

**GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES  
APLICADA A COLOMBIA.**

ELBERT HERNÁN SUÁREZ JIMÉNEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL  
TUNJA  
2019

**GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES  
APLICADA A COLOMBIA.**

**ELBERT HERNÁN SUÁREZ JIMÉNEZ**

**Trabajo de tesis para optar el título de MAGISTER EN INGENIERÍA CON  
ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL**

**Director:  
Ing. M. Sc. Carlos Hernando Higuera Sandoval**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL  
TUNJA  
2019**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, Octubre de 2019.

A mi hijo Samuel Suarez Borda por ser el motor que hace avanzar mi vida y la razón para cumplir mis metas, a mi amada esposa Tatiana Borda por su sacrificio, esfuerzo y apoyo para alcanzar mis metas, a mí "Mechita" mi madre amada que con su increíble esfuerzo sentó las bases de todo lo que soy, y a mi padre y mis hermanos que sin su apoyo nada de esto sería posible.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor del presente trabajo de grado expresa sus agradecimientos a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), por permitir la formación de profesionales en la Maestría en Ingeniería con Énfasis en Infraestructura vial, en el mismo sentido a la escuela de posgrados por brindar a los estudiantes su apoyo y colaboración.

Al grupo de grupo de investigación y desarrollo en Infraestructura Vial (GRINFRAVIAL) por sus aportes y colaboración.

De manera particular al Ingeniero Carlos Hernando Higuera Sandoval por su infinita paciencia, dedicación, colaboración y soporte en la consecución de los objetivos del proyecto. así mismo al ingeniero Nicolás Echeverry Director de Infraestructura de la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.) y a la Zona franca de Tocancipá por permitirme la aplicación del proyecto

A la Ingeniera Sandra Yohana Benavides, Ingenieros Daniel Alberto Alcantar y Elías Ricardo Leal, y por su cooperación y aportes en el desarrollo de este proyecto, y a los Ingenieros docentes de la escuela de Ingeniería en Transporte y Vías, y Maestría en Ingeniería por sus conocimientos brindados.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>1 ASPECTOS GENERALES SOBRE PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES Y SUS CONFIGURACIONES</b> .....	17
<b>1.1 PUERTOS</b> .....	17
1.1.1 Generalidades.....	17
1.1.2 Clasificación de los puertos .....	19
1.1.3 Zonas de almacenamiento y operación .....	20
<b>1.2 ZONAS INDUSTRIALES</b> .....	24
<b>2 GENERALIDADES SOBRE EQUIPOS OPERADOS EN PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES EN COLOMBIA</b> .....	27
<b>2.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN LOS PUERTOS COLOMBIANOS</b> .....	27
<b>3 METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EN PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES</b> .....	46
<b>3.1 MANUAL BRITÁNICO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES (BPA)</b> .....	46
3.1.1 Materiales de pavimentos .....	47
3.1.2 Evaluación de cargas.....	51
3.1.3 Factores de proximidad de rueda.....	56
3.1.4 Diseño de fundaciones .....	65
3.1.5 Diseño de sobrecapas.....	66
3.1.6 Técnicas de sobrecapa alternativas.....	68
3.1.7 Cartas de diseño.....	71
<b>3.2 GUÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS INDUSTRIALES EN CONCRETO CON METODOLOGÍA PCA (PORLAND CEMENT ASSOCIATION)</b> .....	75
3.2.1 Subrasante y estructuras de soporte.....	75
3.2.2 Factores de junta.....	79
3.2.3 Factores de seguridad .....	80
3.2.4 Cargas aplicables a un piso industrial.....	80
<b>3.3 MANUAL DE DISEÑO DE PISOS INDUSTRIALES DEL INSTITUTO DE CEMENTO Y HORMIGÓN DE CHILE (ICH)</b> .....	94
3.3.1 Metodología de diseño del Instituto de Refuerzo con Cable (WRI).....	94

3.3.2	Metodología del cuerpo de ingenieros de EEUU.....	98
3.3.3	Pavimentos de concreto hidráulico de retracción compensada (HRC).....	101
3.3.4	Análisis estructural de las losas.....	104
<b>4</b>	<b>REVISIÓN Y COMPARACIÓN DE FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ACUERDO A LAS NECESIDADES, NORMAS Y MATERIALES COLOMBIANOS .....</b>	<b>108</b>
4.1	BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO.....	109
4.2	CONCRETO HIDRÁULICO.....	115
4.3	CONCRETOS ASFÁLTICOS.....	119
4.3.1	Comparación de calidades de los materiales granulares.....	119
4.3.2	Comparación de granulometrías para mezclas asfálticas.....	123
4.3.3	Comparación de requisitos de diseño de las mezclas asfálticas .....	130
4.4	MATERIALES GRANULARES TIPO BASE .....	135
4.5	ADOQUINES DE CONCRETO.....	136
4.6	PLANTEAMIENTO DE LA TABLA DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE MATERIALES APLICADOS A COLOMBIA.....	137
4.7	CAPAS DE SUBBASE Y RECUBRIMIENTO PARA CIMENTACIONES DE PAVIMENTOS INDUSTRIALES .....	138
<b>5</b>	<b>PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROCESO DE DISEÑO DE LA METODOLOGÍA ESCOGIDA PARA LA IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>142</b>
5.1	DISEÑO DE FUNDACIONES.....	143
5.2	DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES APLICANDO CARGAS ESTÁTICAS .....	144
5.3	DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES APLICANDO CARGAS DINÁMICAS .....	147
5.4	DISEÑO DE REHABILITACIÓN O SOBRECAPAS PARA PAVIMENTOS INDUSTRIALES APLICADOS A COLOMBIA.....	151
<b>6</b>	<b>APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES EN PROYECTOS COLOMBIANOS .....</b>	<b>155</b>
6.1	DISEÑO DE PAVIMENTO PARA LAS ÁREAS INDUSTRIALES DEL LOTE 72 DE LA FASE V DE LA ZONA FRANCA DE TOCANCIPÁ.....	155
6.1.1	Diseño de pavimento industrial de la bodega por medio de la metodología de diseño de pavimentos y áreas industriales propuesta .....	156
6.2	DISEÑO DE PAVIMENTO PARA EL TERMINAL GRANELERO EL BOSCOAL DEL PUERTO AGUADULCE DE BUENAVENTURA.....	172
6.2.1	Diseño de pavimentos industriales del terminal granelero Boscoal ..	174

<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>188</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>191</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>192</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>192</b>



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Buenaventura (*). .....	29
Tabla 2. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Santa Marta (*). .....	30
Tabla 3. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Barranquilla (*). .....	32
Tabla 4. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Cartagena (*). .....	33
Tabla 5. Clasificación de las mezclas estabilizadas con cemento y las características de resistencia a la compresión (*). .....	48
Tabla 6. Factores de Equivalencia de Materiales relacionados con C8/10 CBGM a otros materiales (*), (**). .....	49
Tabla 7. Porcentajes de contenedores de diferentes pesos para cinco combinaciones diferentes de contenedores de 40 y 20 pies derivados de las estadísticas proporcionadas por los puertos del Reino Unido. ....	52
Tabla 8. Tabla de factores de cargas dinámicas (fd). Las cargas estáticas se incrementan por las cifras porcentuales de la tabla. ....	54
Tabla 9. Cargas en el pavimento por apilamiento de contenedores llenos. ....	56
Tabla 10. Factores de proximidad de la rueda. ....	57
Tabla 11. Subbase sin compactar y espesores de recubrimiento para varios valores de CBR de la subrasante. ....	66
Tabla 12. Técnicas de sobrecapa alternativas sugeridas para cuatro tipos de pavimento existente. ....	68
Tabla 13. Factor de condición para grietas y astillamientos. ....	70
Tabla 14. Factores de condición para un grado máximo ahuellamiento localizado y asentamiento localizado. ....	70
Tabla 15. Carga distribuida permisible, con arreglos de carga variable. ....	90
Tabla 16. Cargas distribuidas permisibles, con carga de arreglo no definido o fijo (*). ....	92
Tabla 17. Categorías de índice de diseño utilizado con el método Cuerpo de Ingeniero de EEUU para la selección del espesor de la losa. ....	99
Tabla 18. Resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo de concreto .....	110
Tabla 19. Comparación entre los requisitos de los agregados para una base tratada con cemento entre normas INVIAS-2013 y normas Británicas. ....	111
Tabla 20. Comparación de factores de equivalencia de materiales para bases estabilizadas con cemento con normas del Reino Unido e INVIAS-2013. ....	114
Tabla 21. Comparación de módulos de rotura según normas BS e INVIAS-2013 .....	116
Tabla 22. Recomendaciones para agregados naturales de peso normal y pesado y para escoria de alto horno refrigerada por aire .....	117

Tabla 23. Factores de equivalencia de materiales para losas de concreto hidráulico con normas del Reino Unido e INVIAS-2013. ....	119
Tabla 24. Comparación Normas SHW Vs INVIAS-2013 de calidades de los materiales para mezclas asfálticas. ....	121
Tabla 25. Comparación de parámetros diseños por el método Marshall para mezclas de densas en caliente y mezclas de alto modulo entre las normas SHW Vs INVIAS-2013. ....	132
Tabla 26. Comparación de parámetros diseños por el método Marshall para mezclas de gradación discontinua abierta en caliente entre las normas SHW Vs INVIAS-2013. ....	133
Tabla 27. Comparación de parámetros diseños por el método Marshall para mezclas de gradación discontinua cerrada en caliente entre las normas SHW Vs INVIAS-2013. ....	134
Tabla 28. Factores de equivalencia de materiales para concretos asfalticos con normas del Reino Unido e INVIAS-2013. ....	135
Tabla 29. Factores de equivalencia de materiales para bases granulares con normas del Reino Unido e INVIAS-2013. ....	136
Tabla 30. Factores de equivalencia de materiales para adoquines de concreto con normas del Reino Unido e INVIAS-2013. ....	137
Tabla 31. Factores de Equivalencia de Materiales construibles bajo las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013. ....	138
Tabla 32. Subbase sin compactar y espesores de recubrimiento para varios valores de CBR de la subrasante aplicadas a Colombia. ....	140
Tabla 33. Ejemplo de organización de cálculos del espesor equivalente de pavimento para diseño de sobrecapas. ....	152
Tabla 34. Características de los equipos de diseño de la zona de bodega del proyecto. ....	157
Tabla 35. Factores dinámicos requeridos para el diseño. ....	159
Tabla 36. Calculo de carga por rueda con factores dinámicos ....	159
Tabla 37. Resumen de cálculos del diseño para montacargas de 20 toneladas. ....	161
Tabla 38. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos. ....	163
Tabla 39. Resumen de cálculos del diseño para montacargas de 20 toneladas. ....	166
Tabla 40. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos. ....	169
Tabla 41. Características de los equipos de diseño ....	173
Tabla 42. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de almacenaje del terminal granelero el Boscoal. ....	177
Tabla 43. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de almacenaje del terminal granelero el Boscoal. ....	180
Tabla 44. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de almacenaje del terminal granelero el Boscoal. ....	183
Tabla 45. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de almacenaje del terminal granelero el Boscoal. ....	185

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Puerto de Barranquilla, Colombia. ....	18
Figura 3. Configuración típica de un puerto colombiano. ....	19
Figura 4. Zona de almacenamiento y operación de un puerto colombiano. ....	21
Figura 5. Zonas complementarias en un puerto. ....	24
Figura 6. Configuración típica de una zona industrial colombiana. ....	26
Figura 7. Dimensiones y cargas principales de una grúa portuaria. ....	35
Figura 8. Dimensiones y cargas principales de una grúa móvil. ....	36
Figura 9. Dimensiones y cargas principales de una grúa de patio RTG. ....	37
Figura 10. Dimensiones y cargas principales de una grúa pórtico. ....	38
Figura 11. Dimensiones y cargas principales de apilador de alcance. ....	39
Figura 12. Dimensiones y cargas principales de apilador de levante. ....	40
Figura 13. Dimensiones y cargas principales de los remolques con plataforma. ....	41
Figura 14. Dimensiones y cargas principales de los tractocamiones. ....	41
Figura 15. Dimensiones y cargas principales de los cargadores frontales. ....	42
Figura 16. Dimensiones y cargas principales de los Minicargadores. ....	43
Figura 17. Dimensiones y cargas principales de las retroexcavadoras. ....	44
Figura 18. Dimensiones y cargas principales de los bulldozer. ....	45
Figura 19. Falla de la losa de concreto en la región de las piezas metálicas de la esquina del contenedor (*). ....	55
Figura 20. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de un cargador frontal o un apilador de alcance. ....	58
Figura 21. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de las grúas pórtico. ....	60
Figura 22. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de los elevadores laterales. ....	61
Figura 23. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de las grúas pórtico de patio RTG. ....	62
Figura 24. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas para sistemas de tractores y remolques. ....	63
Figura 25. Configuración típica de una grúa móvil. ....	65
Figura 26. Carta de diseño de espesor de la base para almacenamiento de contenedores (*). ....	72
Figura 27. Carta de diseño para el espesor de la base para equipos de manipulación de mercancías (*). ....	73
Figura 28. Diagrama e flujo de la metodología de diseño de pavimentos industriales de la BPA. ....	74
Figura 29. Capas de pavimento típicas en cuartos fríos y cámaras frigoríficas. ....	79
Figura 30. Carta de diseño para cargas en poste, con subrasante de módulo de reacción $k = 50 \text{ Lb/pulg}^3$ . ....	83
Figura 31. Carta de diseño para cargas en poste, con subrasante de módulo de reacción $k = 100 \text{ Lb/pulg}^3$ . ....	83

Figura 32. Carta de diseño para cargas en poste, con subrasante de módulo de reacción $k = 200 \text{ Lb/pulg}^3$ .....	84
Figura 33. Gráfica de diseño para la obtención de espesores de losa para ejes sencillos. ....	86
Figura 34. Gráfica de diseño para la conversión de ejes duales a ejes de carga equivalente. ....	87
Figura 35. Gráfica de corrección del área de contacto para diseño para ejes duales.....	88
Figura 36. Diagrama de flujo para el diseño de una losa a partir de la metodología de la PCA.....	93
Figura 37. Carta de diseño para el cálculo de la relación de la rigidez de la losa y la subrasante.....	95
Figura 38. Carta de diseño para cálculo de la carga de rueda. ....	96
Figura 39. Carta de diseño para el cálculo la tensión de tracción en la losa para cargas por rueda .....	97
Figura 40. Carta de diseño para el cálculo la tensión de tracción en la losa para cargas uniformemente distribuidas. ....	98
Figura 41. Carta de diseño del Cuerpo de ingenieros de EEUU para determinar el espesor de la losa de concreto según el índice de diseño.....	100
Figura 42. Cartas de diseño del método del Cuerpo de Ingenieros de EEUU para losas de piso de concreto con tránsito de equipos pesados.....	101
Figura 43. Diagrama de flujo de la metodología de diseño de pisos industriales ICH. ...	107
Figura 44. Comparación de las granulometrías del material de base de concreto hidráulico INVIAS-2013 BTC-38, BTC-25 y la mezcla granular tratada con cemento 1 – 0/31.5 –G1 y G2 BS EN 14227-1 .....	113
Figura 45. Comparación granulométrica de una mezcla AC 20 dense bin (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezclas densas en caliente (450-13) INVIAS-2013. ....	124
Figura 46. Comparación granulométrica de una mezcla AC 10 close surf (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezclas densas en caliente (450-13) INVIAS-2013. ....	125
Figura 47. Comparación granulométrica de una mezcla AC 6 close surf (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezclas densas en caliente (450-13) INVIAS-2013. ....	126
Figura 48. Comparación granulométrica de una mezcla HRA 55/10F (BS EN 6691-Anexo C) Vs Mezclas discontinuas en caliente (452-13) INVIAS-2013.....	127
Figura 49. Comparación granulométrica de una mezcla HRA 55/10F (BS EN 6691-Anexo C) Vs Mezclas discontinuas en caliente (452-13) INVIAS-2013.....	128
Figura 50. Comparación granulométrica de una mezcla HRA 55/10C (BS EN 6691-Anexo C) Vs Mezclas discontinuas en caliente (452-13) INVIAS-2013.....	129
Figura 51. Comparación granulométrica de una mezcla HDM 14, 10 y 6 surf 40/60 (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezcla de alto módulo MAM-25 (450-13) INVIAS-2013. ....	130
Figura 52 Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de fundaciones para pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia. ....	144
Figura 53. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia por cargas estáticas. ....	146
Figura 54. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia por cargas dinámicas. ....	150

Figura 55. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia por cargas dinámicas. ....	154
Figura 56. Ubicación Zona Franca de Tocancipá.....	155
Figura 57. Sectores a diseñar del lote 72 de la Zona Franca de Tocancipá.....	156
Figura 58. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 10 Ton .....	160
Figura 59. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 20 Ton .....	162
Figura 60. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto hidráulico en la zona de bodega.....	164
Figura 61. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de bodega.....	165
Figura 62. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en adoquines de concreto hidráulico en la zona de bodega.....	165
Figura 63. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 20 Ton .....	168
Figura 64. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto hidráulico en la zona de producción. ....	170
Figura 65. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción. ....	170
Figura 66. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción. ....	171
Figura 67. Ubicación terminal granelero Boscoal.....	172
Figura 68. Análisis de cargas de las bobinas de acero que se almacenaran en el terminal granelero. ....	173
Figura 69. Configuración en planta del terminal granelero Boscoal .....	174
Figura 70. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de almacenaje del terminal granelero Boscoal en el puerto Aguadulce.....	176
Figura 71. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de almacenaje del terminal. ....	178
Figura 72. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción. ....	178
Figura 73. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción. ....	179
Figura 74. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 18 Ton .....	182
Figura 75. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 25 Ton .....	184
Figura 76. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto hidráulico en la zona de operación de equipos del terminal.....	186
Figura 77. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de operación de equipos del terminal.....	187
Figura 78. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en adoquines de concreto hidráulico en la zona de operación de equipos del terminal. ....	187

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Metodologías de diseño empleadas .....	193
Anexo B. Diagramas de flujo de metodologías estudiadas .....	194
Anexo C. Comparaciones de materiales.....	195
Anexo D. Cálculos de los diseños realizados .....	196

## INTRODUCCIÓN

El proceso de globalización en la que se encuentra Colombia ha requerido que los puertos y las áreas industriales se fortalezcan día a día llegando a ser unos de las más competitivos de la región, esto ha implicado un proceso modernización y expansión de los puertos de país, generando consigo cambios de maquinarias para el movimiento de mercancías, construcción de nuevas áreas para el almacenaje de productos de importación y exportación, es por esto que el área de los pavimentos ha venido concientizándose de los nuevos retos que conllevan los diseños para los nuevos terminales y zonas industriales que actualmente se están desarrollando en el país.

Los puertos y las áreas industriales han visualizado que para mejorar su competitividad deben implantar políticas de desarrollo con equipos e infraestructura que mejoren los tiempos de operación, es por esto que en el área de los pavimentos industriales se ha optado por estructuras que tengan una vida útil muy larga, y que su vez no generen grandes mantenimientos, esto con el fin de evitar demoras en el transporte de mercancías detrás de los puertos o la áreas industriales y su vez a sus destinos finales.

Es por esto que el presente trabajo se pretende generar una alternativa metodológica para el diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales, este tipo de pavimentos en la actualidad se diseñan con metodologías que conllevan a pavimentos rígidos, es por esto que en el presente informe principalmente procura realizar la transferencia de tecnología de la cuarta edición del manual de diseño de la INTERPAVE llamado “The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries”, documento desarrollado por el PhD. John Knapton y publicado en el año 2007, adicionalmente a este documento se revisaron otros manuales o guías que se encuentren a nivel mundial, y se generó finalmente una guía aplicable a los puertos colombianos, la cual se plantea sean una alternativa para los diseñadores de la infraestructura portuaria del país, es preciso indicar que el presente trabajo hace parte de las investigaciones que adelanta el grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GRINFRAVIAL de la Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia UPTC, el cual busca desde la academia dotar a los profesionales del país con nuevas técnicas para el diseño y construcción de la infraestructura vial de Colombia.

Con la generación de esta guía metodológica lo que se persigue es que se convierta en una herramienta útil para los diseñadores de este tipo de estructuras los cuales podrán hacer uso de esta metodología para dimensionar los pavimentos de tipo industrial de una forma ágil, la guía igualmente establece aplicaciones para pavimentos bajo las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013 lo que junto con un buen criterio ingenieril del diseñador pueda conllevar a diseños de pisos industriales de buena calidad.



## 1 ASPECTOS GENERALES SOBRE PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES Y SUS CONFIGURACIONES

Un área industrial es una zona en donde se sitúan una gran cantidad de empresas y fabricas con el fin de transformar y/o manufacturar diversos productos, generalmente estas quedan en sectores apartados de las poblaciones por la contaminación de todo tipo que generan y a su vez por qué requieren áreas extensas para el almacenamiento de materias primas y productos elaborados en dichas fábricas<sup>1</sup>. Por otra parte, los puertos cumplen en cierta medida para las mismas funciones que el área industrial, sin embargo, estos están en gran medida destinados a al almacenamiento de mercancías para su posterior transporte, situación por la cual los puertos generalmente disponen de áreas amplias de almacenamiento y a su vez de una variedad de equipos para la manipulación de mercancías.

