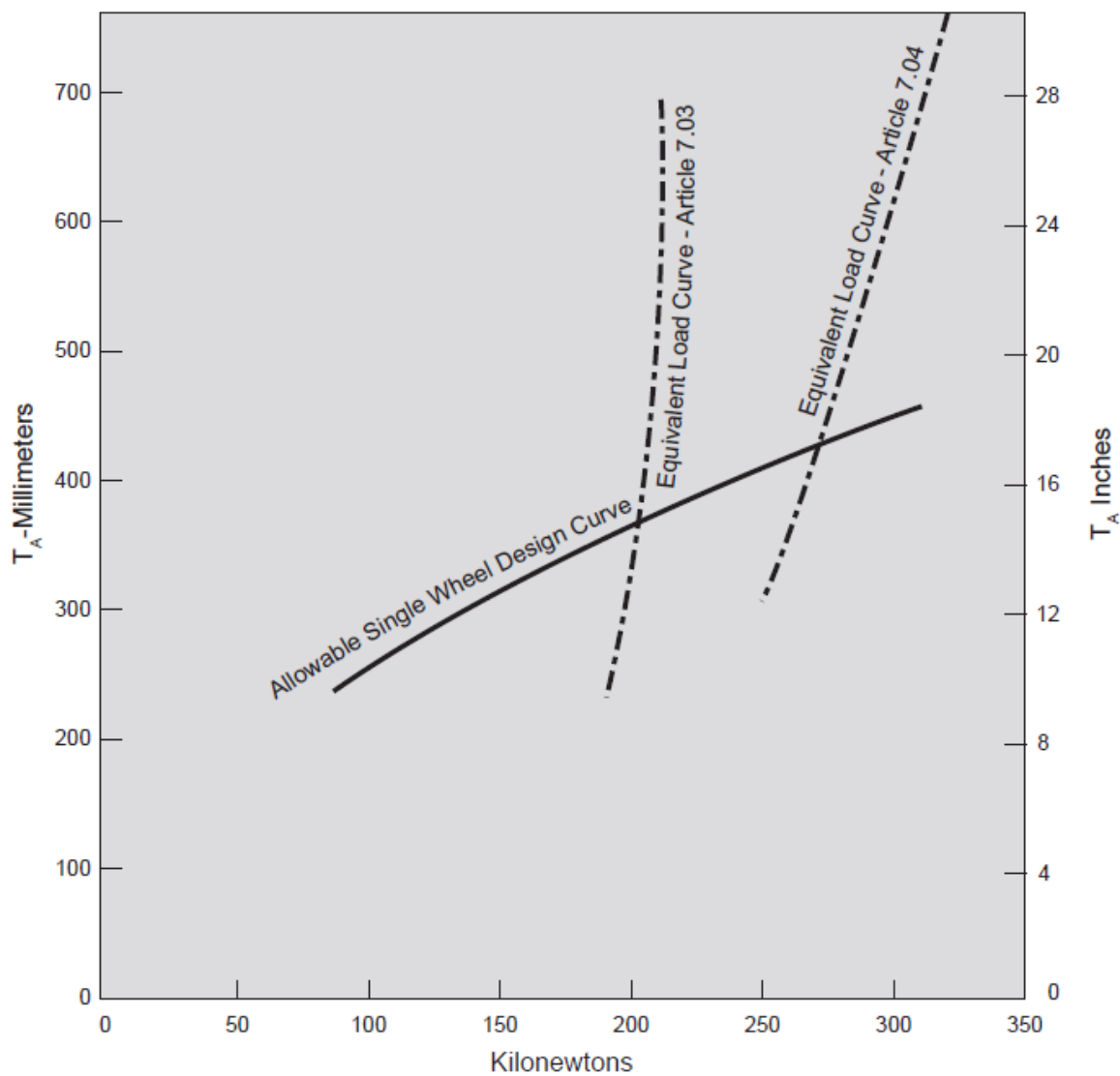


Figura A. 12. Ejemplo de curvas permisible y equivalente para la determinación de T_A