### 1.1 PUERTOS

Un puerto es el lugar natural o construido en la costa o en las orillas de un río, defendido de los vientos y dispuesto para detenerse las embarcaciones y para realizar las operaciones de carga y descarga de mercancías, embarque y desembarco de pasajeros, etc.<sup>2</sup> Los puertos en habitualmente tienen diferentes propósitos por lo cual sus composiciones pueden cambiar sin embargo en general cuentan con obras exteriores o de abrigo, obras interiores de atraque, infraestructuras de acceso y construcciones o instalaciones complementarias.

**1.1.1 Generalidades.** Colombia cuenta con nueve zonas portuarias, siete de ellas en la Costa Caribe: la Guajira, Santa Marta, Ciénaga, Barranquilla, Cartagena, Golfo de Morrosquillo, Urabá y San Andrés, y dos en el Pacífico: Buenaventura y Tumaco. Sin embargo, dentro de estos se destacan 4 como los principales puertos nacionales, Cartagena, Barranquilla, Santa Marta y Buenaventura, los tres primeros están situados en la costa atlántica mientras que el último está en la zona del pacífico. Los puertos de la costa atlántica dan conexión con: América Central, América del Norte y Europa, mientras que el puerto del pacífico nos permite la conectividad con América del Sur, la costa oeste de América del Norte y Asia, en la Figura 1 se ilustra un puerto colombiano típico.

---

<sup>1</sup> <http://conceptodefinicion.de/zona-industrial>

<sup>2</sup> <http://dle.rae.es>

Figura 1. Puerto de Barranquilla, Colombia.



Fuente: Sociedad portuaria regional de Barranquilla consultada el 24 de Marzo de 2018

Un puerto generalmente dependiendo de su vocación y ubicación se configura de acuerdo a sus necesidades, sin embargo, un puerto normalmente está compuesto por 4 diferentes zonas como se muestra en la Figura 2:

- a) Zona marítima. Destinada al barco, y en la que se disponen las obras de abrigo que protegen la zona de atraques del oleaje exterior, constituidas fundamentalmente por los diques; las obras de acceso que facilitan el acceso del barco al puerto en condiciones de seguridad, garantizando su maniobrabilidad, anchura y calado adecuados.
- b) Zona terrestre: destinada fundamentalmente a la mercancía, incluye la superficie de operación terrestre constituida por los muelles, que además de facilitar el atraque y amarre de los barcos, sirven de soporte al utillaje y de acopio provisional de mercancías; y los depósitos que además de adecuar un espacio a las mercancías, sirven de regulación de los flujos marítimo-terrestres.
- c) Zona de evacuación: Destinada al transporte terrestre, en la que se debe diferenciar las vías de acceso al puerto desde la red de carreteras general, las de circunvalación o reparto y las de penetración a la zona de operación terrestre, con sus áreas de maniobra y estacionamiento.
- d) Zona de asentamiento de industrias básicas. Ocasionalmente puede ubicarse en los puertos unas zonas dedicadas a siderurgias, astilleros, petroquímicas, refinerías, etc.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> <http://es.wikipedia.or>

Figura 2. Configuración típica de un puerto colombiano.



Fuente: Sociedad portuaria regional de Barranquilla consultada el 24 de marzo de 2018

**1.1.2 Clasificación de los puertos<sup>4</sup>.** Los puertos de pueden clasificar de acuerdo a los 4 criterios que se describen a continuación:

a) **Clasificación física:** Según Rúa Costa la manera de fundar una clasificación física de un puerto se debe tener en cuenta diferentes aspectos como son, si es natural o artificial y a su vez la ubicación del puerto que puede ser en el mar, fluvial, el un lago etc.

Así mimo se plantea que según la National Geospatial-Intelligence Agency de los Estados Unidos considera 8 clases de puertos según su clasificación física: costero natural, costero con rompeolas, costero con esclusas, fluvial natural, fluvial con dársenas, fluvial con esclusas, en canal o lago, en mar abierto o cargaderos libres.

<sup>4</sup> Costa, C. R. (2006). Los puertos en el transporte marítimo. Grupo de ingeniería de la organización y logística industrial, p. 9-10.

b) **Clasificación funcional**<sup>5</sup>: Los puertos funcionalmente se pueden clasificar en: comerciales, industriales, pesqueros, de refugio, militares, etc. Sin embargo, los puertos industriales y comerciales se pueden subclasificar dependiendo del tipo de carga que se manipule dentro de estos, a su vez es muy habitual que los puertos sean de carácter multipropósito, esto quiere decir que pueden manejar y almacenar varios tipos de cargas especializadas, esta condición es la que se presenta en su mayoría en los puertos colombianos.

c) **Clasificación en función a su titularidad y Gestión**: Los puertos pueden ser públicos y privados, cuando son privados pueden depender administrativamente del gobierno nacional, departamental o municipal. En lo referente a su gestión esta se puede realizar por el dueño directamente, sin embargo, normalmente se encarga a una entidad externa pública o privada de la administración del puerto generalmente denominada autoridad portuaria.

d) **Clasificación en función del nivel de desarrollo de los servicios prestados**: Como expresa Rúa Costa en la década de los 90 la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, por sus siglas en inglés, United Nations Conference on Trade and Development) efectuó una clasificación de los puertos en la cual tuvo en cuenta las diferentes generaciones de puertos que para el caso las dividieron en tres etapas generacionales: puertos de primera generación son los que se desarrollaron antes de la década de los 60, la segunda generación es la que está entre los años 60 y 80, en estos ya se comenzaron a especializar los puertos y por último la tercera generación de los puertos son los desarrollados a partir de la década de los 80 los cuales corresponden a puertos totalmente especializados y con predominio de la unitización de cargas.

**1.1.3 Zonas de almacenamiento y operación.** Como se dijo anteriormente y como se muestra en la Figura 3 un puerto se construye para permitir el cargue y descargue de barcos. Para ello, una parte indispensable en un puerto son las zonas de acopio provisional de mercancías y la evacuación de las mismas a través de los modos disponibles en cada puerto, que necesitan ser lo suficientemente amplias para que permitan operaciones de cargue y descargue de las mercancías y pasajeros que ingresen al puerto. Además de eso, necesitan ser adecuadas para las diferentes mercancías incluyendo los diferentes tipos de acopio y por la forma de presentación de la misma.

---

<sup>5</sup> Ibíd., p. 10.

Por otro lado, la clasificación de las zonas de almacenamiento se puede hacer atendiendo a diversas consideraciones<sup>6</sup>:

- Cubiertas o descubiertas; las zonas cubiertas pueden ser a su vez abiertas o cerradas.
- Según la altura de apilamiento de los contenedores.
- Por el tiempo de estancia de la mercancía dentro del puerto.
- Por la naturaleza de la mercancía (minerales, contenedores, chatarra, etc.)
- Por la forma de presentación de la mercancía (mercancía general, graneles sólidos, contenedores, etc.)

Figura 3. Zona de almacenamiento y operación de un puerto colombiano.



Fuente: Sociedad Portuaria Regional de Barranquilla consultada el 24 de marzo de 2018

En los puertos colombianos, las zonas de almacenamiento están hechas generalmente de asfalto, concreto o adoquines en concreto, sin embargo, en algunos casos y para algunas mercancías en especial están constituidas en tierra o en afirmado. Teniendo en cuenta que las mercancías en el puerto son almacenadas

---

<sup>6</sup>Comisión Técnica de la Presidencia de los Puertos del Estado, Recomendaciones para obras marítimas (ROM). Versión 4.1, 1994. p. 33

por tiempos cortos estos cuentan con zonas destinadas a la salida y entrada de las mercancías que se conectan las vías de acceso al puerto, adicionalmente normalmente se cuenta con espacios para las maniobras de los equipos y así mismo de zonas de estacionamientos para equipos en general.

1.1.3.1 Clases de zonas de almacenamiento y operación<sup>7</sup>. La presentación de las mercancías y su manipulación normalmente deben ser consideradas para la elección del tipo de pavimento a utilizar, por este motivo las clases de almacenamiento y operación de los diferentes tipos de puertos con sus posibles efectos en los pavimentos se describen a continuación:

a) **Graneles líquidos:** El almacenamiento de estos materiales se realiza en tanques de diferentes tipos a su vez la manipulación se realiza de manera continua por medio de equipos e instalaciones específicas, comúnmente los inconvenientes de estos tipos de almacenamientos es la cimentación de los tanques y los equipos los cuales deben cumplir con las especificaciones particulares de cada uno de ellos. Sin embargo, dentro de estas zonas normalmente existen vías pavimentadas para la circulación de vehículos carreteros por lo cual desde el punto de vista de los pavimentos se les debe dar el mismo tratamiento que a los accesos y parqueaderos de los puertos.

b) **Graneles sólidos:** Son sectores de un puerto en el cual se almacenan productos no ensilados que pueden ser mercancías ordinarias como los con los cereales y alimentos alimenticios los cuales se caracterizan por tener un peso específico bajo o medio, o también puede tratarse graneles sólidos pesados que generalmente minerales, chatarra etc. Este tipo de acopios generalmente son cónicos lo que permite que las cargas transmitidas a los pavimentos sean relativamente bajas, sin embargo, las cargas impuestas por los equipos de manipulación pueden ser considerables además de erosionar la superficie del pavimento.

c) **Mercancía general.** Se debe distinguir principalmente la clase de mercancía general que se va a manejar que puede ser de tipo convencional o pasada, en el primer caso las alturas de apilamiento de estibas, ensilados, cajas, sacos etc, son relativamente pequeñas y se disponen de zonas exclusivas para la circulación de los equipos de manipulación por lo que las cargas inducidas al pavimento son moderadas, sin embargo, los equipos de manipulación dependiendo de su configuración pueden generar cargas importantes. En el caso de las mercancías pesadas como lo son bobinas de acero, madera, perfiles de acero etc. Las cargas

---

<sup>7</sup> Ibíd., p. 33-34.

se incrementan sustancialmente debido a que se pueden almacenar las mercancías directamente o en su defecto se puede disponer de durmientes para su disposición.

d) **Contenedores:** Generalmente son zonas descubiertas en donde se acopian los contenedores, estos pueden estar dispuestos directamente sobre la superficie del pavimento o sobre otros contenedores, dependiendo de los equipos utilizados las alturas de los contenedores pueden ser hasta de 5-7 unidades (12 a 16.8 m), dependiendo de la configuración de la zona de acopio y de los equipos que se dispongan para la manipulación de las mercancías, así mismo se pueden distribuir los contenedores por filas simples o por bloques, estas áreas deben disponer de vías para el movimiento de los equipos. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto estas áreas están expuestas a cargas concentradas de gran magnitud.

e) **Estacionamiento de semirremolques:** Estas zonas básicamente se deben considerar dentro de un diseño de pavimentos para puertos o áreas industriales, esto debido a que normalmente se transportan cargas de grandes magnitudes como son bobinas, piezas industriales etc., por este motivo el tratamiento de estas zonas es diferente al carretero. En estos sectores de acopio se produce la descomposición de las cargas en la del remolque y en el carro de tracción, normalmente en estas zonas de almacenamiento se disponen solo de los remolques mientras que la cabeza tractora está en constante movimiento, teniendo en cuenta estas condiciones este tipo de áreas no requieren equipos especializados para el movimiento de las cargas.

a. Vías de comunicación: Estos sectores están destinados normalmente al tránsito de los vehículos con los diferentes tipos de mercancías, estas vías conectan las zonas de operación con las zonas de almacenaje y a su vez con las zonas exteriores del puerto. En cuanto a los pavimentos de estos sectores normalmente se diseñan con los procedimientos de diseño para vehículos de transporte carreteros.

b. Zonas complementarias: Estas se refieren a las zonas urbanizadas en donde se encuentran las oficinas, edificios y áreas administrativas, dentro de esta espacio se incluyen también las zonas complementarias destinadas a los estacionamientos de vehículos livianos y también pesados como se muestra en la Figura 4. En lo referente a los pavimentos si bien se tiene que la circulación de estas zonas está destinada a vehículos carreteros, se deben tener las precauciones del caso y así identificar dependiendo de las cargas a las que se van a ver expuestas la metodología de diseño a utilizar, bien sean industrial o convencional para carreteras.

Figura 4. Zonas complementarias en un puerto.



Fuente: Sociedad Portuaria Regional de Cartagena S.A consultada del 24 de marzo de 2018

## 1.2 ZONAS INDUSTRIALES.

Se denomina una zona franca o una zona industrial a un “área geográfica delimitada del territorio nacional, en donde se desarrollan actividades industriales de bienes y de servicios o actividades comerciales, bajo una normatividad especial en materia tributaria, aduanera y de comercio exterior”<sup>8</sup>. Dentro de un área industrial se agrupan una serie de bodegas o naves industriales la cuales prestan diferente servicios industriales dependiendo de la vocación de cada una, como se ve en la Figura 5.

Una bodega industrial es toda aquella edificación la cual este destinada a satisfacer las necesidades de almacenamiento y producción de la zona industrial. Dependiendo de necesidades de las industrias, las bodegas pueden tener diferentes configuraciones atendiendo a las necesidades para la cual se construye, estas pueden ser: rectangular, cuadrada en L, en H o en U<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> [http://www.mincit.gov.co/minindustria/publicaciones/16371/definicion\\_-\\_zonas\\_franclas](http://www.mincit.gov.co/minindustria/publicaciones/16371/definicion_-_zonas_franclas)

<sup>9</sup> BRAVO, David Alejandro. Metodología para el Control de Calidad en la Construcción de Naves Industriales. Trabajo de grado maestría en ciencias. Monterrey.: Instituto Tecnológico de estudios superiores de Monterrey. Escuela de Ingeniería y Tecnologías de Información, 2011 p. 4



Sin importar la configuración que se seleccione los componentes de una bodega industrial comprende 6 actividades primordiales<sup>10</sup>:

a) **Terraplén:** Es un relleno de materiales seleccionados y compactados técnicamente, cuya finalidad es servir de soporte a cualquier obra de infraestructura. Según las normas INVIAS 2007<sup>11</sup> el terraplén está compuesto de tres partes o zonas constructivas: cimiento, núcleo y corona, los cuales debes construirse y controlarse de acuerdo con las especificaciones que le apliquen.

b) **Cimentación:** Una cimentación es todo aquel elemento que tiene como intención la transmisión de las cargas de una estructura al suelo sobre el que se apoya una estructura, distribuyéndolas de tal manera que no supere la resistencia del suelo.

c) **Estructura metálica:** se entiende a una estructura e construcción que en su mayoría está compuesta por partes metálicas. En cuanto a las bodegas industriales es habitual que se utilicen este tipo de estructuras las cuales tienen una serie de bondades que se pueden aprovechar el máximo en estas zonas.

d) **Muros:** Se especifica como una construcción vertical que generalmente sirve para delimitar y proteger un área o edificación, la cual dependiendo de la función con la que se construya puede utilizarse como muro portante, aislante y de separación.

e) **Cubierta:** Es el conjunto de elementos que se construye en la zona superior de una estructura la cual cumple las funciones de proteger a estructura del intemperismo.

f) **Pisos:** Un pavimento o piso industrial es una “estructura formada por una o varias capas de materiales seleccionados que se construyen técnicamente sobre la sobrasarte, y es capaz de resistir las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medio ambiente, así como transmitir al suelo apoyo o fundación de esfuerzo y deformaciones tolerables, además de proporcionar la circulación de vehículos con rapidez, comodidad, seguridad y economía”<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> *Ibíd.*, p. 5-23.

<sup>11</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Artículo 220- 07. Bogotá: INVIAS, 2007

<sup>12</sup> HIGUERA, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Principios fundamentales, el tránsito, factores climáticos y geotecnia vial, volumen I. Tunja: UPTC, 2011. p. 14-15

Figura 5. Configuración típica de una zona industrial colombiana.



Fuente: zona franca de Bogotá (ZFB) consultada el 24 de marzo de 2018

## **2 GENERALIDADES SOBRE EQUIPOS OPERADOS EN PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES EN COLOMBIA.**

Los puertos y áreas industriales en Colombia con el pasar de los años han venido teniendo grandes avances en lo referente a la adquisición de equipos especializados, los puertos como el de Santa Marta, Cartagena, Barranquilla y Buenaventura han realizado grandes inversiones para contar con equipos que les permitan optimizar la operación de las mercancías y de esta manera hacerse más competitivos con respecto a los diferentes puertos de la región, de igual manera las zonas industriales en las principales capitales del país han venido modernizándose y acoplándose a las necesidades del mercado, sin embargo, es todavía un reto para los puertos y áreas industriales colombianos estar a la vanguardia en lo referente a equipos de movimiento de cargas ya que en los últimos años la desaceleración de comercio mundial ha hecho que los equipos utilizados sean más eficientes, lo cual le permite a los puertos ser más competitivos atendiendo toda la demanda requerida.

Para entender un poco más de cómo está el país en lo referente los equipos que operan los puertos en Colombia a continuación se describen los equipos de los principales puertos del país.

### **2.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN LOS PUERTOS COLOMBIANOS**

Los puertos colombianos manejan todo tipo de cargas como lo son hidrocarburos, carbón, mercancía contenerizada, graneles sólidos, por lo que son catalogados como multipropósito, la dinámica de los puertos en Colombia hace necesario el tener diversidad de equipos para el manejo de las cargas que se mueven a diario.

Teniendo en cuenta lo que se especificó en el capítulo 1 las principales zonas portuarias del país son en el océano pacífico el puerto de Buenaventura y en el océano Atlántico los puertos de Cartagena, Barranquilla y Santa Marta. En el presente capítulo se relacionando los aspectos técnicos relevantes para los diseños de pavimentos de estas 4 zonas portuarias.

Así mismo es de relevancia tener en cuenta que las características de los equipos varían según el fabricante. Cabe mencionar que muchas veces estos equipos son hechos a medida, según los requerimientos del cliente, por lo que en ocasiones estos valores son usados como referencia más que nada.

A continuación se presentan los equipos con los que cuentan actualmente los puertos principales mencionados anteriormente, las características de los puertos y sus equipos fueron consultados en la página de la superintendencia de industria y comercio de Colombia en su apartado de puertos marítimos<sup>13</sup>. Así mismo en las tablas se presentan las características relevantes para el diseño de pavimentos de los equipos, los cuales están basados en los catálogos de cada uno de estos.

a) **Puerto de Buenaventura:** Está ubicado en el departamento del Valle del Cauca en la costa pacífica colombiana y es catalogado como el puerto más importante del país de al movilizar cerca del 60% de la carga que sale de Colombia. En la Tabla 1 se presentan el número de equipos y las características de los mismos con los que afrontan los movimientos de mercancías dentro de las instalaciones portuarias.

---

<sup>13</sup> <http://www.supertransporte.gov.co>

Tabla 1. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Buenaventura (\*).

Equipo	Cantidad (Un)	Peso propio (Ton)	Capacidad de carga	Numero de ejes (Un)	Número de ruedas en el eje crítico (Un)	Separación entre ejes (mm)	Ancho de vía (mm)
Grúa móvil multipropósito	2	371	104 Ton	9	8	2260/2830/2260/ 21300 2260/2830/2260	4380
Grúa portuaria sobre ruedas	4	412	60.0 Ton	2	2	1076/2082/1076/ 3912 1076/2082/1076	3320
Grúas de graneles solidos	4	415	700 Ton/hr	10	4	700/1352/700/ 2540 700/1352/700	3300
Grúa pórtico de patio (RTG) 4+1 x 6 filas ancho	6	68	40 Ton	4	2	2100/3500/2100	17024
Grúa pórtico de patio (RTG) 5+1 x 6 filas ancho	10	72	40 Ton	4	2	2100/3500/2100	19656
Apilador de alcance 6 alto	7	70.8	40 Ton	2	4	6500	3300
Apilador de alcance 5 alto	8	69	40 Ton	2	4	6500	2980
Apilador de levante	14	71.6	35 Ton	2	4	5900	3030
Montacargas	3	35.7	25 Ton	2	4	4318	2712
Apilador de alcance 4 alto	3	73	35 Ton	2	4	6000	2750
Cargador de alcance para contenedores vacíos	2	30	7 Ton	2	4	4200	1994
Remolques con plataforma	92	11.3	40 Ton	2	4	5950/11070/1270	2154
Tractocamiones con plataforma	55	17	40 Ton	5	4	5950/11070/1270	1980
Montacargas	110	4.7	3 Ton	2	2	1700	1000
Montacargas	20	9.3	7 Ton	2	4	2250	1474

Equipo	Cantidad (Un)	Peso propio (Ton)	Capacidad de carga	Numero de ejes (Un)	Número de ruedas en el eje crítico (Un)	Separación entre ejes (mm)	Ancho de vía (mm)
Montacargas	4	16	12 Ton	2	4	2900	1730
Montacargas	2	18.1	15 Ton	2	4	3100	1844
Montacargas	1	27.7	20 Ton	2	4	3750	2394
Cargador frontal	1	13.1	2.3 m <sup>3</sup>	2	2	2930	2030
Cargador frontal	6	20.1	4.0 m <sup>3</sup>	2	2	3340	2230
Cargador frontal	10	31.2	5.2 m <sup>3</sup>	2	2	3700	2280
Cargador frontal	5	30.1	5.7 m <sup>3</sup>	2	2	3800	2395
Minicargadores	3	2.2	0.635 Ton	2	2	986	1312

(\*) Las dimensiones y características presentadas de las grúas portuarias son indicativas teniendo en cuenta que estos de equipos se hacen a la medida de cada puerto, por este motivo se sugiere que de ser posible se deben consultar los datos reales de estos equipos para prevenir inexactitudes en los diseños de pavimentos.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Superintendencia de Puertos y Transporte y catálogos de los equipos.

b) **Puerto de Santa Marta:** Está ubicado en el extremo noroccidental de la ciudad de Santa Marta y es de gran importancia en el país debido a las características naturales dentro de las cuales resalta el hecho de ser el puerto con el calado natural más alto de América. Debido a su relevancia en la Tabla 2 se describen los equipos con los que cuenta actualmente el puerto para el movimiento de mercancías

Tabla 2. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Santa Marta (\*).

Equipo	Cantidad (Un)	Peso propio (Ton)	Capacidad de carga máxima	Numero de ejes (Un)	Número de ruedas en el eje crítico (Un)	Separación entre ejes (mm)	Ancho de vía (mm)
Grúa portuaria sobre ruedas	4	412	104 Ton	2	2	1076/2082/1076/ 3912 1076/2082/1076	3320

Equipo	Cantidad (Un)	Peso propio (Ton)	Capacidad de carga máxima	Numero de ejes (Un)	Número de ruedas en el eje crítico (Un)	Separación entre ejes (mm)	Ancho de vía (mm)
Cargador frontal	4	89.2	22 Ton	2	2	5890	3810
Cargador frontal	1	9.2	1.4 m <sup>3</sup>	2	2	2700	1930
Cargador frontal	4	17.8	3.3 m <sup>3</sup>	2	2	3350	2230
Cargador frontal	5	52.5	7.0 m <sup>3</sup>	2	2	3800	2540
Minimula	4	5.2	21.0 Ton	2	4	3900	1980
Remolques con plataforma	5	4.5	21.8 Ton	2	4	2120	1980
Camiones de 3 ejes	7	15.9	18.0 Ton	3	4	5920/1400	1980
Tractocamión	1	8.0	17.0 Ton	3	4	5950/11070/1270	1980
Retroexcavadora	1	20.4	0.9 m <sup>3</sup>	2	N/A	3650	2200
Tráiler Tipo Cama Alta	4	13.9	35.0 Ton	3	4	5950/11070/1270	1980
Tráiler Tipo Cama Baja	1	10.6	70.0 Ton	3	4	5950/11070/1270	1980
Montacargas	21	4.7	3 Ton	2	2	1700	1000
Montacargas	1	8	5.0 Ton	2	4	2250	1474
Montacargas	2	9.3	7.0 Ton	2	4	2250	1474
Montacargas	3	18.1	15.0 Ton	2	4	3100	1844
Montacargas	1	19.8	16.0 Ton	2	4	3300	1844
Estibadora Manual	17	500	1.5 Ton	2	2	1167	340
Estibadora Manual	10	600	2.0 Ton	2	2	1170	370
Estibadora Manual	12	65	2.5 Ton	2	2	1170	N/A
Chasis 20 pies	4	3.9	30.0 Ton	2	4	1410	1980
Chasis 40 pies	11	4.9	39.0 Ton	3	4	1410	1980

(\*) Las dimensiones y características presentadas de las grúas portuarias son indicativas teniendo en cuenta que estos de equipos se hacen a la medida de cada puerto, por este motivo se sugiere que de ser posible se deben consultar los datos reales de estos equipos para prevenir inexactitudes en los diseños de pavimentos.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Superintendencia de Puertos y Transporte y catálogos de los equipos.

c) **Puerto de Barranquilla:** Está ubicado en la orilla occidental del río Magdalena en la desembocadura del mismo al mar Caribe o que lo convierte en un puerto marítimo y fluvial, es el puerto colombiano con mayor espacio disponible con cerca de 200 hectáreas y el tercero a nivel nacional en el movimiento de mercancías. Debido a los tipos de cargas que se movilizan por el puerto la zona portuaria cuenta con diferentes equipos de manipulación de mercancías, en la Tabla 3 se presenta el número y características de cada uno.

Tabla 3. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Barranquilla (\*).

Equipo	Cantidad (Un)	Peso propio (Ton)	Capacidad de carga máxima	Numero de ejes (Un)	Número de ruedas en el eje crítico (Un)	Separación entre ejes (mm)	Ancho de vía (mm)
Grúa Portuaria sobre ruedas	4	371	104 Ton	9	8	2260/2830/2260/ 21300 2260/2830/2260	4380
Grúa pórtico de patio (RTG)	3	64	40 Ton	4	2	2100/3500/2100	4712
Apilador de levante	1	30	7 Ton	2	4	4200	1994
Apilador de alcance	12	69	40 Ton	2	4	6500	2980
Tractocamiones	25	17	40 Ton	5	4	5950/11070/1270	1980
Montacargas	1	35.7	25 Ton	2	4	4318	2712
Montacargas	1	27.7	20 Ton	2	4	3750	2712
Montacargas	8	9.3	7 Ton	2	4	2250	1474
Montacargas	6	12.8	10 Ton	2	4	2800	1600
Montacargas	3	18.1	15 Ton	2	4	3100	1844
Montacargas	2	19.8	16 Ton	2	2	3500	1844
Montacargas	12	4.7	3 Ton	2	2	1700	1000
Montacargas	10	4.8	3.5 Ton	2	2	1700	1000
Montacargas	5	8	5 Ton	2	4	2250	1474



Equipo	Cantidad (Un)	Peso propio (Ton)	Capacidad de carga máxima	Numero de ejes (Un)	Número de ruedas en el eje critico (Un)	Separación entre ejes (mm)	Ancho de vía (mm)
Montacargas Eléctricos	3	4.7	3 Ton	2	2	1600	998
Cargadores Frontales	14	30.1	5.7 m <sup>3</sup>	2	2	3550	2230
Excavadoras	4	28.3	1.5 m <sup>3</sup>	2	N/A	3390	2590

(\*) Las dimensiones y características presentadas de las grúas portuarias son indicativas teniendo en cuenta que estos de equipos se hacen a la medida de cada puerto, por este motivo se sugiere que de ser posible se deben consultar los datos reales de estos equipos para prevenir inexactitudes en los diseños de pavimentos

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Superintendencia de Puertos y Transporte y catálogos de los equipos.

d) **Puerto de Cartagena:** Se encuentra ubicado en el norte del país en el departamento de bolívar contando con la bahía más grande de la costa norte de Colombia y siendo considerado uno de los puertos más importantes del caribe en el manejo de contenedores. Teniendo en cuenta la vocación de la zona portuaria en la Tabla 4 se presentan las cantidades y características de los equipos disponibles en el puerto para el manejo de mercancías.

Tabla 4. Cantidad y características de los equipos de movimiento de mercancías del puerto de Cartagena (\*).

Equipo	Cantidad (Un)	Peso propio (Ton)	Capacidad de carga máxima	Numero de ejes (Un)	Número de ruedas en el eje critico (Un)	Separación entre ejes (mm)	Ancho de vía (mm)
Grúa portuaria	9	439	144 Ton	10	8	2260/2830/2260/ 21300 2260/2830/2260	4380
Excavadora	1	21	1.0 m <sup>3</sup>	2	N/A	3650	2380
Excavadora	1	20	1.2 m <sup>3</sup>	2	N/A	3660	2390
Excavadora	2	53.5	3.8 m <sup>3</sup>	2	N/A	4705	2750
Excavadora	1	35.4	2.2 m <sup>3</sup>	2	N/A	4040	2590

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad (Un)</b>	<b>Peso propio (Ton)</b>	<b>Capacidad de carga máxima</b>	<b>Numero de ejes (Un)</b>	<b>Número de ruedas en el eje crítico (Un)</b>	<b>Separación entre ejes (mm)</b>	<b>Ancho de vía (mm)</b>
Montacarga	1	8	5 Ton	2	4	2250	1474
Montacarga	3	9.3	7 Ton	2	4	2250	1474
Volqueta	6	8.0	17 Ton	3	4	1270	1980
Bulldozer	2	18.7	3.9 m <sup>3</sup>	2	N/A	2821	1880
Cargador frontal	2	12.8	3.1 m <sup>3</sup>	2	2	3560	2230
Cargador frontal	2	18.3	3.5 m <sup>3</sup>	2	2	3350	2230
Cargador frontal	4	23.1	4.6 m <sup>3</sup>	2	2	3450	2230
Camión con grúa	1	6.1	3.8 Ton	2	4	5994	1980
Camión con canasta	2	5.2	10.8 Ton	2	4	5994	1981
Camión	2	5.5	11.3 Ton	2	4	5994	1982
Apilador de levante	5	69	40.0 Ton	2	4	6500	2980
Apilador de alcance	2	30	7.0 Ton	2	4	4200	1994
Montacargas	2	4.7	3.0 Ton	2	2	1700	1000
Montacargas	2	12.8	10.0 Ton	2	4	2800	1600
Tractocamión con plataforma	26	17	40.0 Ton	5	4	5950/11070/1270	1980
Minicargadores	1	3.7	1.8 Ton	2	2	1150	1507

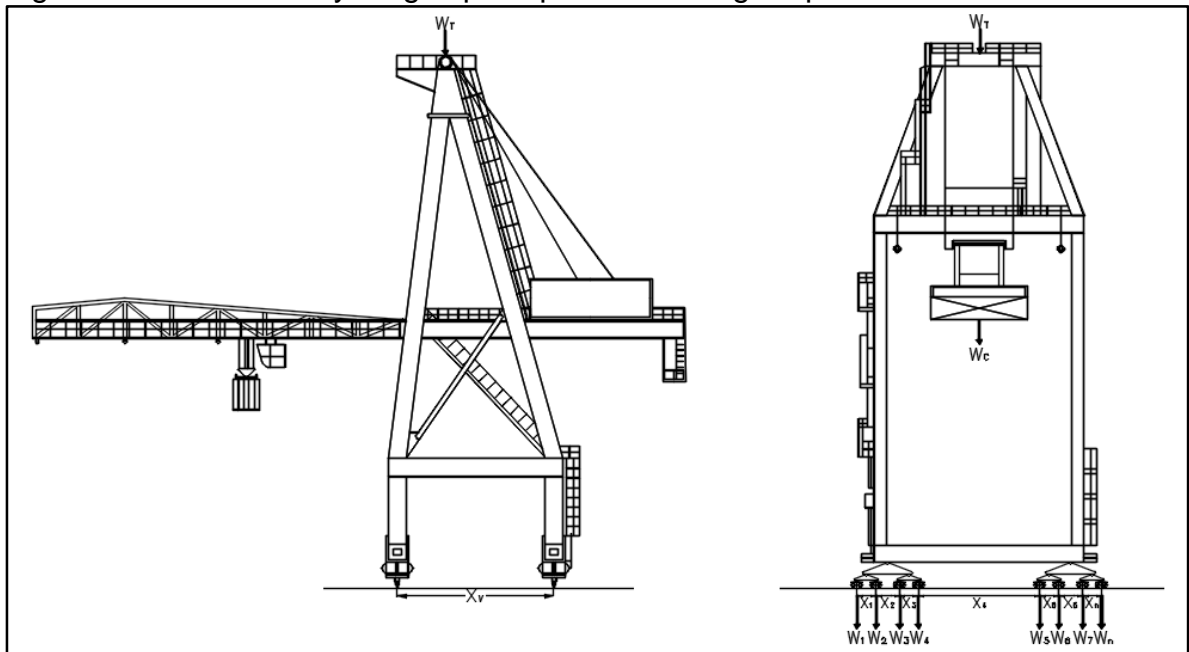
(\*) Las dimensiones y características presentadas de las grúas portuarias son indicativas teniendo en cuenta que estos de equipos se hacen a la medida de cada puerto, por este motivo se sugiere que de ser posible se deben consultar los datos reales de estos equipos para prevenir inexactitudes en los diseños de pavimentos.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Superintendencia de Puertos y Transporte y catálogos de los equipos.

Teniendo como base las características de los equipos de movimiento de mercancías consolidadas en las tablas anteriores, a continuación, se presentan los esquemas básicos de los equipos más relevantes que se encontraron en los principales puertos de Colombia, es estos se presenta la forma como fueron medidas las distancias consignadas en las tablas de los equipos por puerto.

a) **Grúa portuaria sobre ruedas:** los puertos colombianos y en general cuentan con este tipo de equipos que son los que le permiten descargar las mercancías de los buques, aunque se tienen diferentes configuraciones dependiendo de las características propias de los puertos en la Figura 6 se muestran las características de dimensiones y pesos utilizados para el cálculo de cargas en las ruedas de una grúa portuaria apoyada sobre ruedas.

Figura 6. Dimensiones y cargas principales de una grúa portuaria.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_C$  = Peso de la carga.

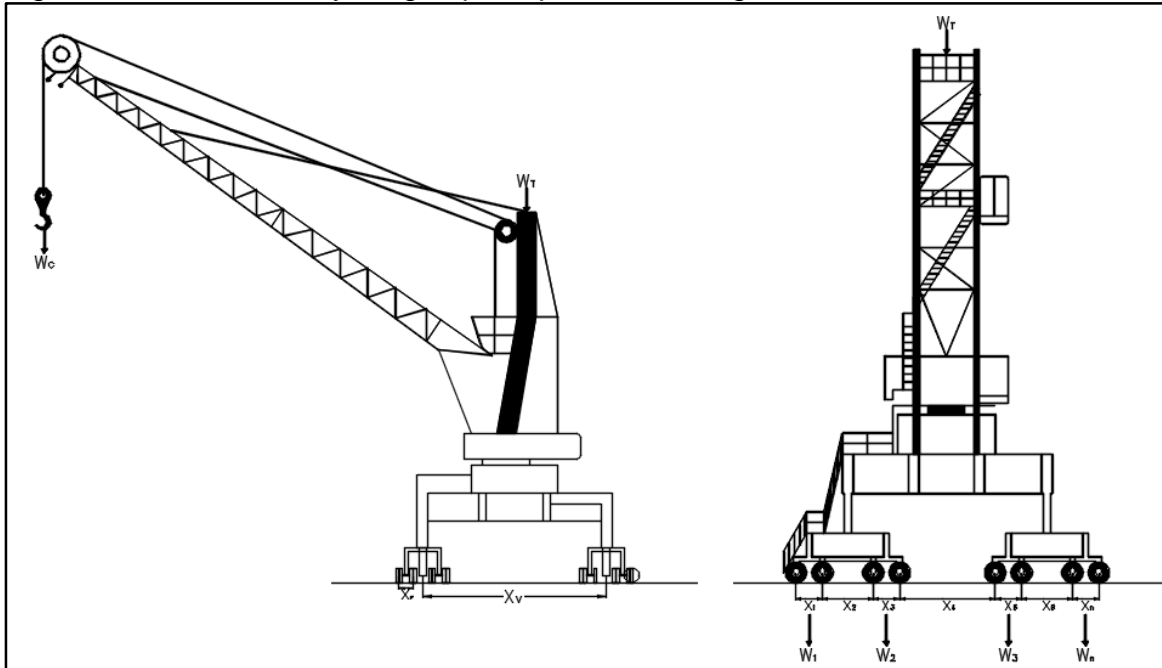
$W_{1, 2, 3, n}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_{1, 2, 3, n}$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

**Grúa móvil:** Las grúas disponibles en Colombia de estas características son de tipo muelle que se utilizan principalmente para el movimiento de graneles sólidos, cargas extradimensionadas y contenedores, dependiendo de la utilización que se le en cada puerto se Figura 7 dispone de distintos equipamientos complementarios a la grúa, en la se muestran las principales dimensiones y cargas que son utilizadas en el cálculo de cargas por ruedas.

Figura 7. Dimensiones y cargas principales de una grúa móvil.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_C$  = Peso de la carga.

$W_{1, 2, 3, n}$  = Peso de cada rueda del equipo.

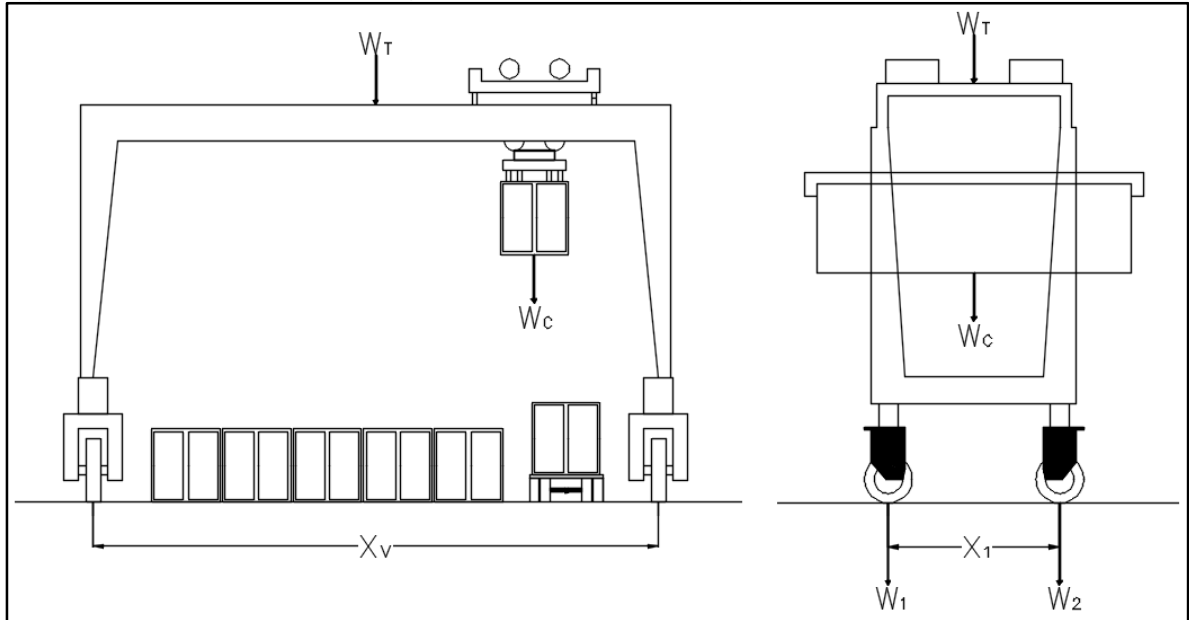
$X_{1, 2, 3, n}$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_V$  = Ancho de vía o de zona.

**b) Grúa de patio RTG por sus siglas en inglés (Rubber Tyred Gantry Crane):**

Este equipo es utilizado particularmente para el movimiento y automatización de contenedores y las dimensiones del equipo están sujetas a las necesidades del puerto. Las características principales para el cálculo de las cargas por rueda se presentan en la Figura 8.

Figura 8. Dimensiones y cargas principales de una grúa de patio RTG.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_C$  = Peso de la carga.

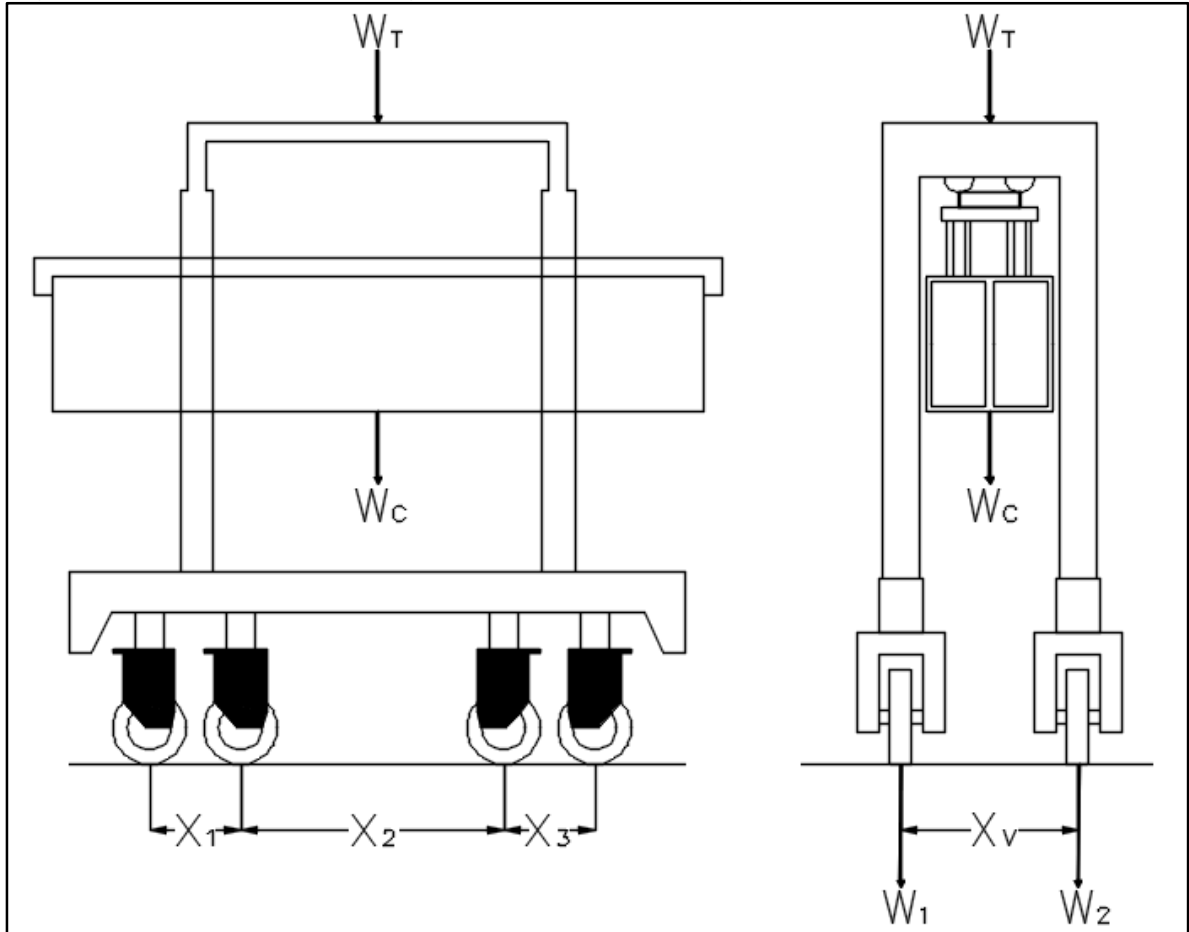
$W_{1, 2, 3, n}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_{1, 2, 3, n}$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_V$  = Ancho de vía o de zona.

c) **Grúa pórtico (straddle carriers):** Este equipo es utilizado en las zonas de almacenaje de contenedores y es propicio para el movimiento y apilamiento de contenedores. En la Figura 9 se presentan las características principales para el cálculo de las cargas por ruedas del equipo.