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

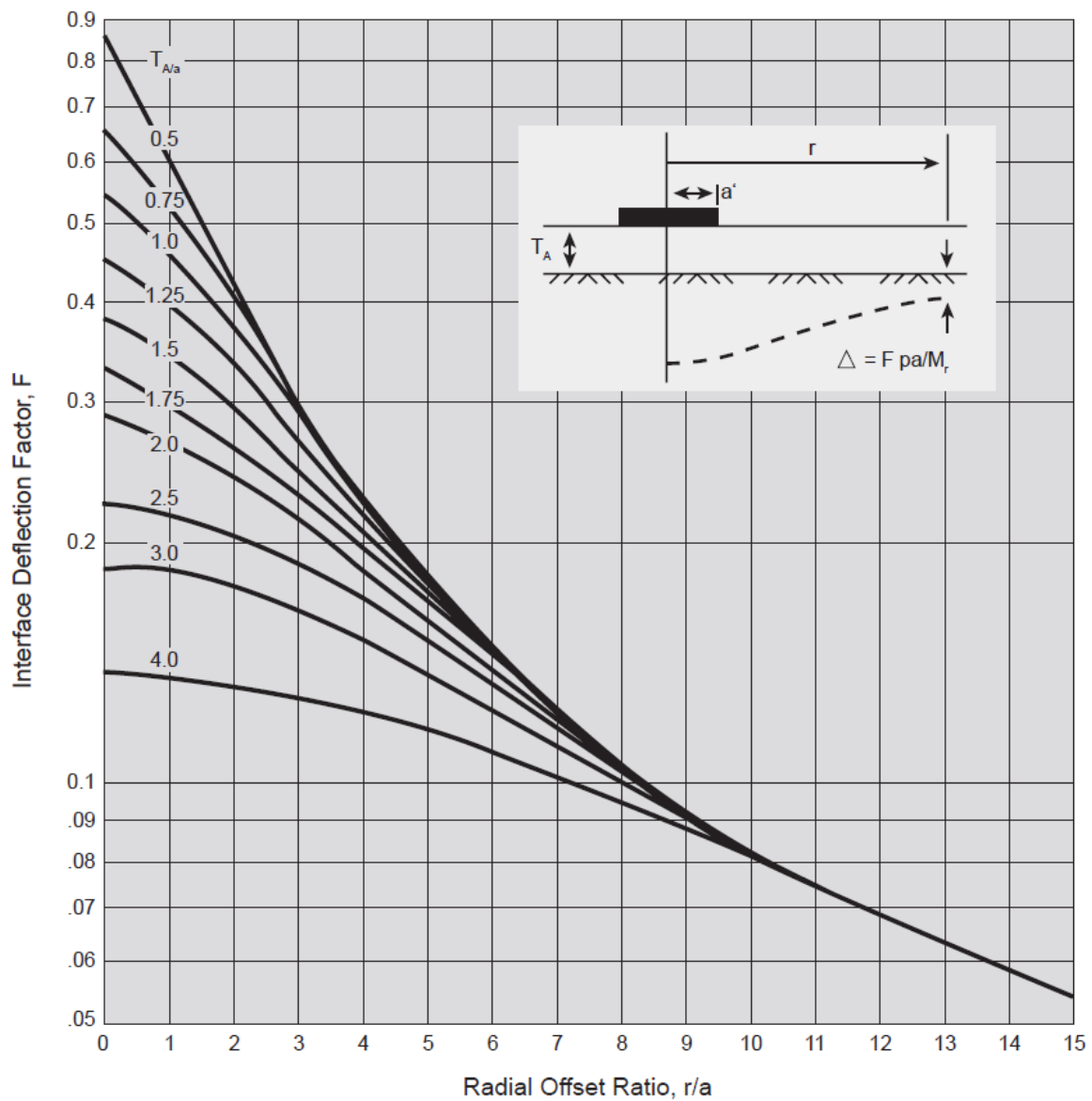


Figura A. 13. Múltiples ruedas - Factores deflexión de interface

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

T_A	Computation Point		Tire Number				$\Sigma\sqrt{P} F$	P_e
			1	2	3	4		
		P (lb) a (in) p (psi)						
in	m	r $T_{A/a}$ r/a F $\sqrt{P} F$						
	n	r $T_{A/a}$ r/a F $\sqrt{P} F$						
in	m	r $T_{A/a}$ r/a F $\sqrt{P} F$						
	n	r $T_{A/a}$ r/a F $\sqrt{P} F$						
in	m	r $T_{A/a}$ r/a F $\sqrt{P} F$						
	n	r $T_{A/a}$ r/a F $\sqrt{P} F$						