Figura 9. Dimensiones y cargas principales de una grúa pórtico.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_c$  = Peso de la carga.

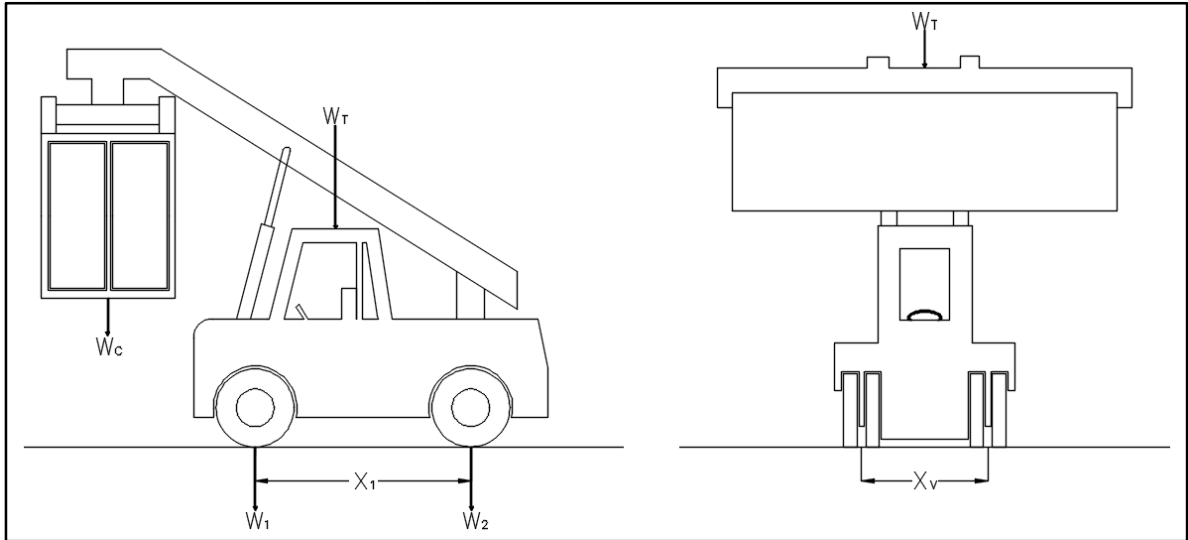
$W_{1,2}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_{1,2}$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

d) **Apiador de alcance (Reach Stacker):** Es un equipo de movimiento libre para contenedores y una de sus principales funciones es la de alcanzar contenedores no solo en altura sino en profundidad dentro de los bloques de almacenaje. Para el cálculo de las cargas que se ejercen sobre las ruedas en la Figura 10 se presentan las principales dimensiones del equipo.

Figura 10. Dimensiones y cargas principales de apilador de alcance.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_C$  = Peso de la carga.

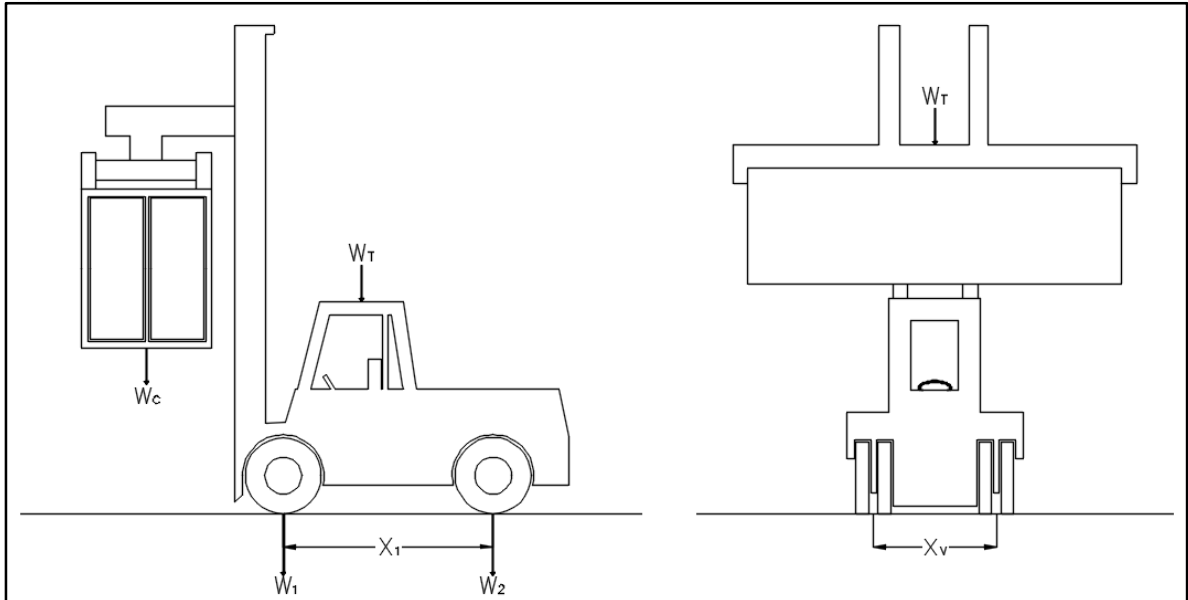
$W_{1,2}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_1$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

e) **Apilador de Levante (Top Loader):** Dedicado a la manipulación de contenedores el cual permite solo la elevación y movilización de contenedores dentro de un patio, es de gran utilización para el apilamiento de contenedores vacíos sin embargo también está en capacidad de moverlos llenos. En la Figura 11 se presentan las dimensiones principales que tiene este equipo para el cálculo de las cargas sobre ruedas

Figura 11. Dimensiones y cargas principales de apilador de levante.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_c$  = Peso de la carga.

$W_{1,2}$  = Peso de cada rueda del equipo.

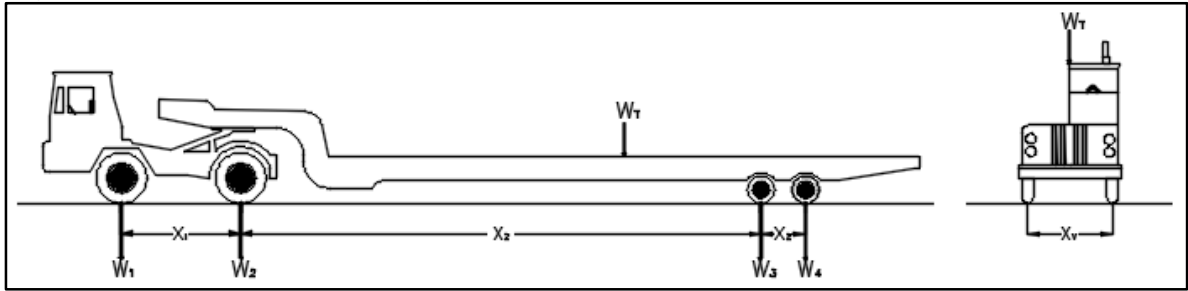
$X_1$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

f) **Remolques con plataforma:** Este tipo de vehículos son usados generalmente para el movimiento de contenedores desde el muelle a los patios de almacenamiento y viceversa, las cargas y dimensiones como se pueden ver en la Figura 12 son muy similares a la de un camión de uso corretero, sin embargo, este equipo al tener la posibilidad de mover dos contenedores al tiempo las cargas que se transfieren al piso pueden ser más altas de lo normal.



Figura 12. Dimensiones y cargas principales de los remolques con plataforma.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

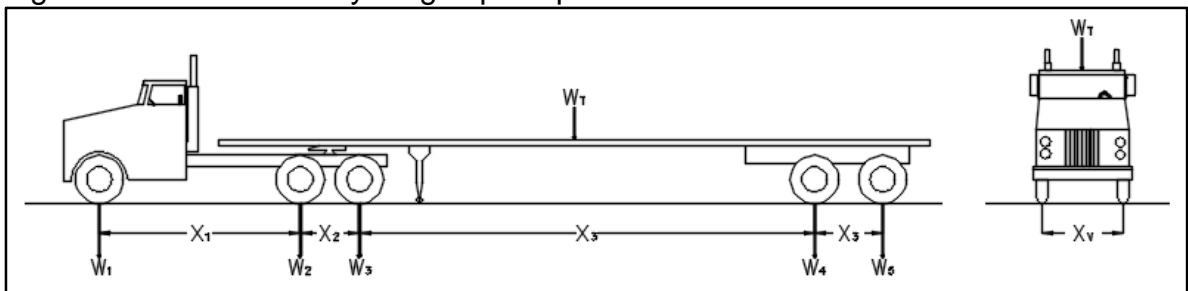
$W_{1, 2, 3}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_{1, 2, 3, 4}$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

g) **Tractocamiones:** Son vehículos que hacen parte del parque automotor de carga en las carreteras del país y en términos generales están sujetos a las mismas cargas que están sometidos los pavimentos convencionales, sin embargo, teniendo en cuenta que la mayoría de carga que llega a los puertos colombianos llevan por carretera este tipo de vehículos se deben tener en cuenta para los diseños de las entradas y salidas de los puertos y áreas industriales. En la Figura 13 se presentan las dimensiones usuales de un camión de categoría 3S2.

Figura 13. Dimensiones y cargas principales de los tractocamiones.



Fuente: Elaboración propia a partir del MDG INVIAS-2008.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

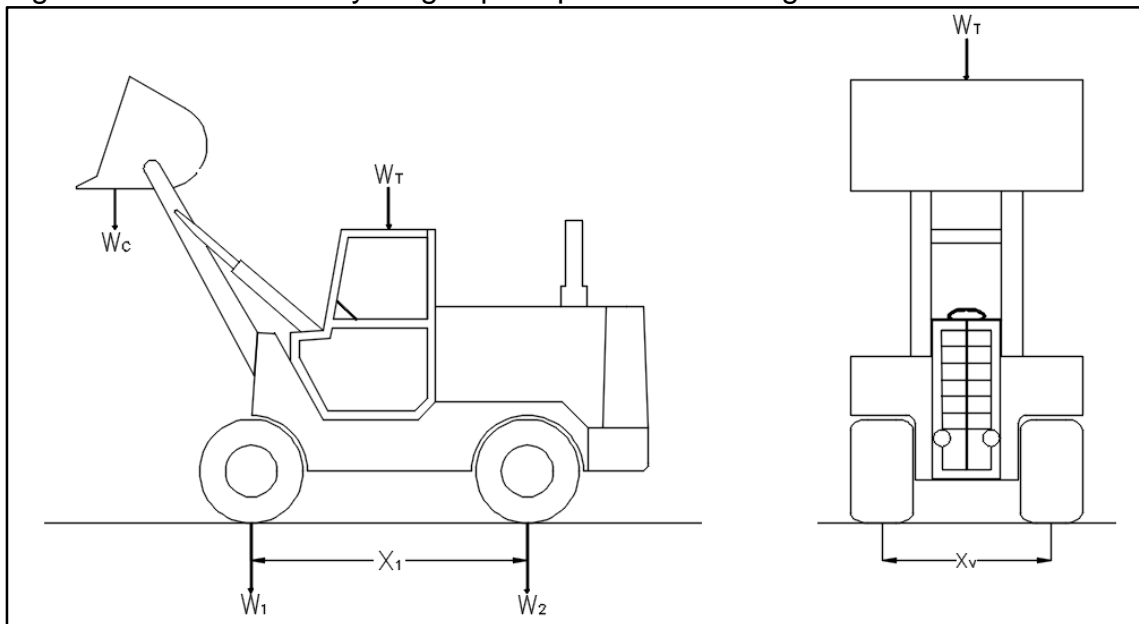
$W_{1, 2, 3}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_{1, 2, 3, 4}$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

h) **Cargador frontal:** Estos equipos son de gran utilización en Colombia en la manipulación de graneles sólidos, así mismo son utilizados en puertos y áreas industriales por lo que tiene una gran variación de capacidades de carga las cuales dependen generalmente los materiales que se manipulen en el puerto. Teniendo en cuenta la diversidad de capacidades de estos en la Figura 14 se muestran las principales distancias y cargas que se pueden presentar en estos equipos.

Figura 14. Dimensiones y cargas principales de los cargadores frontales.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_{\tau}$  = Peso propio del equipo.

$W_c$  = Peso de la carga.

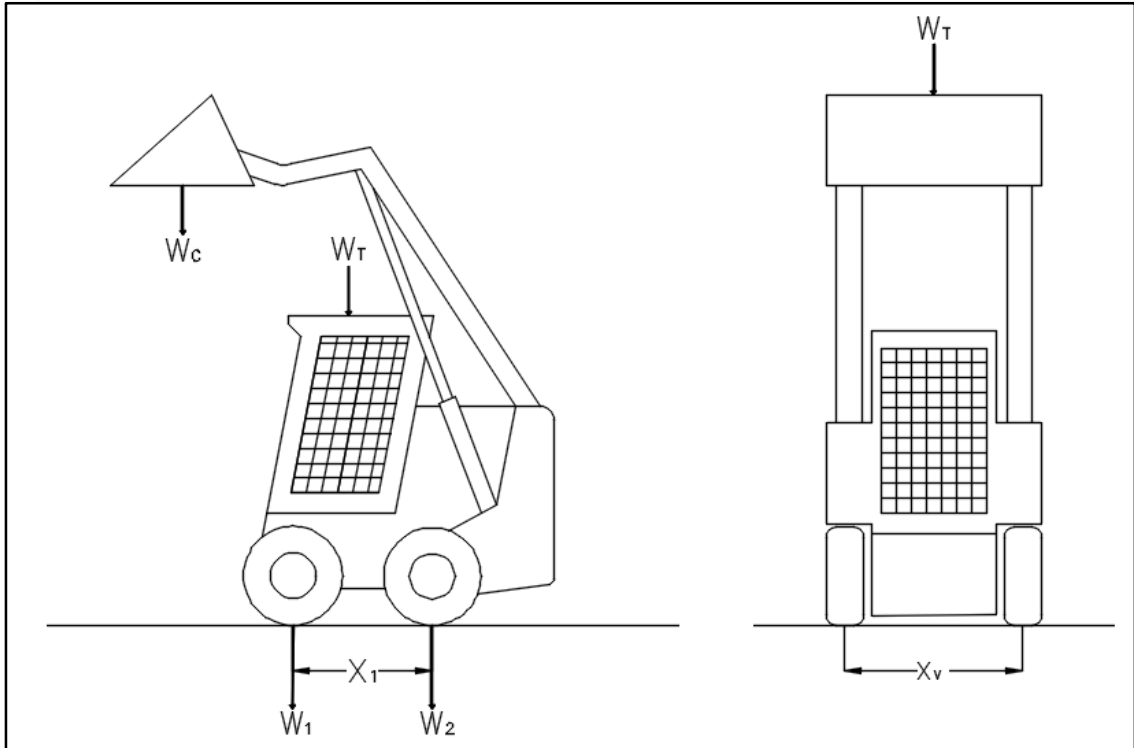
$W_{1, 2}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_1$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

i) **Minicargadores:** Este tipo de equipos se relacionan debido a que las maniobras que realiza en especial los giros que se efectúan sobre una sola rueda y esto puede generar problemas en los pavimentos. En la Figura 15 se presentan las principales dimensiones y las cargas que transfiere al suelo este equipo.

Figura 15. Dimensiones y cargas principales de los Minicargadores.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_C$  = Peso de la carga.

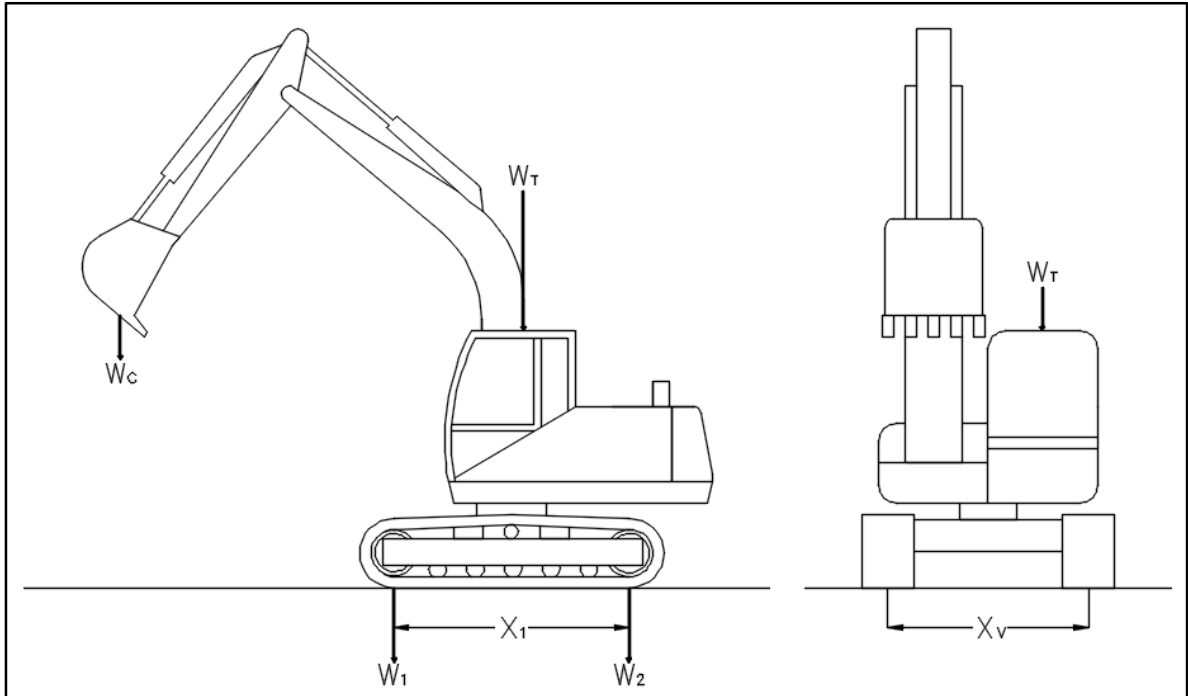
$W_{1,2}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_1$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

j) **Retroexcavadora:** Este tipo de equipo tiene un gran uso para el movimiento de graneles sólidos y comúnmente están apoyadas sobre orugas, generalmente son utilizados dentro de los puertos en el acopio de materiales y en el cargue de camiones. Estos equipos tienen diversas capacidades por lo que en la Figura 16 se presentan las principales dimensiones y cargas que transmiten los pisos estos equipos.

Figura 16. Dimensiones y cargas principales de las retroexcavadoras.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_C$  = Peso de la carga.

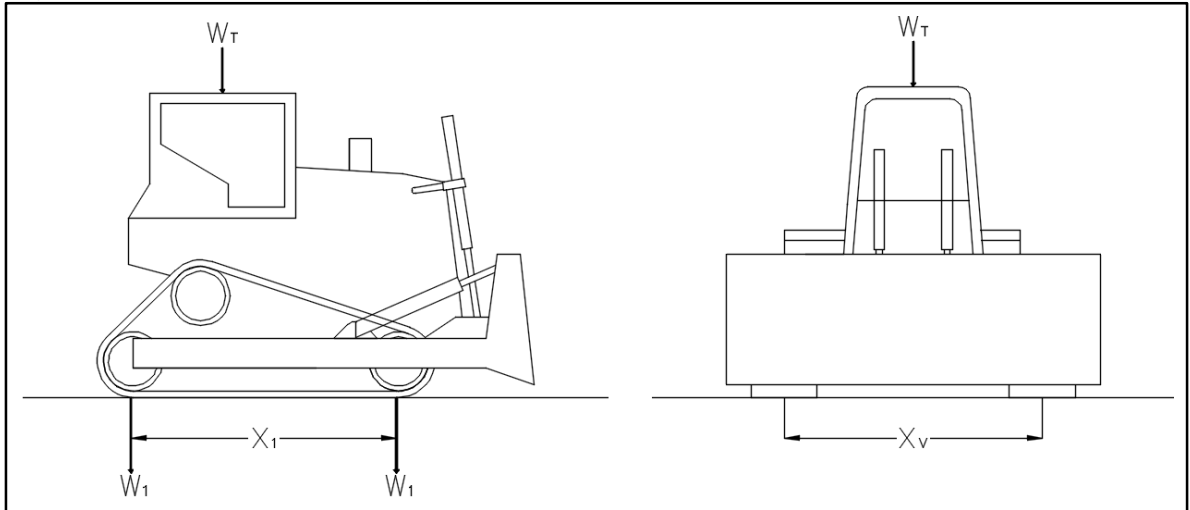
$W_{1,2}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_1$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

k) **Bulldozer:** No son comunes dentro de los puertos sin embargo en Colombia se encuentran en el puerto de Cartagena y su principal función es el de acopiar graneles sólidos optimizando los espacios disponibles para el almacenaje de materiales. Pese a que como se dijo anteriormente estos equipos no son comunes en los puertos y las áreas industriales en la Figura 17 se muestran las principales dimensiones y cargas generadas en su operación.

Figura 17. Dimensiones y cargas principales de los bulldozer.



Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos.

Donde:

$W_T$  = Peso propio del equipo.

$W_{1,2}$  = Peso de cada rueda del equipo.

$X_1$  = Distancia o separación entre ejes.

$X_v$  = Ancho de vía o de zona.

### **3 METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EN PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES**

En Colombia, debido a que no existe un método específico para el diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales, se utilizan métodos tradicionales para pavimentos carreteros como lo son el de la PCA y el método AASHTO, según la UCTAD<sup>14</sup> los diseños de pavimentos industriales se les debe dar un tratamiento diferente a los convencionales para pavimentos carreteros, esto debido a que históricamente se han obtenido resultados no favorables con estos sistemas de pavimentación.

Las metodologías tradicionales para el diseño de pavimentos carreteros, fueron planteadas para soportar las cargas de camiones tipo C2, C3, C3S2 y C3S3 y sus tránsitos equivalentes, por este motivo las tablas y gráficas para calcular el número de repeticiones admisibles y el dimensionamiento de la estructura del pavimento están propuestas para este tipo de cargas como máximo<sup>15</sup>.

El dimensionamiento del pavimento de los puertos y áreas industriales, se debe manejar de una manera especial debido a la magnitud de las cargas que se manejan son mayores que las de un camión normal. Métodos como el de la BRITISH PORT ASSOCIATION – BPA o métodos mecanicistas son más exactos debido a que tiene en cuenta todos los tipos de cargas encontradas en un puerto marítimo o un área industrial.

#### **3.1 MANUAL BRITÁNICO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES (BPA)<sup>16</sup>**

El manual ha sido desarrollado principalmente por el profesor John Knapton para la British Ports Association quien desde la década de 1970 ha realizado estudios sobre pavimentos para puertos y áreas industriales, en la actualidad se tiene disponible la cuarta edición del manual el cual fue encargado y publicado por Interpave, en el

---

<sup>14</sup> MELETUOU, Marios y KNAPTON, John. Monografías de la UCTAD sobre gestión de puertos. Naciones unidas. 1987. p. 9

<sup>15</sup> DUARTE, Laura y ROJAS, Diego. Evaluación y diseño de los pavimentos para un terminal marítimo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería. 2010. p. 40

<sup>16</sup> KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 4 Edición. UK: Interpave, 2007. p. 21-84

cual se trabajan con mezclas con concreto, mezclas bituminosas y adoquines de concreto, y en esta edición del manual se volvió a tener en cuenta el diseño de sobrecapas para rehabilitación en pavimentos industriales.

El método de diseño se fundamenta en un modelo semi-empírico, este teniendo en cuenta que se adoptan de tensiones admisibles utilizando el método de elementos finitos, y también se incorporan valores obtenidos de la experiencia que ha tenido Dr. Knapton en el desarrollo de las 4 ediciones de las guías de diseño de pavimentos.

La cuarta edición del manual de la BPA presenta una metodología de diseño de sobrecapas, la cual plantea la opción de la rehabilitación de pavimentos que están cercanos o ya cumplieron con su vida útil para la que fueron diseñados, esto permite el aprovechamiento y el aumento de la vida residual del pavimento mientras se plantea el cambio total de la estructura

**3.1.1 Materiales de pavimentos.** El Dr. Knapton en su investigación ha encontrado que con la entrada de los cargadores frontales y los apiladores de alcance cada vez con más fuerza en los puertos del mundo, ha permitido que se pueda apilar y quinto contenedor cargado, por este motivo el pavimento en adoquines de concreto se ha convertido en el material normal de capa de rodadura de pavimentos industriales.

Las capas granulares comunes que según la experiencia del autor del manual son las que mejor desempeño han probado tener son capas granulares mezcladas con diferentes materiales como: mezclas ligadas hidráulicamente (HBM por sus siglas en inglés), mezclas de materiales granulares estabilizados con cemento (CBGM por sus siglas en inglés), mezclas ligadas con escoria (SBM por sus siglas en inglés) y las mezclas ligadas con cenizas volátiles (FABM por sus siglas en inglés), en menor medida la utilización de materiales mezclados con asfalto, estos han demostrado que son rentables y que requieren de poco mantenimiento por lo que este manual recomienda la utilización de adoquines de concreto como capa de rodadura de los puertos y áreas industriales y es por esto que dentro del manual ya se encuentra implícito el aumento de resistencia.

3.1.1.1 Factores de equivalencia de materiales. Dentro de la investigación que realizó la BPA se generaron una serie de factores de equivalencia de materiales

que permite que los materiales puedan transformarse durante el proceso de diseño. El material estándar utilizado para la elaboración de las cartas de diseño tuvo en cuenta tanto la resistencia de compresión del ensayo de cubo ( $10\text{N/mm}^2$ ) como la resistencia del ensayo del cilindro ( $8\text{N/mm}^2$ ) por lo que se le denomina al material como C8/10. En la Tabla 5 se muestran las las propiedades de los materiales definidos en la normatividad del reino unido

Tabla 5. Clasificación de las mezclas estabilizadas con cemento y las características de resistencia a la compresión (\*).

Característica de resistencia de compresión a los 28 días (N/mm <sup>2</sup> )		Clase de resistencia	Resistencia media a la compresión axial (N/mm <sup>2</sup> )
Resistencia del cilindro (H/D = 2)	Resistencia del cilindro o cubo (H/D = 1)		
No requiere		C 0	0
1.5	2.0	C 1.5/2.0	0.39
3.0	4.0	C 3/4	0.62
5.0	6.0	C 5/6	0.87
<b>8.0</b>	<b>10.0</b>	<b>C 8/10</b>	<b>1.18</b>
12	15	C 12/15	1.55
16	20	C 16/20	1.87
20	25	C 20/25	2.17

(\*)El material estándar utilizado para construir la carta de diseño se muestra en negrita.

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 26

El diseño de pavimentos se debe realizar como si fuera una mezcla de materiales granulares estabilizados con cemento del tipo (CBGM) C8/10, posteriormente si se requiere cambiar los materiales se debe hacer uso de los factores de equivalencia de materiales (MEFs por sus siglas en inglés) que se encuentran consignados en la Tabla 6.

La resistencia a la flexión de una estructura de pavimento es proporcional al cuadrado de su profundidad y es directamente proporcional a su resistencia a la tracción. La rigidez de una estructura de pavimento es proporcional al cubo de su profundidad y es directamente proporcional a su resistencia a la tracción. En el caso de mezclas ligadas hidráulicamente (HBM), los factores de equivalencia del material (MEFs) se basan en fuerza, mientras que, en el caso de materiales ligados con asfalto, los factores de equivalencia de materiales (MEFs) se basan en la rigidez.



Usando el razonamiento anterior, los factores de equivalencia de materiales (MEFs) por el cual los materiales granulares estabilizados con cemento del tipo (CBGM) C8/10 necesitan que se multipliquen para convertir a los otros materiales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Factores de Equivalencia de Materiales relacionados con C8/10 CBGM a otros materiales (\*), (\*\*).

<b>Agrupación de materiales</b>	<b>Material de construcción de base de pavimento preferido</b>		<b>Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)</b>
<b>Mesclas estabilizadas con cemento</b>	<b>Resistencia del material</b>	<b>Normas correspondientes</b>	
	C1.5/2.0	En BS EN 14227-1	1.74
	C3/4	En BS EN 14227-1	1.38
	C5/6	En BS EN 14227-1	1.16
	<b>C8/10</b>	<b>En BS EN 14227-1</b>	<b>1.00</b>
	C12/15	En BS EN 14227-1	0.87
	C16/20	En BS EN 14227-1	0.79
	C20/25	En BS EN 14227-1	0.74
	C1.5/2.0	En BS EN 14227-2&3	1.74
	C3/4	En BS EN 14227-2&3	1.38
	C6/8	En BS EN 14227-2&3	1.10
	C9/12	En BS EN 14227-2&3	0.95
	C12/16	En BS EN 14227-2&3	0.85
	C15/20	En BS EN 14227-2&3	0.79
	C18/24	En BS EN 14227-2&3	0.76
	C21/28	En BS EN 14227-2&3	0.72
	C24/32	En BS EN 14227-2&3	0.68
	C27/36	En BS EN 14227-2&3	0.63
<b>Concreto</b>	<b>C8/10</b>	<b>En BS8500-1</b>	<b>1.00</b>
	C12/15	En BS8500-1	0.87
	C16/20	En BS8500-1	0.79
	C20/25	En BS8500-1	0.74
	C25/30	En BS8500-1	0.65
	C25/30	En BS8500-1 incluyendo fibra de acero de 20 kg/m3	0.60
	C25/30	En BS8500-1 incluyendo fibra de acero de 30 kg/m3	0.55

Agrupación de materiales	Material de construcción de base de pavimento preferido		Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)
	C <sub>25/30</sub>	En BS8500-1 incluyendo fibra de acero de 40 kg/m <sup>3</sup>	0.50
	C <sub>28/35</sub>	En BS8500-1	0.62
	C <sub>32/40</sub>	En BS8500-1	0.60
	C <sub>32/40</sub>	En BS8500-1 incluyendo fibra de acero de 20 kg/m <sup>3</sup>	0.55
	C <sub>32/40</sub>	En BS8500-1 incluyendo fibra de acero de 30 kg/m <sup>3</sup>	0.50
	C <sub>32/40</sub>	En BS8500-1 incluyendo fibra de acero de 40 kg/m <sup>3</sup>	0.45
	C <sub>35/45</sub>	En BS8500-1	0.58
<b>Materiales tradicionales mezclados con cemento</b>	<b>CBM1</b> (4.5N/mm <sup>2</sup> resistencia mínima de compresión del cubo a los 7 días)		1.60
	<b>CBM2</b> (7.0N/mm <sup>2</sup> resistencia mínima de compresión del cubo a los 7 días)		1.20
	<b>CBM3</b> <b>(10.0N/mm<sup>2</sup> resistencia mínima de compresión del cubo (Cilindro) a los 7 días)</b>		<b>1.00</b>
	<b>CBM4</b> (15.0N/mm <sup>2</sup> resistencia mínima de compresión del cubo a los 7 días)		0.80
	<b>CBM5</b> (20.0N/mm <sup>2</sup> resistencia mínima de compresión del cubo a los 7 días)		0.70
	Concreto de limpieza sin finos para la pavimentos drenantes		1.00
<b>Materiales mezclados con asfalto</b>	HDM según lo define SHW		0.82
	DBM según lo define SHW		1.00
	<i>HRA según lo define SHW</i>		0.25
<b>Materiales sin consolidar</b>	Material granular de base con CBR ≥ 80%		3.00

<b>Agrupación de materiales</b>	<b>Material de construcción de base de pavimento preferido</b>	<b>Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)</b>
<b>Adoquines de concreto</b>	Pavimentos con adoquines de concreto como capa de rodadura.	1.00

(\*) Se debe tener en cuenta que los materiales escritos en letra cursiva normalmente no se especificarían como una base de pavimento, pero se pueden usar como parte de la base del pavimento (consulte Diseño de la base en las especificaciones para obras viales de la agencia nacional de carreteras del reino unido).

(\*\*) El concreto denominado C16/20 significa concreto con una resistencia del cubo a la compresión a los 28 de 20N/mm<sup>2</sup>. Donde los dos números siguen a C, el primero es la resistencia característica del cilindro de compresión y el segundo es la resistencia característica del cubo de compresión.

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 28-29

Notas:

HDM = Macadam de alta resistencia.

DBM = Mezcla densa de asfalto Macadam

HRA = Asfalto laminado en caliente.

SHW = "Especificaciones para obras viales" de la Agencia de Carreteras del Reino Unido.

**3.1.2 Evaluación de cargas.** Para la evaluación de cargas en el manual se convierten las cargas a "cargas de rueda equivalentes" (SEWL por sus siglas en inglés) que describe las cargas reales. Las cargas generalmente no son valores únicos que caracterizan toda la operación del puerto o el área industrial, por lo tanto, se simplifican las cargas obtenidas en una carga equivalente la cual es usada en las cartas de diseño que son planteadas en el manual de la BPA.

3.1.2.1 Carga crítica para pavimentos de uso industrial. La carga crítica de un pavimento de uso industrial se presenta con el uso de equipos que habitualmente manejan contenedores, en este caso el valor de la carga de la rueda depende del rango de pesos de los contenedores u otros materiales que se manipulen. El diseño debe basarse en la carga crítica y sus números de repeticiones que generan mayor daño al pavimento, el régimen de carga completo debe expresarse como un número de pasadas de la carga crítica.

El manual en lo concerniente a la distribución de pesos de los contenedores dispone de una tabla que ha sido construida con base a los pesos de los contenedores que se encuentran en los puertos del Reino Unido, sin embargo recomienda que cuando se tengan datos locales disponibles se tomen estos en reemplazo de los datos de la Tabla 7, para cada uno de los pesos de los contenedores se calcula el efecto dañino causado por medio de la Ecuación 1, cuando los equipos de manipulación de cargas transportan contenedores.

$$D = \left( \frac{W}{12000} \right)^{3.75} \left( \frac{P}{0.8} \right)^{1.25} \times N \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

D = Efecto dañino.

W =Carga de la rueda correspondiente con el peso del contenedor determinado (kg)

P = Presión de los neumáticos (N/mm<sup>2</sup>).

N = % calculado de la Tabla 7 o de datos locales si se tienen disponibles.

Tabla 7. Porcentajes de contenedores de diferentes pesos para cinco combinaciones diferentes de contenedores de 40 y 20 pies derivados de las estadísticas proporcionadas por los puertos del Reino Unido.

Peso del contenedor (Kg)	Porcentaje de contenedores de 40 a 20 pies				
	100/0	60/40	50/50	40/60	0/100
0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0
2000	0	0.18	0.23	0.28	0.46
3000	0	0.6	0.74	0.89	1.49
4000	0.18	1.29	1.57	1.84	2.95
5000	0.53	1.9	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	2.6	3.05	3.16	3.27	3.72
9000	2.82	3.05	3.11	3.17	3.41
10000	3.3	3.44	3.48	3.52	3.66
11000	4.43	4.28	4.24	4.2	4.04
12000	5.73	5.24	5.12	4.99	4.5
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	6.1	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	10.4	8.93	8.56	8.18	6.72
22000	9.95	7.6	7.02	6.43	4.08
23000	5.53	4.31	4	3.69	2.47
24000	2.75	1.75	1.5	1.25	0.24
25000	0.95	0.63	0.55	0.47	0.15

Peso del contenedor (Kg)	Porcentaje de contenedores de 40 a 20 pies				
26000	0.67	0.4	0.33	0.27	0
27000	0.72	0.43	0.36	0.29	0
28000	0.53	0.32	0.27	0.21	0
29000	0.43	0.26	0.22	0.17	0
30000	0.28	0.17	0.14	0.11	0
31000	0.03	0.02	0.02	0.01	0
32000	0.03	0.02	0.02	0.01	0
33000	0	0	0	0	0
34000	0.05	0.03	0.02	0.02	0

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 36

3.1.2.2 Cargas de los Neumáticos. Según el Dr. Knapton se supone que el área de contacto de un neumático del equipo de manipulación es circular con una presión de contacto igual a la presión del neumático. En algunas ocasiones los equipos están equipados con llantas blandas por lo que el área de contacto no es circular y esto implica que las deformaciones debajo de la capa de rodadura son mayores que la presión del neumático, sin embargo, esta condición en pavimentos con capas de rodadura en concreto tiene poco efecto, pero puede tener afectaciones en pavimentos con capas de rodadura en adoquines y carpetas asfálticas. La presión de inflado de los neumáticos de los equipos generalmente es de  $1.0\text{N/mm}^2$ . Algunos equipos están equipados con neumáticos sólidos, en este caso el esfuerzo depende de la carga del remolque o equipo sin embargo un valor de  $1.7\text{ N/mm}^2$  es típico y la presión más alta se dispersa satisfactoriamente a través del pavimento, por lo que la Carta de diseño se puede usar directamente.

3.1.2.3 Cargas dinámicas. El factor dinámico (fd) tiene en los efectos producidos por las cargas de giros, aceleración, y las irregularidades de la superficie. Cuando un pavimento está sujeto a cargas dinámicas las cargas en las ruedas se deben ajustar por factores que la BPA mediante su experiencia ha condensado en la Tabla 8. El manual recomienda que debido a que en algunos puertos o áreas industriales se está automatizando los manejos de los contenedores que los factores de la Tabla 8 “se incrementen en un 50% para tales operaciones, es decir, un valor del 10% debe aumentarse al 15% o un valor del 60% aumentarse al 90%”<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 4 Edición. UK: Interpave, 2007. p. 38

Tabla 8. Tabla de factores de cargas dinámicas (fd). Las cargas estáticas se incrementan por las cifras porcentuales de la tabla.

<b>Condición</b>	<b>Tipo de equipo</b>	<b>fd</b>
Frenado	Apilador de alcance / Cargador frontal	±30%
	Grúa pórtico	±50%
	Cargador lateral	±20%
	Tractor y remolque	±10%
	Grúa pórtico de ruedas de goma(RTG)*	±10%
Giros	Apilador de alcance / Cargador frontal	40%
	Grúa pórtico	60%
	Cargador lateral	30%
	Tractor y remolque	30%
	Grúa pórtico de ruedas de goma (RTG)*	Cero
Aceleración	Apilador de alcance / Cargador frontal	10%
	Grúa pórtico	10%
	Cargador lateral	10%
	Tractor y remolque	10%
	Grúa pórtico de ruedas de goma (RTG)*	±5%
Superficie Irregular	Apilador de alcance / Cargador frontal	20%
	Grúa pórtico	20%
	Cargador lateral	20%
	Tractor y remolque	20%
	Grúa pórtico de ruedas de goma (RTG)*	±10%

\* “Las grúas pórtico de patio multiruedas (RTG Por sus siglas en inglés), es decir, RTG con 16 ruedas dispuestas en cuatro trenes de cuatro ruedas cada uno funcionan bien sobre un pavimento, pero para otras disposiciones de ruedas, las cargas de las ruedas pueden ser tan grandes que requieran pistas de vigas para los equipos”.

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 38

El manual de la misma manera explica que se debe tener en cuenta que cuando se tiene más de una condición de factor dinámico simultáneamente se debe tener en cuenta los múltiples efectos dinámicos que se presentan, en el caso del frenado el factor dinámico es aditivo en las ruedas delanteras y sustractivas para las ruedas traseras.

3.1.2.4 Cargas de las esquinas de las bases de los contenedores. Las cargas estáticas que se transfieren a los pavimentos por las esquinas de las bases de los

contenedores generan deformaciones severas. Estas deformaciones se pueden asumir por los pavimentos con losas de concreto u también los pavimentos con capa de rodadura en adoquines de concreto sin embargo se pueden generar daños superficiales a los pavimentos como se puede ver en la Figura 18.

Figura 18. Falla de la losa de concreto en la región de las piezas metálicas de la esquina del contenedor (\*).



(\*) Cuando la deformación supera los 12 mm, los contenedores descansan en su parte inferior y la carga de la losa se hace pequeña. Esto es inaceptable para la capacidad estructural de los contenedores.

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 40

Los contenedores generalmente se apilan en filas o bloques y habitualmente no se dispone más de tres contenedores de altura y máximo cinco, sin embargo, a nivel mundial se tiene la experiencia que en algunos casos se han apilado hasta 8 contenedores. Las estructuras metálicas de las esquinas de los contenedores de 1.78mm x \*162mm y una altura promedio de 12.5mm la cual se proyecta en la parte inferior del contenedor. La Tabla 9 especifica las cargas y deformaciones máximas para la mayoría de combinaciones de cargas de los contenedores. El manual de la BPA recomienda que en el caso que los contenedores permanezcan vacíos se tenga en cuenta que un contenedor de 40 pies tiene un peso de 3800kg y para los de 20 pies un peso de 2500kg.

Tabla 9. Cargas en el pavimento por apilamiento de contenedores llenos.

Altura de apilamiento	Reducción del peso bruto	Deformaciones de contacto (N/mm <sup>2</sup> )	Carga sobre pavimento (KN) para cada disposición de apilamiento		
			Individual	Filas	Bloques
1	0	2.59	76.2	152.4	304.8
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	457.2	914.4
6	40%	9.33	274.3	548.6	1097
7	40%	10.9	320	640	1280
8	40%	12.5	365.8	731.6	1463

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 40

**3.1.3 Factores de proximidad de rueda.** Las cargas de las ruedas en el factor de proximidad se afectan por los valores que se obtuvieron en la investigación del Dr. Knapton y las cuales se encuentran condensados en la Tabla 10 y el autor expresa “Si no se considerara la proximidad de las ruedas, las tensiones relevantes serían el esfuerzo de tracción máxima (esto es casi una tensión radial) directamente debajo de la rueda cargada. Si hay una segunda rueda cerca, genera esfuerzo de tracción tangencial directamente debajo de la primera rueda. Este esfuerzo tangencial se agrega al esfuerzo de tensión radial aportado por la rueda primaria. El factor de proximidad es la relación entre la suma de estos esfuerzos y el esfuerzo de tracción radial resultante de la rueda primaria. La Ecuación 2 y la Ecuación 3 se usan para calcular el esfuerzo”<sup>18</sup>.

$$\sigma_R = \frac{W}{2\pi} \left[ -\frac{3r^2z}{\alpha^{5/2}} - \frac{1-2\nu}{\alpha + Z \cdot \alpha^{1/2}} \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\sigma_T = \frac{W}{2\pi} [1-2\nu] \left[ -\frac{Z}{\alpha^{2/3}} - \frac{1}{\alpha + Z \cdot \alpha^{1/2}} \right] \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

$\sigma_R$  = Esfuerzo radial.

$\sigma_T$  = Esfuerzo tangencial.

W = Carga.

<sup>18</sup> KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 4 Edición. UK: Interpave, 2007. p. 42



$r$  = Distancia horizontal entre ruedas  
 $Z$  = Profundidad a la que se calculó el esfuerzo.  
 $\nu$  = Relación de Poisson.  
 $\alpha = r^2 + z^2$ .

Cuando se tiene más de dos ruedas en el mismo eje se presenta que el esfuerzo radial debajo de la rueda crítica puede aumentar y tiene en cuenta dos o más contribuciones de esfuerzo tangencial. La

Tabla 10 muestra que el factor de proximidad depende del espacio que se tiene entre las ruedas y la profundidad efectiva de la losa del pavimento. La profundidad efectiva se puede aproximar a partir de la Ecuación 4 y representa la profundidad teórica de la losa si se hubiera construido directamente sobre la subrasante.

$$Profundidad\ efectiva = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35000}{CBR \times 10}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Tabla 10. Factores de proximidad de la rueda.

Espacio entre ruedas mm	Factor de proximidad para la profundidad efectiva a la base para:		
	1000mm	2000mm	3000mm
300	1.82	1.95	1.98
600	1.47	1.82	1.91
900	1.19	1.65	1.82
1200	1.02	1.47	1.71
1800	1.00	1.19	1.47
2400	1.00	1.02	1.27
3600	1.00	1.00	1.02
4800	1.00	1.00	1.00

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 43

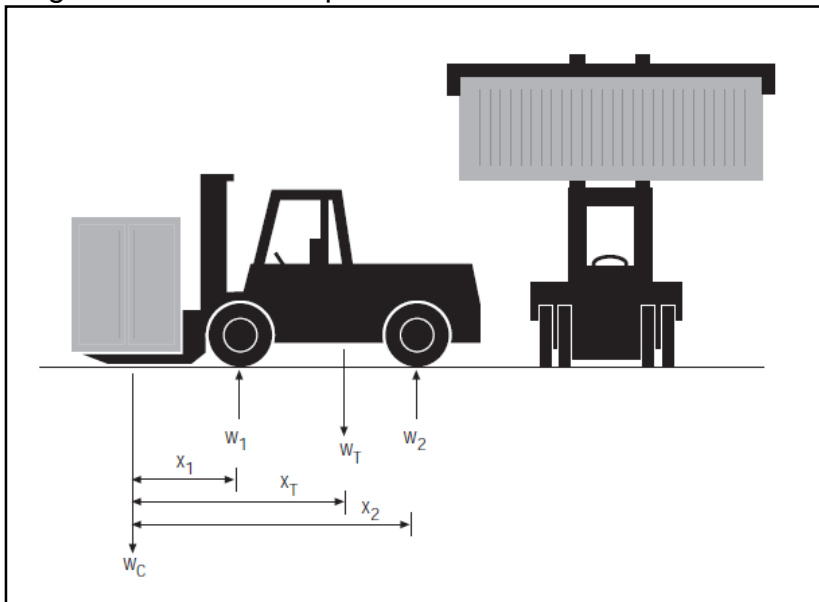
3.1.3.1 Cálculos de carga de equipos de manipulación de ruedas. La BPA en su manual propone unas formulas orientativas para los equipos y vehículos que se movilizan sobre ruedas y para esto dispone de una seria de diagramas para explicar cada una de las expresiones que se relacionan, cada una de estas fórmulas y diagramas se tratan en detalle posteriormente. De la misma manera recomienda que en el caso que se disponga de una combinación de rudas alternativas se apliquen los mismos principios. Par cada pasada del equipo todas las ruedas de un lado cargan un punto específico de la losa por lo tanto en el cálculo de carga de

rueda solo se debe considerar un lado del equipo y en el caso que el equipo sea asimétrico se debe calcular con el lado más cargado del equipo.

a) **Cargador frontal y apilador de alcance:** Estos vehículos son unos de los más usados dentro de la actividad portuaria e industrial, estos equipos son circulación no restringida y se emplean para el movimiento de mercancía general y de contenedores, generalmente son compuestos por ruedas dobles en cada lado en el eje delantero y una sola rueda en el eje trasero como se muestra en la Figura 19.

Por medio de las ecuaciones Ecuación 5 y Ecuación 6 se calculan las cargas que el cargador frontal transmite al pavimento, sin embargo para el cálculo de dichas cargas, mediante las ecuaciones Ecuación 7 y Ecuación 8 se calculan el factor de incremento y disminución de las cargas sobre los ejes cuando el equipo entra en operación, a su vez las ecuaciones Ecuación 9 y Ecuación 10 permiten calcular el aumento de la carga en el eje delantero y la disminución en el eje trasero cuando se opera el equipo.

Figura 19. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de un cargador frontal o un apilador de alcance.



Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 43

$$W_1 = fd \times \frac{A_1 \times W_C + B_1}{M} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$W_2 = f_d \times \frac{A_2 \times W_c + B_2}{M} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

$W_1$  = Carga en la rueda delantera (Kg).

$W_2$  = Carga en la rueda trasera (Kg).

$W_c$  = Peso del contenedor (Kg).

$M$  = Número de ruedas en el eje delantero (Usualmente 2,4 o 6)

$f_d$  = Factor dinámico.

$$A_1 = \frac{-X_2}{X_1 - X_2} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$A_2 = \frac{-X_1}{X_2 - X_1} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$B_1 = \frac{W_T(X_T - X_2)}{X_1 - X_2} \quad \text{Ecuación 9}$$

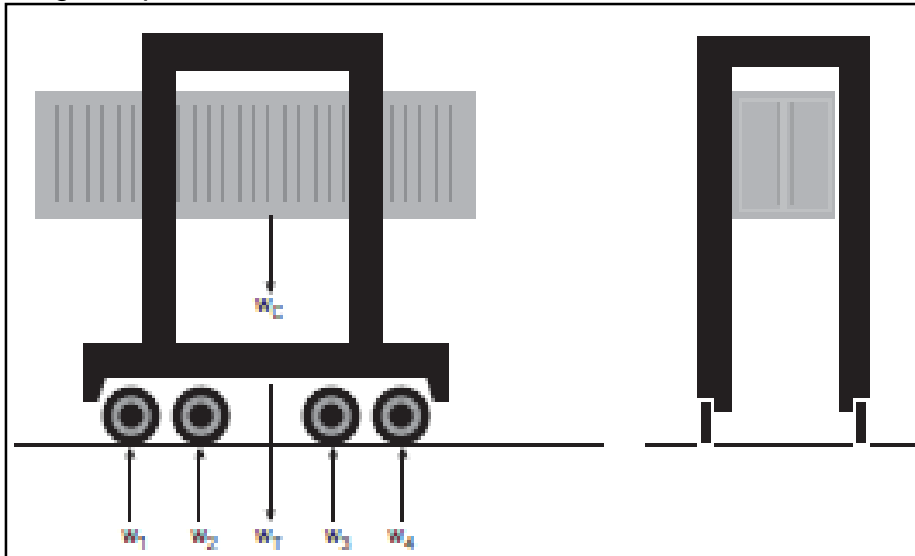
$$B_2 = \frac{W_T(X_T - X_1)}{X_2 - X_1} \quad \text{Ecuación 10}$$

$X_1$ ,  $X_2$  y  $X_T$  Se presentan en el diagrama de la Figura 20.

$W_T$  = Peso propio del equipo.

b) **Grúas pórtico:** Son equipos de circulación no restringida que se emplean para el traslado de contenedores y mercancía en general como se muestra en la Figura 20 y cuyas ruedas permiten tomar todas las direcciones, girando incluso totalmente alrededor del eje vertical, la Ecuación 11 se usa para el cálculo de la carga transmitida al pavimento.

Figura 20. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de las grúas pórtico.



Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 46.

$$W_i = f_d \times \left[ U_i + \frac{W_c}{M} \right]$$

Ecuación 11

Dónde:

$W_i$  = Carga de la rueda cargada del equipo (Kg).

$U_i$  = Carga de la rueda descargada del equipo (Kg).

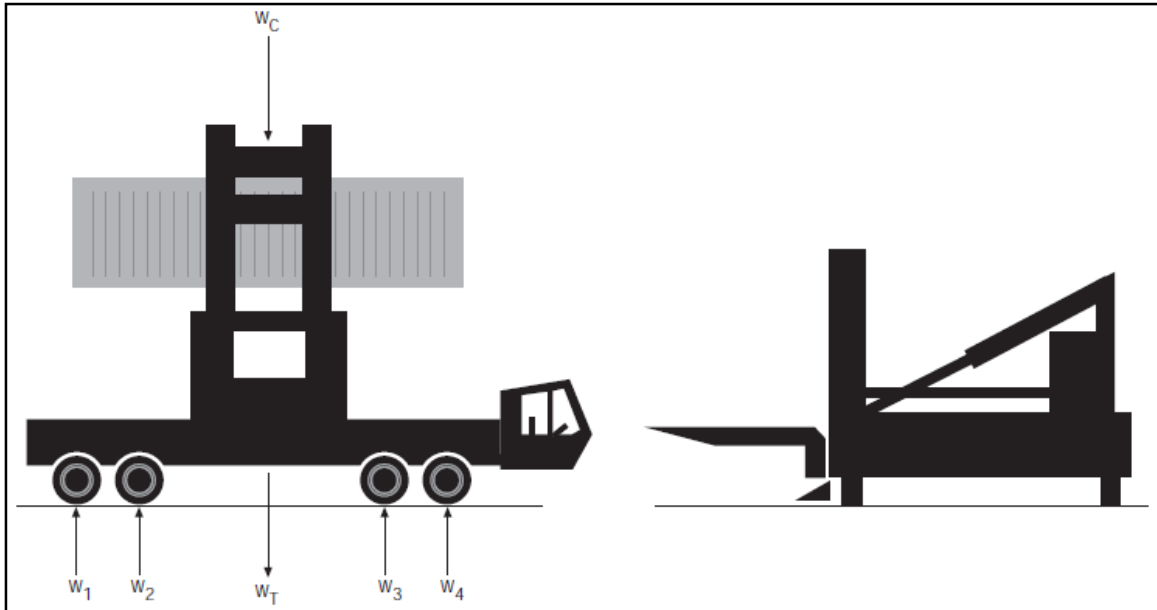
$W_c$  = Peso del contenedor (Kg).

$M$  = Número total de llantas del equipo.

$f_d$  = Factor dinámico

c) **Elevadores laterales:** Este es otro de los equipos de circulación no restringida que se emplea para el traslado de contenedores y que en el momento de cargar o descargar descansa sobre apoyos metálicos, este tipo de equipos no tiene un uso muy habitual dentro de los puertos o áreas industriales, los pesos que este trasmite al pavimento se pueden ver en la Figura 21, en lo referente al cálculo de las cargas transmitidas al pavimento la Ecuación 12 permite calcular la rueda más cargada del equipo y esta usarla en el dimensionamiento del pavimento.

Figura 21. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de los elevadores laterales.



Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 47.

$$W_i = f_d \times \left[ U_i + \frac{W_c}{M} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

$W_i$  = Carga de la rueda cargada del equipo (Kg).

$U_i$  = Carga de la rueda descargada del equipo (Kg).

$W_c$  = Peso del contenedor (Kg).

$M$  = Número total de llantas del equipo.

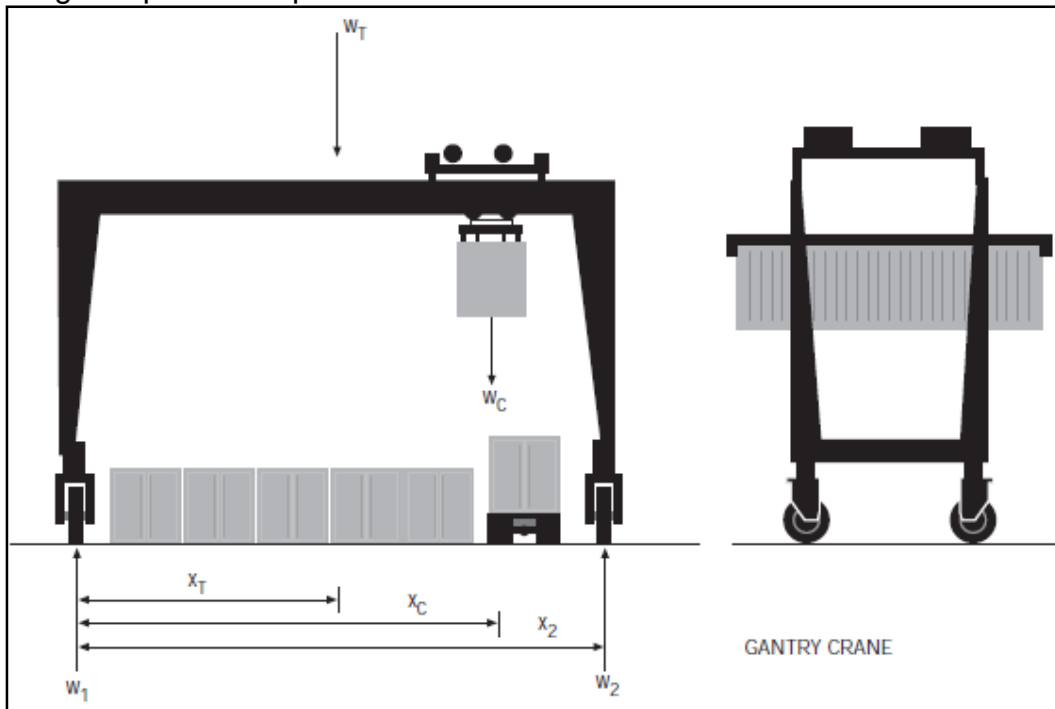
$f_d$  = Factor dinámico.

d) **Grúas pórtico de patio (RTG):** Este tipo de equipos son de movilidad restringida, está destinado a la manipulación de contenedores como se muestra en la Figura 22. La función principal de estas grúas es descargar contenedores de camiones o tractores de terminales y cargarlos en el bloque de contenedores o viceversa.

El cálculo de las cargas que ejerce el equipo sobre el pavimento se realiza mediante las ecuaciones Ecuación 13 y Ecuación 14, en la cuales para el cálculo de estas cargas se deben tener en cuenta los factores de aumento y disminución de las cargas cuando el equipo entra en operación los cuales se deducen de la Ecuación 15 y la Ecuación 16.

Dentro del manual también se expresa que se debe tener en cuenta los factores dinámicos de la grúa cuando se encuentra descargada esto debido a que las ruedas delanteras y traseras pueden tener diferentes cargas cuando está en movimiento.

Figura 22. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas de las grúas pórtico de patio RTG.



Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 48.

$$W_1 = fd \times \left[ U_1 + \frac{A_1 \times W_c}{M} \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

$$W_2 = fd \times \left[ U_2 + \frac{A_2 \times W_c}{M} \right] \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

$W_1$  = Carga de la rueda de la grúa cargada (Kg).

$W_2$  = Carga de la rueda de la grúa descargada Kg).

$W_c$  = Peso del contenedor (Kg).

$M$  = Número total de llantas de la grúa.

$f_d$  = Factor dinámico.

$$A_1 = 1 - \frac{x_c}{x_2} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$A_2 = \frac{x_c}{x_2} \quad \text{Ecuación 16}$$

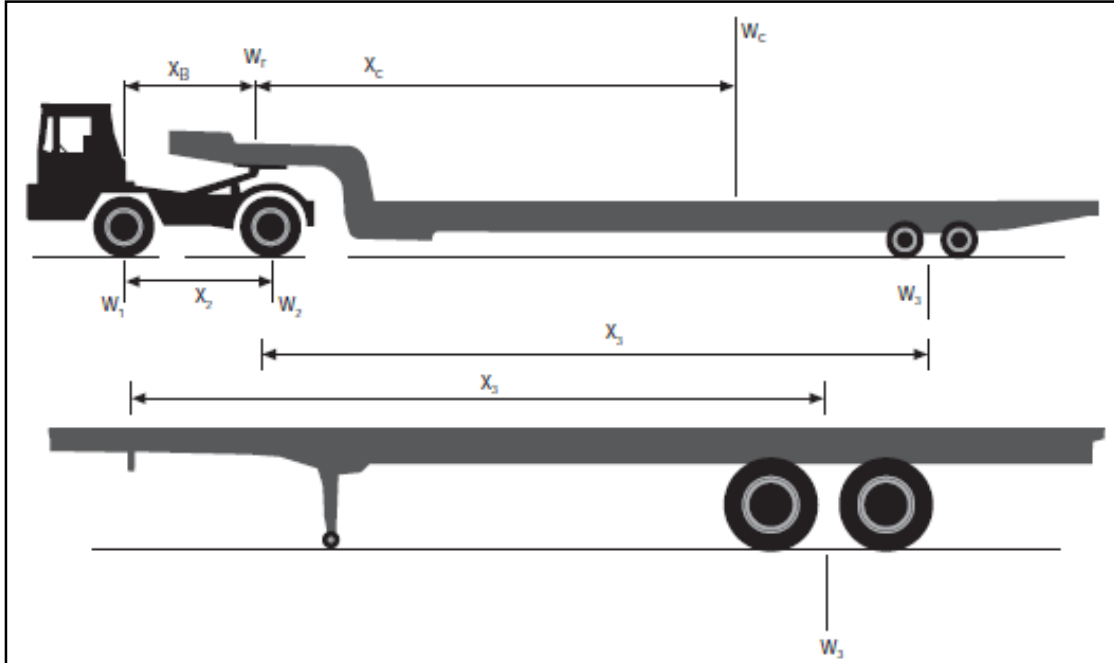
$U_1$  = Peso de la grúa pórtico vacía en cada rueda del lado 1 (kg).

$U_2$  = Peso de la grúa pórtico vacía en cada rueda del lado 2 (kg).

$X_2$  y  $X_c$  = Se muestran en el diagrama de la Figura 22; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

e) **Sistemas de tractores y remolques:** Este tipo de vehículos son de uso frecuente en la actividad portuaria e industrial, estos operan generalmente en los accesos a los patios industriales y los puertos, por lo cual es este tipo de vehículo el que proporciona los parámetros de diseño de los pavimentos en los accesos y salidas de los terminales industriales y portuarios como, mediante las ecuaciones Ecuación 17, Ecuación 18 y Ecuación 19 se calculan las cargas que los remolques transmiten al pavimento, para el cálculo de dichas cargas se debe tener en cuenta que por medio de la Ecuación 20 y Ecuación 21 se deben calcular los factores de ajuste de las cargas a cuenta de la operación del vehículo, en la Figura 23 se ilustra el tipo y a su vez las cargas y dimensiones que se requieren para el cálculos de las cargas para el dimensionamiento de una estructura del pavimento.

Figura 23. Dimensiones y pesos utilizados en los cálculos de carga de ruedas para sistemas de tractores y remolques.



Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 49.

$$W_1 = fd \times \left[ U_1 + \frac{W_c [1 - A] \times [1 - B]}{M_1} \right] \quad \text{Ecuación 17}$$

$$W_2 = fd \times \left[ U_2 + \frac{W_c [1 - A] \times B}{M_2} \right] \quad \text{Ecuación 18}$$

$$W_3 = fd \times \left[ U_3 + \frac{W_c \times A}{M_3} \right] \quad \text{Ecuación 19}$$

Dónde:

$W_1$  = Carga en las ruedas delanteras del tractor (kg).

$W_2$  = Carga en las ruedas traseras del tractor (Kg).

$W_3$  = Carga en las ruedas del remolque (kg).

$W_c$  = Peso del contenedor (o carga) (kg).

$M_1$  = Número de ruedas delanteras en el tractor.

$M_2$  = Número de ruedas traseras en el tractor.

$M_3$  = Número de ruedas en el remolque.

$U_1$  = Carga en las ruedas delanteras del tractor - descargado (kg).

$U_2$  = Carga en las ruedas traseras del tractor - descargado (kg).

$U_3$  = Carga en las ruedas del remolque - descargado (kg).

$f_d$  = factor dinámico.

$$A = \frac{X_c}{X_3} \quad \text{Ecuación 20}$$

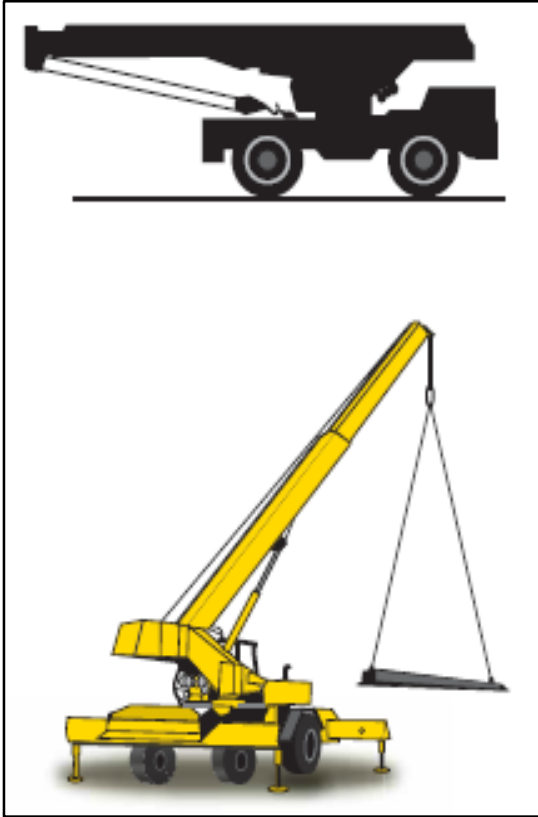
$$B = \frac{X_b}{X_2} \quad \text{Ecuación 21}$$

$X_c$ ,  $X_b$ ,  $X_3$  y  $X_2$  se muestran en el diagrama de la Figura 23

f) **Grúas móviles:** Grúa montada normalmente sobre ruedas la cual es capaz de desplazarse sin restricciones por toda una superficie como se puede observar en la Figura 24, este tipo de grúas generalmente usan estabilizadores para mejorar su estabilidad, por lo que este factor puede constituir una configuración de carga crítica, por medio de la Ecuación 22 se debe calcular la carga que transmiten las rudas de la grúa al pavimento.