Figura A. 14. Cuadro ejemplo para determinación de $\Sigma\sqrt{P}$ y P_e

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

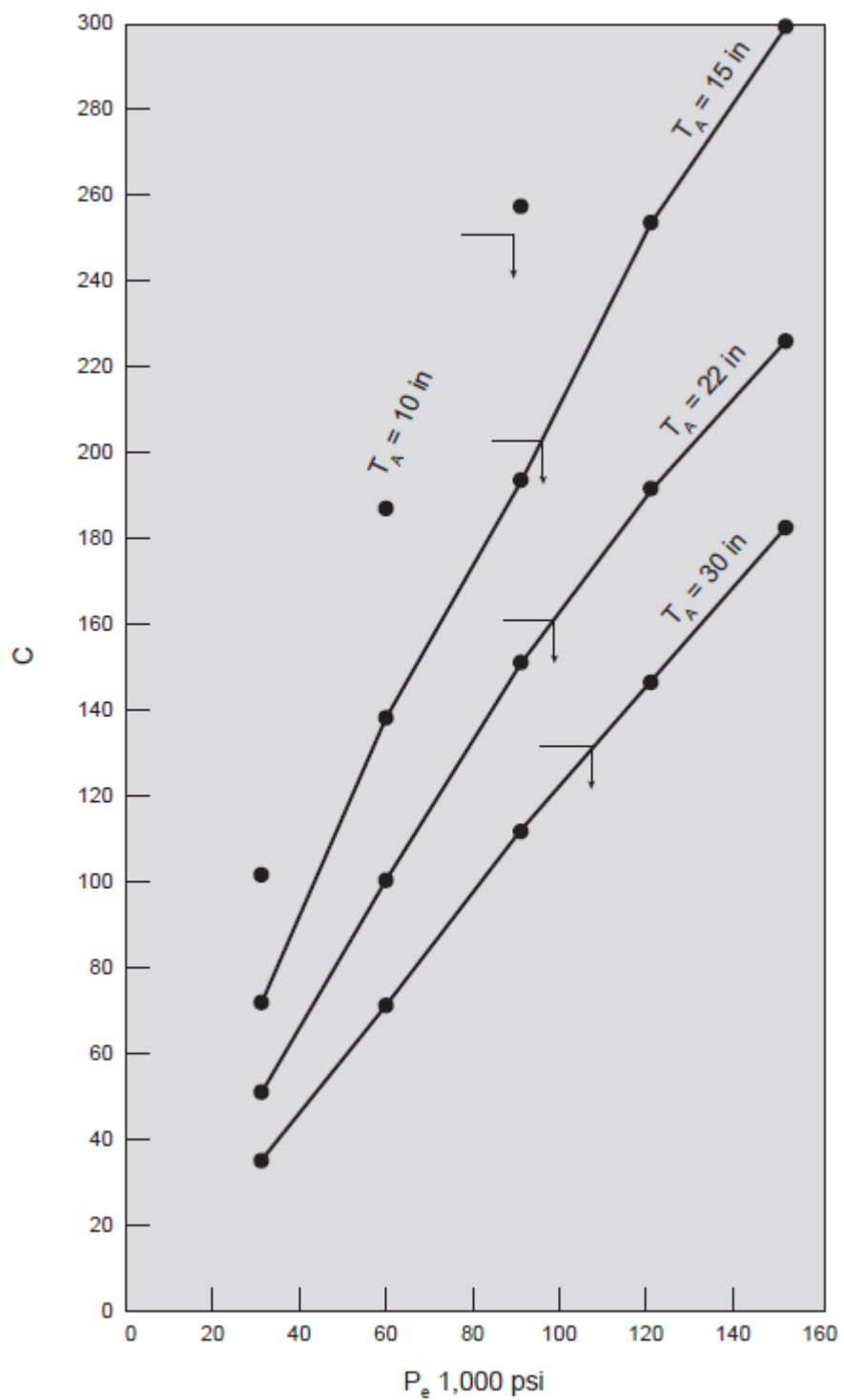


Figura A. 15. Ejemplo de curva de relación de P_e versus C