Figura 24. Configuración típica de una grúa móvil.



Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 50.

$$W = \frac{W_T}{M}$$

Ecuación 22

Dónde:

$W$  = Carga en las ruedas de la grúa (kg)

$W_T$  = Peso propio de la grúa (kg).

$M$  = Número total de ruedas en la grúa.

**3.1.4 Diseño de fundaciones.** Dentro de los criterios que presenta el manual se tiene una característica importante en lo referente a la subrasante, para esta se tiene que esta debe tener como mínimo un valor de CBR del 5%, de no ser así se debe diseñar un mejoramiento, por lo cual se debe disponer de una capa granular para el mejoramiento de la subrasante llamada por el Dr. Knapton como capa de recubrimiento y sobre esta se dispone una capa de subbase, las cuales comprenden la cimentación de una estructura de pavimento de uso industrial.

3.1.4.1 **Espesor de subbase y recubrimiento:** Las cimentaciones de un pavimento de tipo industrial generalmente comprenden una capa de subbase y como se dijo previamente cuando se presenta una subrasante con CBR inferior al 5% se debe también disponer de una capa de recubrimiento. La Tabla 11 muestra los espesores para cada una de estas dos capas utilizando material de Clase 1 el cual corresponde a un materia granular con un módulo de rigidez de 50 MPa en el caso del recubrimiento y material de Clase 2 el cual pertenece a un material granular con módulo de rigidez de 100 MPa a en el caso de una subbase, los espesores de estas capas tiene espesores más altos que los que comúnmente se tienen en pavimentos para carreteras, los valores de la Tabla 11 se desarrollaron teniendo en cuenta cuando el CBR de la subrasante es inferior al 5%.

Es importante tener en cuenta que el material de subbase que se contempló para la realización de la Tabla 11 tiene un CBR del 80%, estos materiales son difíciles de obtener por lo cual se recomienda que se usen materiales estabilizados con cemento, para lo cual se debe obtener el espesor de la subbase de la Tabla 11 y seguido convertirla con los factores de equivalencia de los materiales que el manual dispone en la Tabla 6 a una capa estabilizada con cemento la cual generalmente tiene una resistencia superior con respecto a las capas no estabilizadas y esto permite que se reduzcan los espesores de las capas.

Tabla 11. Subbase sin compactar y espesores de recubrimiento para varios valores de CBR de la subrasante.

<b>CBR de la subrasante</b>	<b>Espesor del recubrimiento (mm)</b>	<b>Espesor de la subbase (mm)</b>
1%	900	150
2%	600	150
3%	400	150
4%	250	150
>5%	No requiere	150

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 52.

**3.1.5 Diseño de sobrecapas.** El manual expresa que un pavimento bien diseñado y construido debe seguir siendo utilizable durante toda su vida útil, sin embargo, el pavimento está sujeto a esfuerzos por causas climáticas y por efecto del tránsito. Incluso un pavimento bien diseñado puede sobrecargarse por causas impredecibles dentro del proceso de diseño por lo cual el pavimento puede que solo permanezca útil una parte de su vida útil por lo que hay que contemplar que en algún momento el pavimento va a requerir ser reforzado o de lo contrario el deterioro lo dejara fuera

de servicio.

Una de las recomendaciones principales que hace en el manual el Dr Knapton es que cuando se haya terminado el proceso de construcción de un pavimento industrial se realice una revisión del estado general del pavimento acompañado de una revisión de niveles.

Cuando un pavimento inicia su deterioro su degradación total es muy acelerada, particularmente cuando está expuesto a condiciones climáticas adversas, sin embargo, si se realizan trabajos de rehabilitación o reforzamiento del pavimento este prolongara su vida útil de considerablemente lo cual trae beneficios económicos en las zonas industriales.

La rehabilitación del pavimento puede tener causas distintas a las de la resistencia como por ejemplo puede ser para restaurar la resistencia al deslizamiento, sin embargo, el manual de la BPA no contempla sino rehabilitaciones por causa de la pérdida de resistencia del pavimento. Para el diseño de reforzamientos de los pavimentos se debe iniciar por evaluar la resistencia residual del pavimento existente para posteriormente calcular los espesores y las propiedades de las mezclas adicionales que se pretendan colocar como refuerzo al pavimento.

3.1.5.1 Calidad del concreto del pavimento in situ. Existen tres tipos de rehabilitación de pavimentos: capa delgada ligada, Sobrelosa de concreto y capas de pavimento flexible, sin embargo, el Dr. Knapton recomienda que para fines de reforzamiento se debe considerar solo las dos últimas opciones esto debido a que son las únicas que puede aportar resistencia al pavimento.

Cuando se requiere un aumento en la resistencia del pavimento, se debe usar una losa de concreto. Esto puede ser de concreto liso, reforzado, reforzado continuamente o reforzado con fibra. Es una práctica común colocar nuevas juntas de pavimento sobre las juntas antiguas. Antes de construir cualquier sobrecapa se deben corregir todos los daños que tenga el pavimento y las áreas que tengan excesos de daños deben ser reemplazados en su totalidad. También se tiene la alternativa de utilizar adoquines de concreto o capas de concreto asfáltico sin embargo se debe tener especial cuidado con la reflexión de grietas especialmente cuando se usa asfalto.

3.1.5.2 Pavimento flexible convencional. Los materiales asfálticos alternativos más comunes en sobrecapas son: el asfalto de trabajo pesado (HDM) y la mezcla densa en caliente (DBM), se debe tener en cuenta que si la capa de rodadura existente se encuentra en buen estado y se requiere un aumento mayor de la resistencia del pavimento se puede colocar una losa de concreto sobre la superficie existente o aplicar una capa base granular estabilizada con cemento antes de colocar la sobrecapa de concreto asfáltico. Si se usan adoquines se debe tener bastante cuidado los materiales que se usan para llenar las depresiones esto debido a que si no se hace uso de materiales correctos e puede conducir a nuevas deformaciones superficiales en el pavimento.

**3.1.6 Técnicas de sobrecapa alternativas.** El manual dispone de varias técnicas para los tres tipos de sobrecapas que se pueden aplicar a un pavimento industrial, para esto el Dr. Knappton dispuso en el manual de la Tabla 12 con las técnicas para los diferentes tipos de capas de rodadura.

Tabla 12. Técnicas de sobrecapa alternativas sugeridas para cuatro tipos de pavimento existente.

<b>Adoquines de concreto</b>	<b>Concreto rígido</b>	<b>Asfalto</b>
Levante los bloques, vuelva a nivelar la capa de material afectado y reemplace los bloques.	Coloque las losas de concreto	Coloque HDM/DBM adicional
Levante bloques, fortalezca la base y reemplace los bloques.	Colocar HDM/DBM	Coloque adoquines de concreto
Quite los bloques, quite la capa de material afectado, fortalezca la base y coloque HDM/DBM.	Colocar HDM/DBM o adoquines	Coloque una sobrelosa de concreto sin unir
Quite los bloques, quite la capa de material afectado y coloque el concreto.		Fortalecer y colocar una nueva capa de rodadura
Quite los bloques, quite la capa de material afectado y coloque los bloques.		

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 69.

3.1.6.1 Técnica de diseño de la sobrecapa. En primera medida lo que se busca en los pavimentos existentes es calcular la resistencia de las capas de

pavimento que se tiene instaladas, para esto en términos generales se tienen tres tipos de técnicas para evaluar la resistencia de cada una de las capas:

- Método de viga de deflexión (TRL)
- Método del deflectómetro de impacto o método de carga de pulso (Shell)
- Método de análisis de componentes (Instituto del Asfalto de los Estados Unidos).

Las dos primeras técnicas pese a ser muy utilizadas en las carreteras a nivel mundial no son aplicables a las pruebas de pavimentos pesados esto debido a que están estandarizadas con las cargas de los vehículos convencionales de las carreteras, por lo que para la evaluación de la resistencia de los materiales de pavimentos industriales se dispone del método de análisis de componentes desarrollado por el Instituto del Asfalto de los Estados Unidos.

El método de análisis de componentes fue modificado en el manual de la BPA, su principal cambio está basado en que originalmente el instituto del asfalto transforma cada capa del pavimento existente a si equivalente en asfalto, valiéndose de esta técnica el Dr. Knapton modifico el criterio levándolo q que la conversión de las capas ya no se diera a equivalentes de asfalto sino a equivalentes de C8/10 esto con el fin de poder usar toda la técnica desarrollada en el manual.

Con la técnica de determinación de resistencia de los matearles, se busca llevar todo el paquete estructural a un espesor equivalente de C8/10, para esto se requiere determinar con alto grado de precisión los espesores de cada una de las capas del pavimento existente, para esto será necesario tomar núcleos de prueba para obtener la información real de las condiciones de las capas del pavimento. Estas pruebas se deben llevar a cabo de modo que cada una represente aproximadamente un área de 500m<sup>2</sup> de pavimento.

En ciertas ocasiones, las propiedades de los materiales pueden haber cambiado desde que se usaron inicialmente, esto debido a la acción de la cementación o a la mezcla con otros materiales de las otras capas del pavimento y es de gran importancia saber si esta condición ha ocurrido. Las muestras también se usan para determinar la condición de cada una de las capas y de esta manera puedan ser seleccionados los factores de condición apropiados para cada una de las capas, sin embargo, para las capas inferiores es difícil evaluar el estado de las capas por lo que se deben tener consideraciones conservadoras en estas capas.

Una vez identificadas las propiedades y espesores de cada capa se transforman al espesor equivalente de C8/10 multiplicando su espesor por el factor de equivalencia de los materiales.

Los factores de condición de los pavimentos industriales según la BPA son dos: un factor por condición de grietas y astillamientos que se presenta en la Tabla 13 y un segundo factor por condición por un grado máximo de ahuellamiento que se muestra en la Tabla 14.

Tabla 13. Factor de condición para grietas y astillamientos.

<b>Condición del material</b>	<b>CF1</b>
Como nuevo	1.0
Agrietamiento ligero	0.8
Agrietamiento sustancial	0.5
Completamente agrietado o astillado	0.2

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 72.

Tabla 14. Factores de condición para un grado máximo ahuellamiento localizado y asentamiento localizado.

<b>(mm)</b>	<b>(Pulg)</b>	<b>CF2</b>
0 a 10	0 a 1/2	1
11 a 20	1/2 a 1	0.9
21 a 40	1 a 3 1/4	0.6
40 +	3 1/4 +	0.3

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 72.

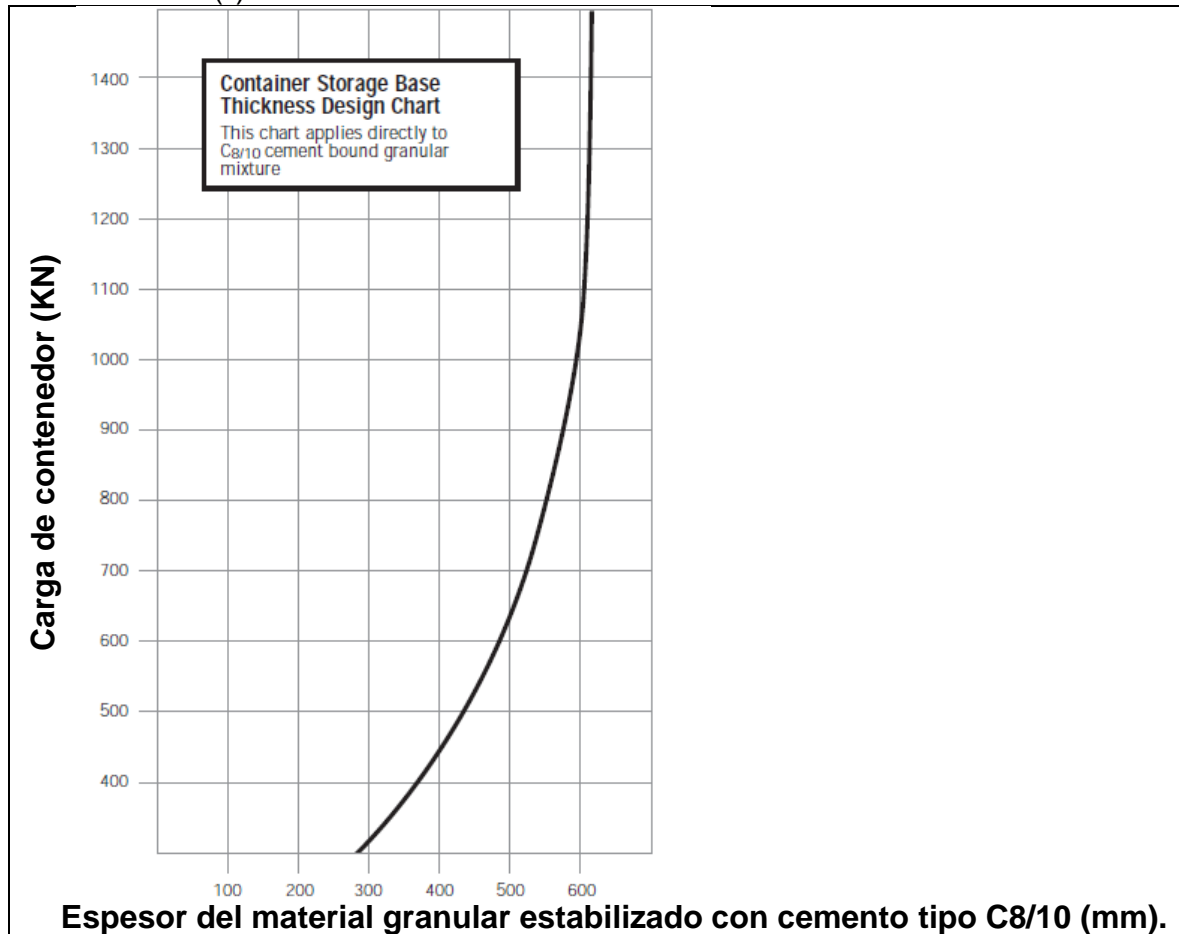
El primer factor tomado de la Tabla 13 se usa para pavimentos flexibles y rígidos, y los factores de la Tabla 14, tiene en cuenta la reducción de la resistencia de los materiales provocada por el ahuellamiento y la sedimentación de los materiales, cuando no se presentan deformaciones o grietas los factores de condición se toman como 1.0 es decir que el material es como nuevo.

Los espesores transformados de cada una de las capas se deben multiplicar por los dos factores de condición, y la suma de los espesores transformados se toma como el espesor equivalente del pavimento el cual se usa para el diseño de la sobrecapa. Una vez se tiene el espesor equivalente de pavimento se procede a diseñar el pavimento como si fuera una estructura nueva esto con el fin de determinar la diferencia del espesor total del pavimento existente versus el requerido para cumplir las solicitaciones del proyecto lo cual será el valor de refuerzo requerido por el paquete estructural. Una vez se calcula el espesor del refuerzo se procede mediante la tabla de equivalencia de materiales a transformar la capa de C8/10 a la capa o capas que se quieran para el reforzamiento del pavimento.

**3.1.7 Cartas de diseño.** El diseño de un pavimento industrial bajo las premisas del manual de la BPA se debe llevar a la determinación de la capa de C8/10 CBGM para lo cual se dispone de dos cartas de diseño, la primera que se muestra en la Figura 25 se utiliza para la obtención del espesor de C8/10 cuando se usan cargas por contenedores y la segunda igualmente presentada en la Figura 26; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se emplea para determinar el espesor de C8/10 pero cuando el diseño está evaluando cargas aplicadas por los equipos de manipulación de cargas.

- La primera carta de diseño presentada para el cálculo de espesor de material tipo C8/10 (Figura 25), en su eje vertical indica la carga de rueda equivalente única, en su interior dispone de un curva con la cual se debe cortar y desplazándose verticalmente se intersecta el eje horizontal el cual representa el espesor es de C8/10 para el diseño de la base para el almacenamiento de contenedores.

Figura 25. Carta de diseño de espesor de la base para almacenamiento de contenedores (\*).

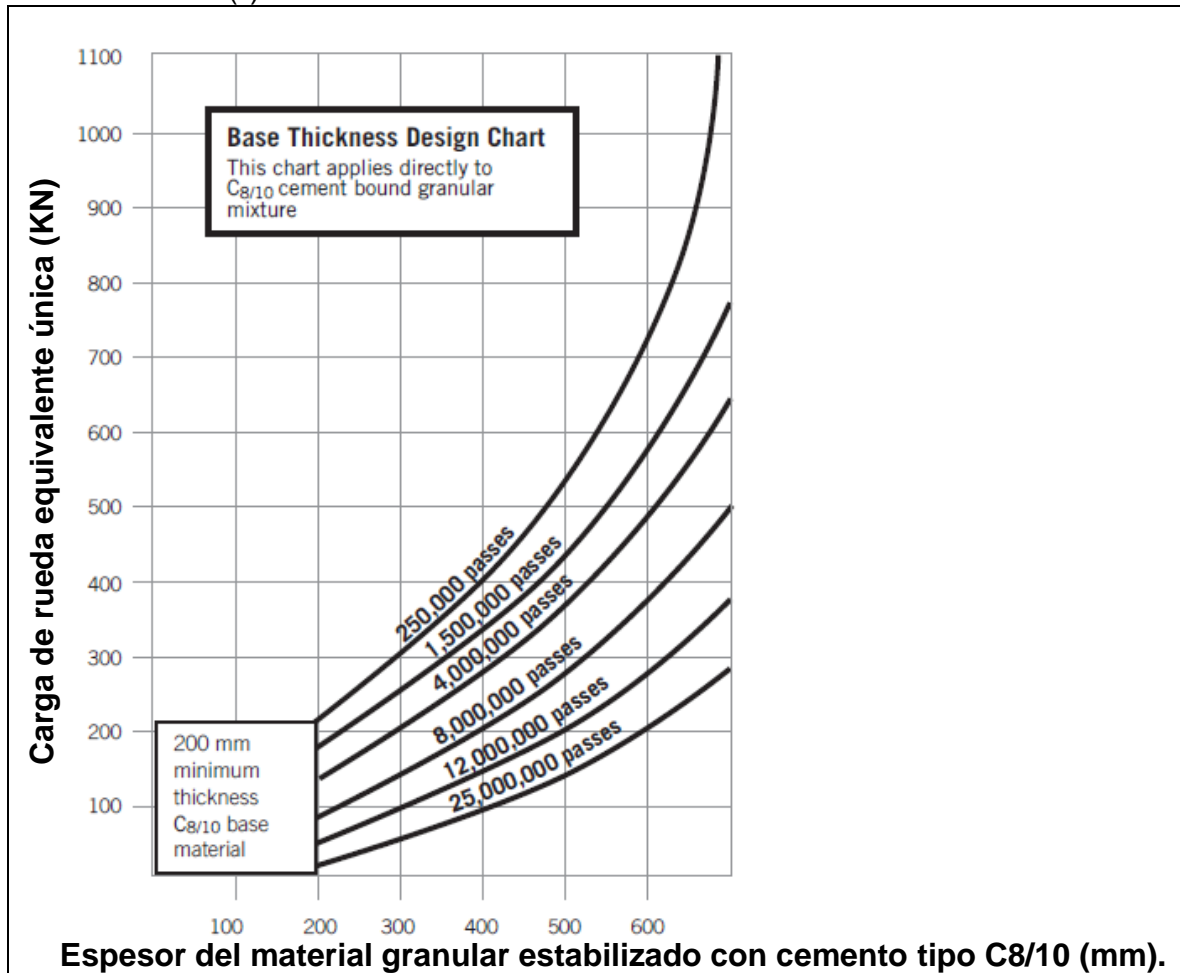


(\*) Esta carta de diseño se aplica directamente a la mezcla granular estabilizada con cemento C8/10. Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 83.

- La segunda carta de diseño la cual se presenta en la Figura 26, también muestra en el eje vertical la carga de rueda equivalente única y en su contenido interno presenta 6 curvas de diseño correspondientes a al número de pasadas calculadas para la vida de diseño del pavimento las cuales se deben cortar horizontalmente y en caso de que el valor calculado no corresponda con ninguna de las curvas se debe interpolar, así mismo desplazarse en la vertical hasta intersectar el eje horizontal que representa el espesor de material granular estabilizado con cemento tipo C8/10.