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

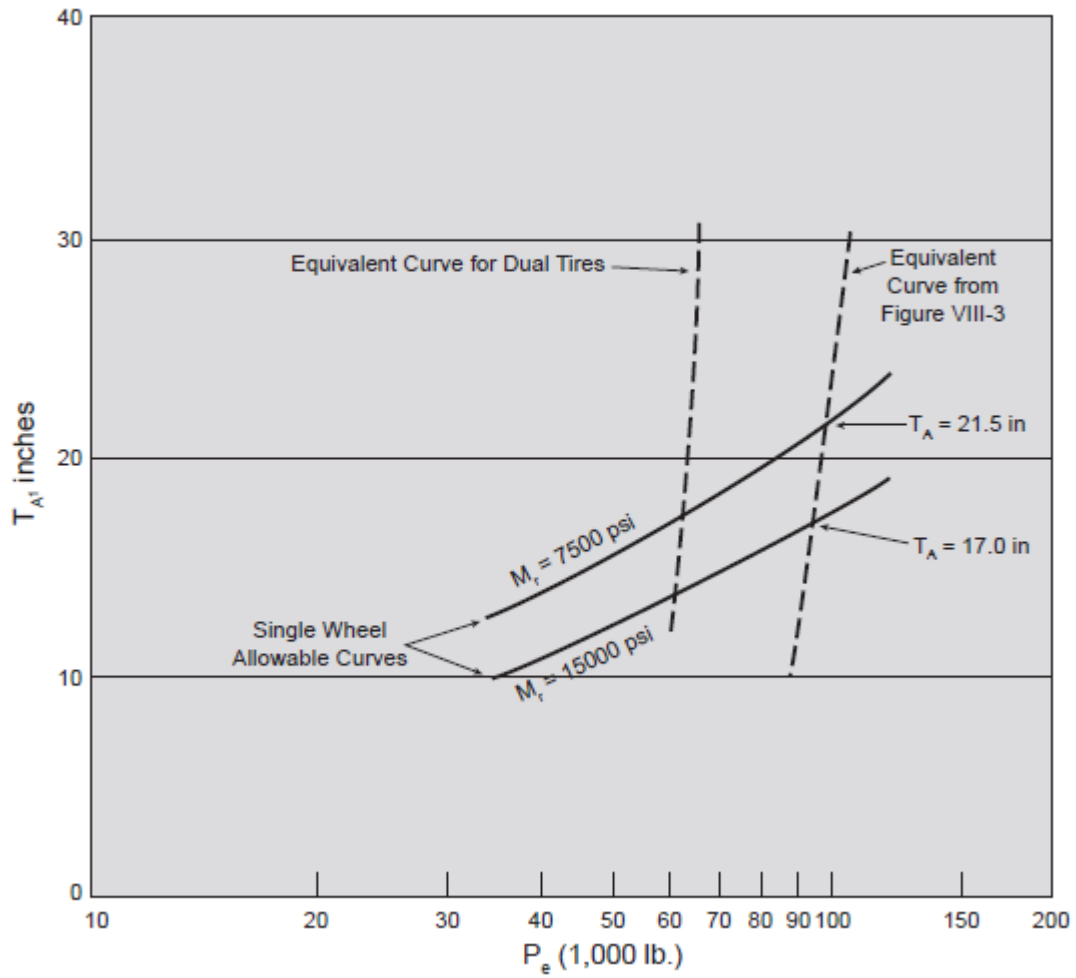


Figura A. 16. Ejemplo de solución de múltiples ruedas

Fuente: Modificado de (Asphalt Institute, 2006)

9.3. Anexos asociados a la sección 7.2 Pavimento concreto hidráulico

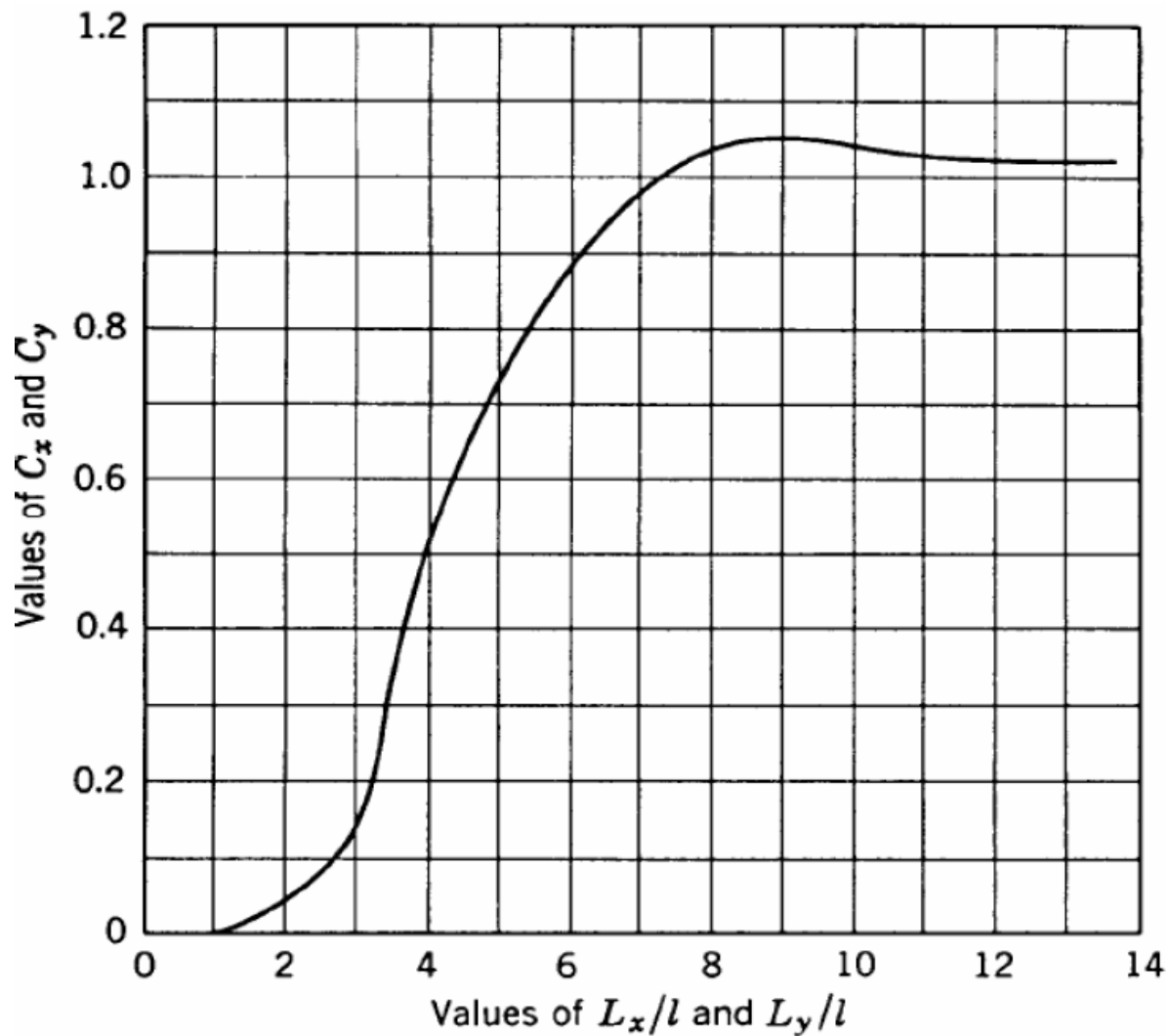


Figura A. 17. Factor de corrección - Caso placa finita

Fuente: Modificado de (Huang, 2004)

Example:

$$D_{SB} = 6 \text{ inches}$$

$$E_{SB} = 20,000 \text{ psi}$$

$$M_R = 7,000 \text{ psi}$$

$$\text{Solution: } k_{\omega} = 400 \text{ pci}$$

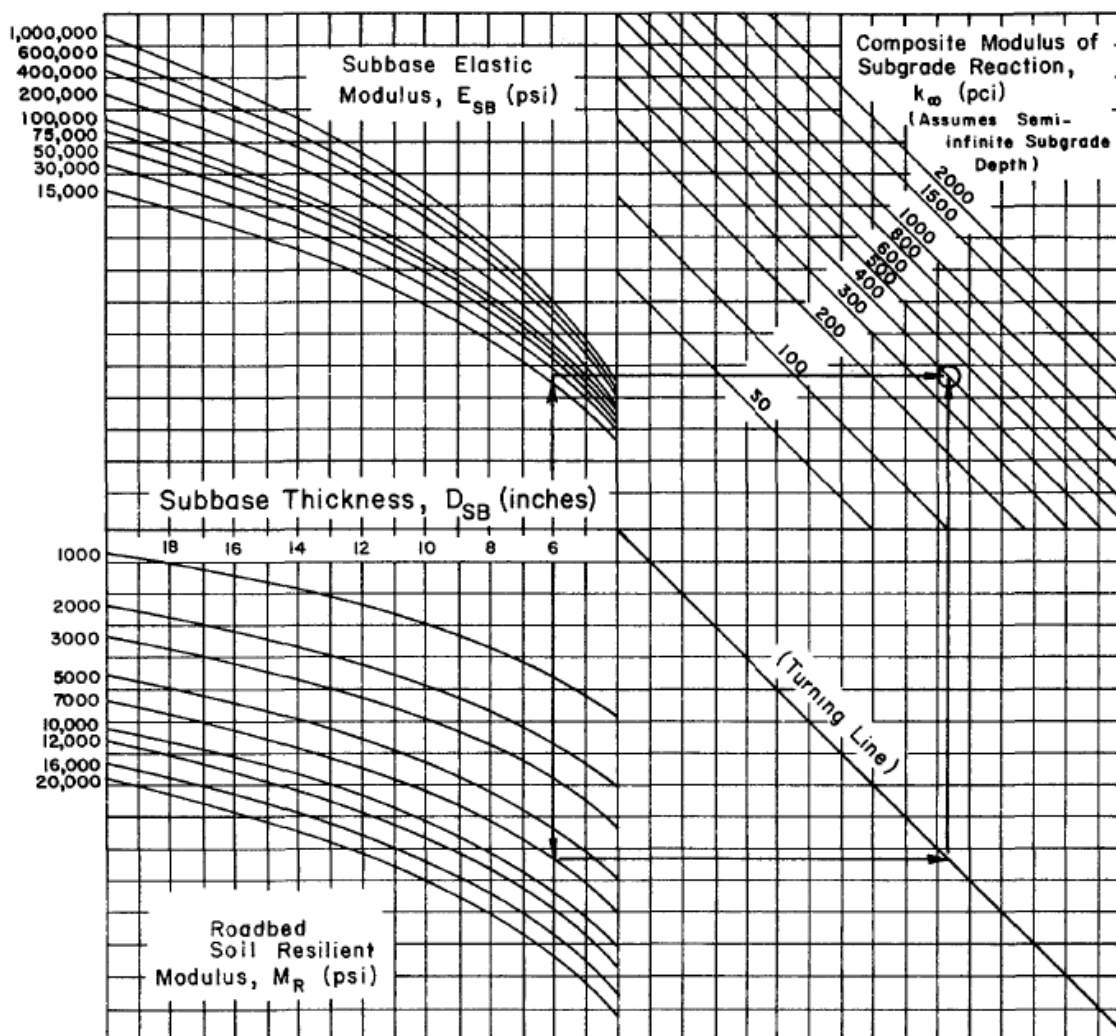


Figura A. 18. Determinación del módulo de reacción combinado K_{ω}

Fuente: Modificado de (AASHTO, 1993)

9.4. Anexos asociados a la sección 7.3 Pavimento de adoquines

Cuadro A. 1. Porcentaje de contenedores de diferentes pesos para cinco combinaciones de 40 ft (20 m) y 20 ft (6 m), derivado de estadísticas de puestos del Reino Unido

Peso Contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 ft (20 m) a 20 ft (6 m)				
	100 / 0	60 / 40	50 / 50	40 / 60	0 / 100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.18	0.23	0.28	0.46
3000	0.00	0.60	0.74	0.89	1.49
4000	0.18	1.29	1.57	1.84	2.95
5000	0.53	1.90	2.25	2.59	3.96
6000	0.98	2.17	2.46	2.76	3.94
7000	1.37	2.41	2.67	2.93	3.97
8000	2.60	3.05	3.16	3.27	3.72
9000	2.82	3.05	3.11	3.17	3.41
10000	3.30	3.44	3.48	3.52	3.66
11000	4.43	4.28	4.24	4.20	4.04
12000	5.73	5.24	5.12	4.99	4.50
13000	5.12	4.83	4.76	4.69	4.41
14000	5.85	5.38	5.26	5.14	4.67
15000	4.78	5.12	5.21	5.29	5.63
16000	5.22	5.58	5.67	5.76	6.13
17000	5.45	5.75	5.83	5.91	6.21
18000	5.55	5.91	6.00	6.10	6.46
19000	6.08	6.68	6.83	6.98	7.58
20000	7.67	8.28	8.43	8.58	9.19
21000	10.40	8.93	8.56	8.18	6.72
22000	9.95	7.60	7.02	6.43	4.08
23000	5.53	4.31	4.00	3.69	2.47
24000	2.75	1.75	1.50	1.25	0.24
25000	0.95	0.63	0.55	0.47	0.15
26000	0.67	0.40	0.33	0.27	0.00
27000	0.72	0.43	0.36	0.29	0.00
28000	0.53	0.32	0.27	0.21	0.00
29000	0.43	0.26	0.22	0.17	0.00
30000	0.28	0.17	0.14	0.11	0.00
31000	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00
32000	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00
33000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34000	0.05	0.03	0.02	0.02	0.00

Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

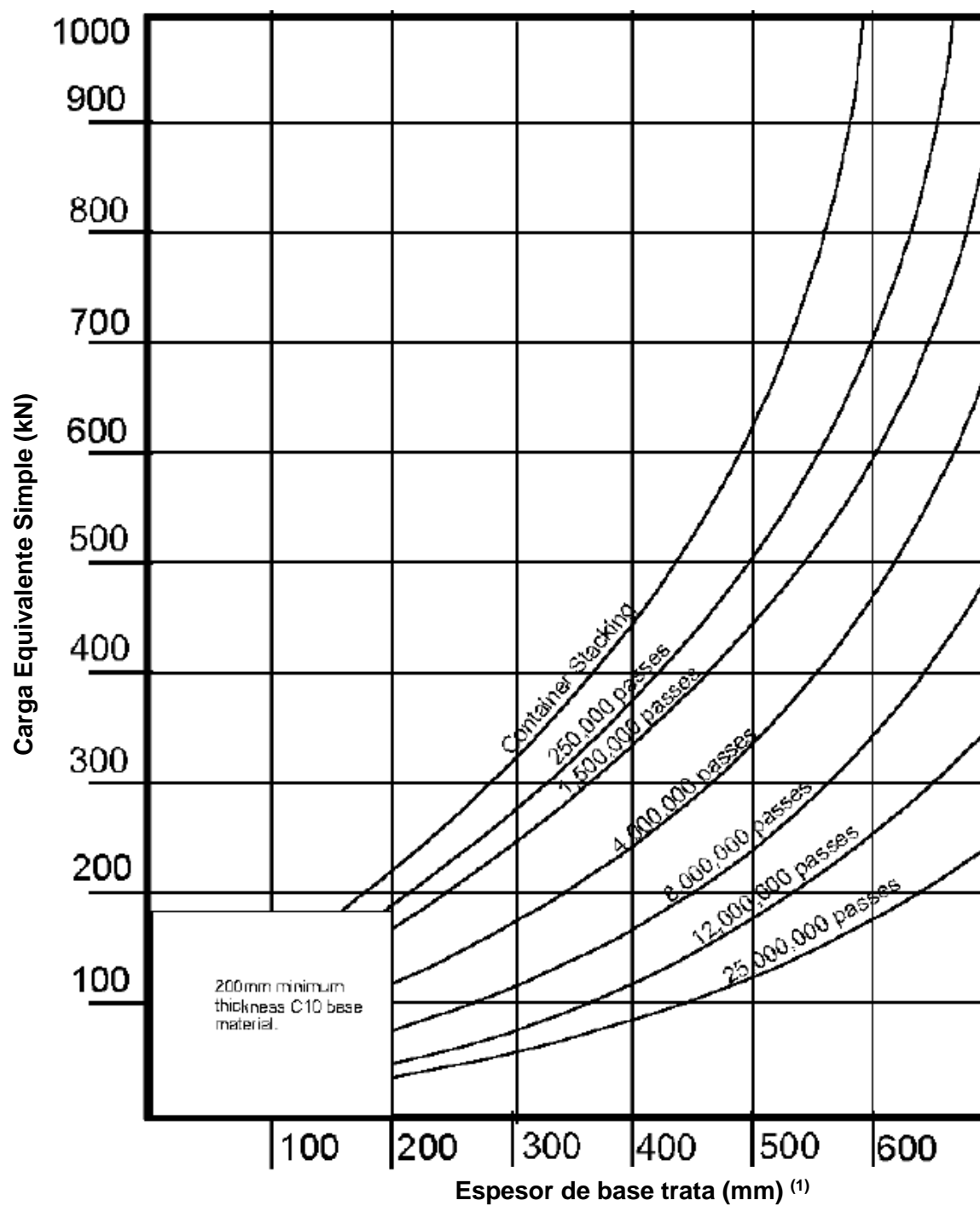


Figura A. 19. Grafica de diseño. Carga equivalente simple vs. Espesor de base trata
Fuente: Modificado de (Knapton, 2012)

Fuentes:

(1) Fuente: Material de referencia con 10 MPa de resistencia a la compresión simple a los 7 días de edad.