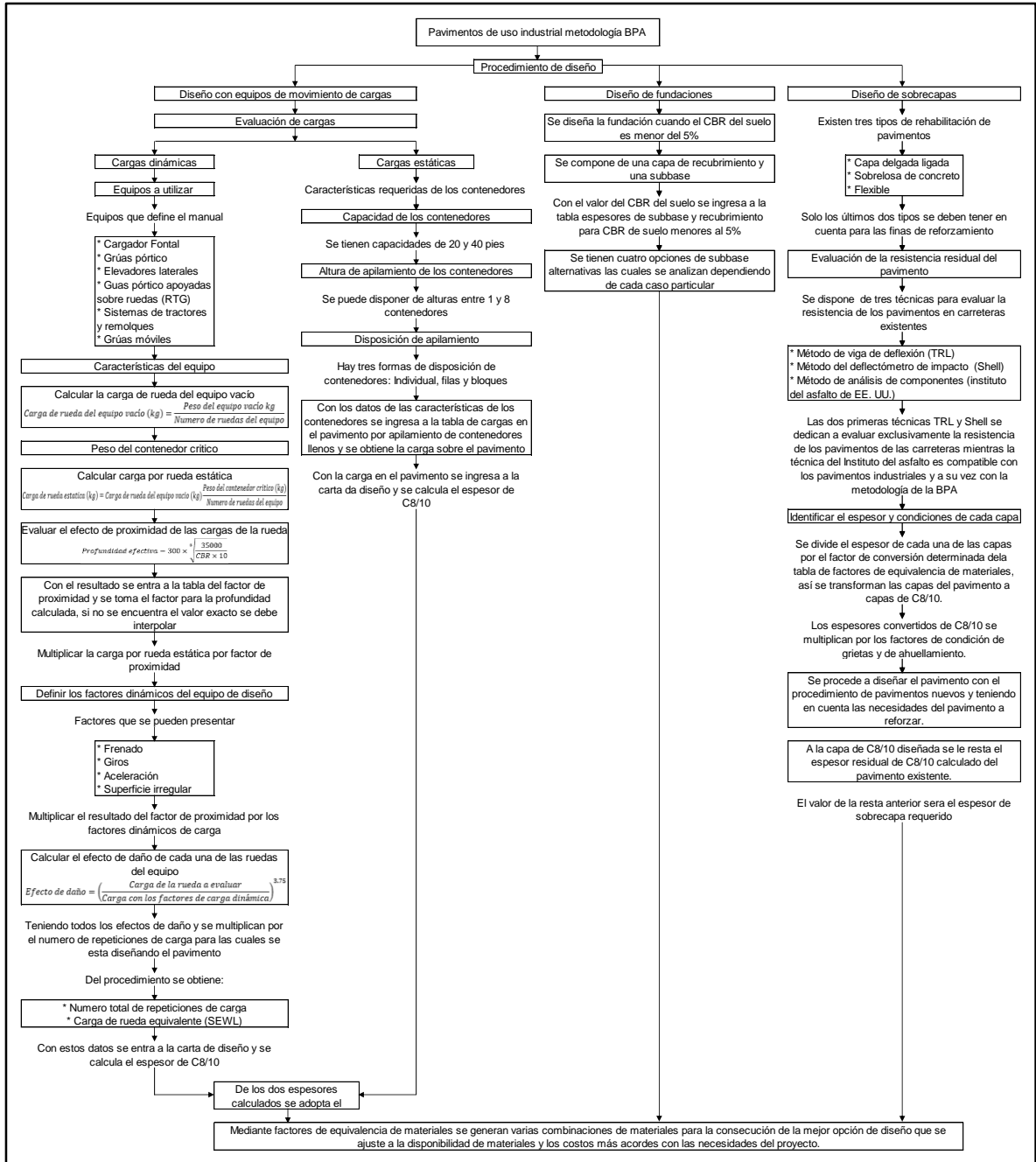
Figura 26. Carta de diseño para el espesor de la base para equipos de manipulación de mercancías (\*).



(\*) Esta carta de diseño se aplica directamente a la mezcla granular estabilizada con cemento C8/10. Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 84.

Para una fácil interpretación del procedimiento de diseño con la metodología de la BPA se elaboró un diagrama de flujo que se muestra en la Figura 27 en el que se presenta el procedimiento de diseño que se debe seguir para la obtención de una estructura de pavimento según los lineamientos establecidos por la BPA

Figura 27. Diagrama e flujo de la metodología de diseño de pavimentos industriales de la BPA.



Fuente: Elaboración propia a partir del Manual Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007

## 3.2 GUÍA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS INDUSTRIALES EN CONCRETO CON METODOLOGÍA PCA (PORLAND CEMENT ASSOCIATION)<sup>19</sup>

El manual de diseño de pisos industriales de la PCA se refiere a los pisos internos con losas de concreto que son apoyadas sobre el suelo o sobre pilotes que se encuentran principalmente en bodegas y en zonas comerciales las cuales pueden estar a temperatura ambiente o temperaturas controladas como es el caso de los frigoríficos.

Los autores de esta guía recomiendan principalmente que el manual no está propuesto para el uso en diseño o construcción de pavimentos externos, muelles y zonas de almacenamiento de contenedores portuarios y mucho menos para entrepisos convencionales en edificios.

El manual de la PCA enmarca los diseños dentro de unos componentes esenciales los cuales son tenidos en cuenta a la hora de generar un modelo de pisos industriales de concreto, los principales factores tenidos en cuenta dentro del diseño son:

- Subrasante y materiales granulares.
- Cargas impuestas al pavimento.
- Capacidad estructural de la losa de concreto.
- Factor de seguridad del diseño
- Factor de junta de las losas de concreto.

**3.2.1 Subrasante y estructuras de soporte.** Un piso industrial para soportar las cargas para las que fue diseñado debe garantizar un soporte adecuado sin asentamientos, por este motivo es de importante que el diseño contemple una adecuada preparación de la subrasante y los materiales granulares que vayan a soportar la losa del pavimento los cuales deben tener todas las cualidades de calidad y capacidad requeridas para que se cumplan a cabalidad con la función que se les encomienda dentro del paquete estructural del pavimento.

---

<sup>19</sup> PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Concrete Industrial Ground Floors. A guide to design and construction. 4th Edition. Londres. The concrete society. 2016. p. 11-59

3.2.1.1 Investigación del suelo de soporte. Para examinar las condiciones el suelo es recomendable que un ingeniero geotécnico se haga cargo de planificar la investigación del suelo e interpretar los resultados producto de los estudios, la investigación debe incluir la estimación de todos los parámetros necesarios para el diseño del soporte de la losa de concreto incluyendo el asentamiento producido por cargas a largo plazo. Esto debido a que los suelos cohesivos tienen a consolidarse con el efecto de las cargas impuestas el pavimento, lo que lleva a una sedimentación de la losa a largo plazo y este efecto podría dar lugar a un asentamiento diferencial entre las áreas muy cargadas y las poco cargadas, con un efecto desfavorable sobre la regularidad superficial de las losas del pavimento.

Uno de los aspectos más relevantes a medir en la investigación del suelo es el valor del módulo de reacción de la subrasante “k”. Existen métodos de derivación de k a partir de la prueba de CBR, sin embargo, la PCA expresa que esta conversión generalmente no es aceptable debido a que se obtienen valores con errores significativos que pueden conducir a diseños de pavimentos con deficiencias estructurales.

Para la correcta obtención del módulo de reacción de la subrasante el manual recomienda que se realice mediante el ensayo de placa de acuerdo con la norma EN 1997-2<sup>20</sup>. También, considera que las placas más grandes brindan mayor precisión y por lo tanto es preferible usar una placa de 750mm de diámetro. Si se utiliza un menor diámetro de la placa en el ensayo el valor de k se debe usar el factor de conversión que para el caso la norma determine. En general debe haber mínimo una prueba placa por cada 2000m<sup>2</sup> de pavimento.

Si bien la guía se recomienda que los valores k se determinen directamente a partir de las pruebas de carga de placas en la subrasante, se reconoce que en algunos casos esto no es posible y pueden ser necesarios métodos indirectos para evaluar el valor k de otros parámetros del suelo. En estos casos, se debe buscar el asesoramiento de un ingeniero geotécnico calificado y la evaluación debe tener en cuenta las inexactitudes inherentes del método utilizado.

3.2.1.2 Subrasante. La subrasante dependiendo de sus propiedades de resistencia puede requerir diferentes tratamientos para soportar una estructura de pavimento, por ejemplo, se puede usar el suelo natural directamente, capas

---

<sup>20</sup> Eurocode 7: Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

granulares de relleno, estabilización in situ o compactación directa. El suelo debe proporcionar un soporte uniforme y por lo tanto se debe procurar que el suelo sea homogéneo en sus características mecánicas.

Teniendo en cuenta que las losas de concreto son estructuras rígidas por lo que las cargas concentradas de las llantas de los montacargas o los postes de las estanterías son repartidas uniformemente a lo largo de la superficie de la losa, por lo que las cargas impuestas a la subrasante son normalmente bajas, por este motivo los pavimentos en concreto no requieren subrasantes muy rígidas, sin embargo tener un correcto soporte de la losa permite es beneficioso para las esquinas y las juntas de la ante las cargas impuestas por los montacargas. Si la subrasante es muy débil hay altas posibilidades de que el suelo se consolide lo cual índice a la pérdida de soporte en los bordes de la losa y por ende se generan fallas en las losas de concreto del pavimento.

3.2.1.3 Subbase. La capa de subbase de un pavimento permite transmitir la carga impuesta en la superficie a la subrasante lo cual genera una mejora en la capacidad de soporte del suelo, también proporciona una plataforma nivelada y firme para la construcción de las losas de concreto, estos son los principales beneficios de la capa de subbase.

La guía de la PCA recomienda que las subbases deben ser construidas a partir de materiales granulares resistentes y bien gradados, todos estos materiales deben estar bajo las especificaciones normativas respectivas lo cual le permitirá conocer a cabalidad las propiedades mecánicas de las mismas. Las mezclas con cemento son apropiadas en los casos que la capacidad de soporte sea muy baja y se requiera mejorarla, las mezclas siempre que se usen deben estar de acuerdo con las especificaciones apropiadas para el tipo de material que se quiera lograr.

Igualmente, el manual propone que si se usa un material de subbase granular este generalmente debe tener un espesor mínimo de 150 mm, sin embargo, si es necesario la utilización de un espesor menor se debe usar un material que contenga un tamaño máximo y una distribución tal que permita que la capar se pueda compactar dejando una superficie dura, plana, durable y con suficiente resistencia.

Es importante que la subbase este correctamente nivelada dentro de las tolerancias propias de ese tipo de estructuras esto con el fin de que la losa no tenga un espesor

inferior al que fue diseñado ya que esto lleva en dirección adversa de la capacidad de carga de la losa hasta niveles inaceptables. La PCA recomienda que la subbase acabada debe estar dentro del rango de 0 a 25mm del nivel de referencia de la capa.

3.2.1.4 Membranas. El principal objetivo de las membranas en un pavimento es reducir la fricción entre la losa y la subbase. Las membranas normalmente son de plástico de 300 micras, lo que lleva a afirmar que estas no compensan las variaciones que se tengan en los niveles de terminado de la subbase.

La lámina de plástico impedirá la pérdida de agua y finos desde el concreto hasta la subbase, sin embargo, en algunas ocasiones la membrana de deslizamiento de polietileno puede no proporcionar la suficiente resistencia a la salida de vapor de agua por lo cual se deben contemplar otras alternativas para solucionar esta deficiencia. Es importante colocar la membrana sin arrugas y que se envuelva en los bordes al menos 300mm y se debe tener estricto cuidado de que no se dañe durante el proceso de construcción del pavimento.

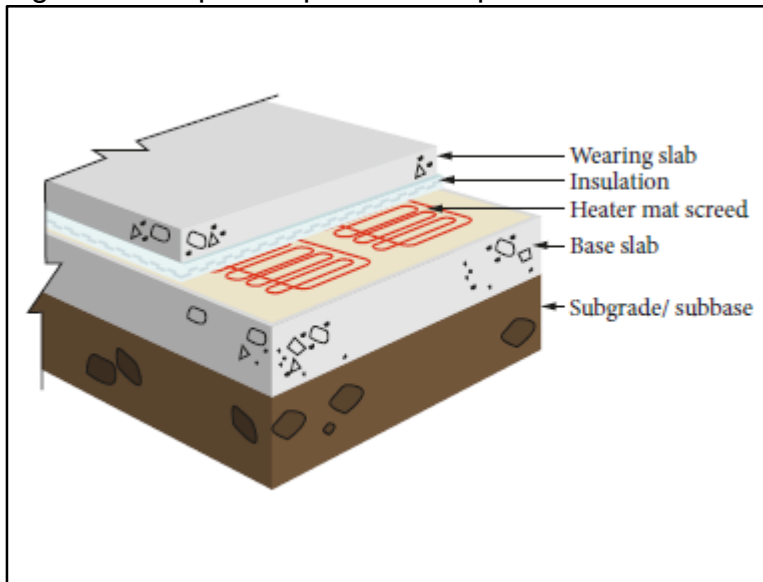
3.2.1.5 Losas de aislamiento. Los pisos en bodegas con control de temperatura deben tener una capa de aislamiento sobre una placa de calefacción para proteger las capas granulares de movimiento por congelación. La losa de aislamiento puede extenderse sobre una losa de concreto base que también puede soportar los paneles aislados de la cámara frigorífica.

El diseño de la losa de aislamiento no es diferente al de una losa soportada sobre el suelo, sin embargo, es necesario determinar un correcto módulo de reacción de la subrasante 'k'. Esto variara dependiendo del tipo de aislamiento, el espesor del aislamiento, la presencia o ausencia de una losa de base y en el caso de las losas apoyadas directamente sobre el suelo el módulo del suelo. Es de vital importancia determinar si el módulo de aislamiento es mayor o menor al módulo de reacción de la subrasante, el valor de k y el espesor del aislamiento debe obtenerse por el fabricante, los efectos de fluencia del material a largo plazo también deben considerarse en la evaluación del módulo de reacción de la subrasante.

La instalación de los equipos de calefacción puede ser difícil ya que en la bodega no se puede realizar un seguimiento exhaustivo al aislamiento por lo que se recomienda que el tendido se realice manualmente seguido de una capa ligera de

alisado de ser necesario. La estructura típica de un pavimento con losa de aislamiento se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Capas de pavimento típicas en cuartos fríos y cámaras frigoríficas.



Fuente: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Concrete Industrial Ground Floors. A guide to design and construction. The concrete society. 2016. p. 17

**3.2.2 Factores de junta.** Los factores de junta se basan en el concepto de transferencia de cargas y esta a su vez se refiere a la capacidad de una losa de trasladar parte de la carga impuesta a la losa contigua. La teoría afirma que una junta que transfiere la mitad de la carga a su losa vecina es una junta con el 100% de transferencia y así reduciendo las tensiones a las que se ven sometidas las losas en sus bordes.

Generalmente los factores de junta están enmarcados en si se dispone o no de un sistema de transferencia de cargas, los sistemas de transferencia de cargas usados por la guía de la PCA son principalmente las barras de transferencia de cargas y la trabazón de agregados. Los factores de junta usados habitualmente son los siguientes:

- Si la transferencia de carga se realiza por barras de transferencia de cargas se dispone de un factor de junta de 1.0

- La transferencia de carga se realiza por trabazón de agregados, para este tipo de transferencia y teniendo en cuenta las propiedades de los agregados y la experiencia del diseñador se dispone de un rango entre 1.1 y 1.5.
- Cuando la transferencia de cargas es muy precaria o no se dispone de ella se considera que se debe optar por un factor de junta de 1.6

**3.2.3 Factores de seguridad.** El manual de pisos industriales identifica que los factores de seguridad para cargas móviles han sido determinados por las experiencias propias obtenidas del desempeño de los pavimentos y estos consideran la influencia del número de repeticiones de carga, esfuerzos por contracción e impactos, a diferencia de las cargas dinámicas los factores de seguridad para cargas estáticas y distribuidas no están bien establecidas por falta de experiencia, por este motivo se le recomienda al diseñador que tome las precauciones necesarias para estas consideraciones de diseño y así determinar unas características de desempeño de la losa conservadoras.

Para pisos, el factor de seguridad es la relación de la resistencia a la flexión del concreto (módulo de ruptura) entre el esfuerzo de trabajo a flexión, lo que puede entenderse como la capacidad total admisible que pueda ocurrir antes de la falla, con la resistencia utilizada. Las recomendaciones de la PCA en materia de factores de seguridad para cargas móviles son las siguientes:

- Pisos o áreas con un gran número de repeticiones esperadas de los equipos, se recomienda diseñarlos con un factor de seguridad alto (de 2.0 o hasta 2.2).
- En las áreas en donde se espere menor tráfico de los equipos se puede emplear un factor de seguridad medio entre 1.7 y 2.0.
- En áreas no críticas, como áreas de almacenamiento sin un constante tráfico de montacargas, se puede manejar un factor de seguridad bajo de 1.4 a 1.7.

**3.2.4 Cargas aplicables a un piso industrial.** Las cargas comunes en los pisos de las bodegas de almacenamiento son las cargas puntuales de la estantería, las cargas asociadas a los equipos de manejo de materiales (MHE) y los entrepisos. Otras cargas surgen de cargas uniformemente distribuidas (UDL) como el apilamiento de productos estibados o materiales sueltos a granel y de cargas de línea tales como paredes internas y sistemas de rieles de piso.



3.2.4.1 Tipos de carga. El diseño de un pavimento industrial debe basarse en las cargas que puedan ser aplicadas por todo tipo de equipos, cargas puntuales, cargas uniformemente distribuidas y demás cargas que el diseñador tenga en cuenta según los usos futuros del piso. Las cargas puntuales provenientes de la estantería de estibados y los entrepisos se tratan como cargas estáticas, mientras que MHE se trata como una carga dinámica que atrae mayores factores de seguridad en el diseño.

El diseño del piso también debe tener en cuenta las cargas temporales de grúas u otros equipos de manejo de materiales utilizados durante la instalación, el mantenimiento y la eliminación de equipos de fabricación o almacenamiento. Tales cargas temporales pueden ser mayores que las cargas permanentes por lo que hay que ser previsivos de que equipos temporales van a hacer uso del pavimento industrial en todas sus etapas.

3.2.4.1.1 Equipos de bodega cargas estáticas. En muchas bodegas o zonas industriales es utilizada estantería para el almacenamiento de productos o materiales, las cargas que soportan las estanterías son transmitidas por los postes de la estantería al piso induciendo esfuerzos importantes. Este tipo de cargas genera unos esfuerzos de flexión que pueden ser más grandes que los esfuerzos causados por las cargas de las llantas de los equipos de manipulación de mercancías, por lo que las cargas de los postes de las estanterías pueden ser el factor más determinante en el diseño del espesor de la losa del pavimento.

El objetivo de diseño de las cargas por postes de estantería es mantener el esfuerzo por flexión dentro de los límites de seguridad de la losa. En el rango de las variables de diseño presentadas en el manual de la PCA, la flexión controla el diseño del espesor de la losa de concreto. Las bodegas industriales dependiendo de su uso manejan diferentes clases de estantería las cuales en sus principios básicos de carga función de manera similar, estanterías comúnmente usadas se presentan a continuación:

- Estantería espalda con espalda
- Estantería para estibas ajustable.
- Estantería móvil para estibas.
- Sistemas de almacenamiento vivo.
- Estanterías de entrada.

- Sistemas de estanterías de empuje hacia atrás.
- Bastidores en voladizo.
- Entrepisos o mezzanines.
- Estructuras de estanterías revestidas.

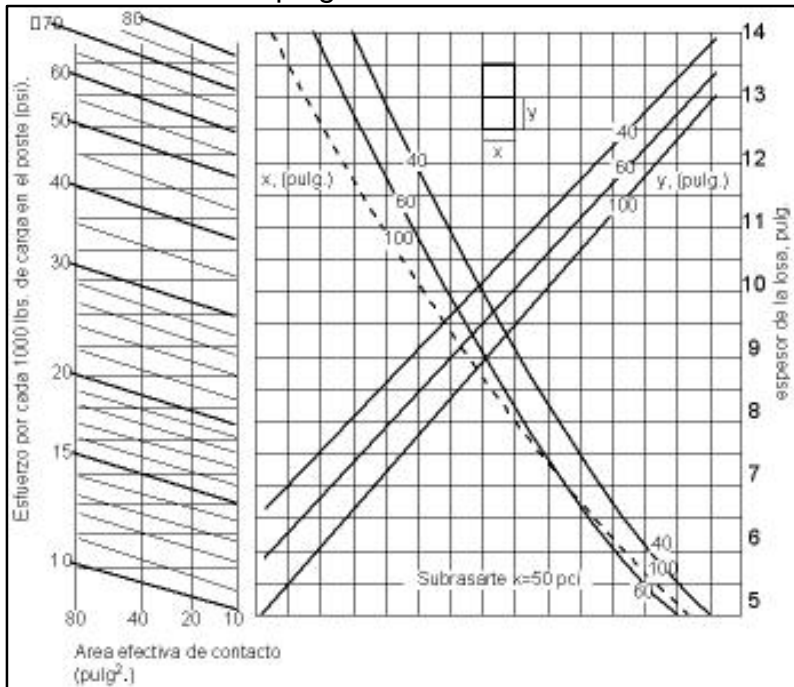
Teniendo en cuenta que la flexión de la losa es la que controla el diseño del espesor la información específica para el dimensionamiento de la losa es la siguiente.

- Carga máxima de poste.
- Área de contacto de la carga.
- Espaciamiento entre postes.
- Resistencia de la subrasante.
- Resistencia a la flexión del concreto, MR.
- Factor de seguridad.

La metodología de diseño de pisos industriales de la PCA, desarrollo 3 cartas de diseño para el dimensionamiento de la losa por cargas asociadas a estanterías, cada una de las gráficas representa un diferente módulo de reacción de la subrasante 50 (Figura 29), 100 (Figura 30; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y 200 Lb/pulg<sup>3</sup> (Figura 31), las cuales pretenden representar las condiciones genéricas de soporte del suelo que son bajas, medias y altas respectivamente.

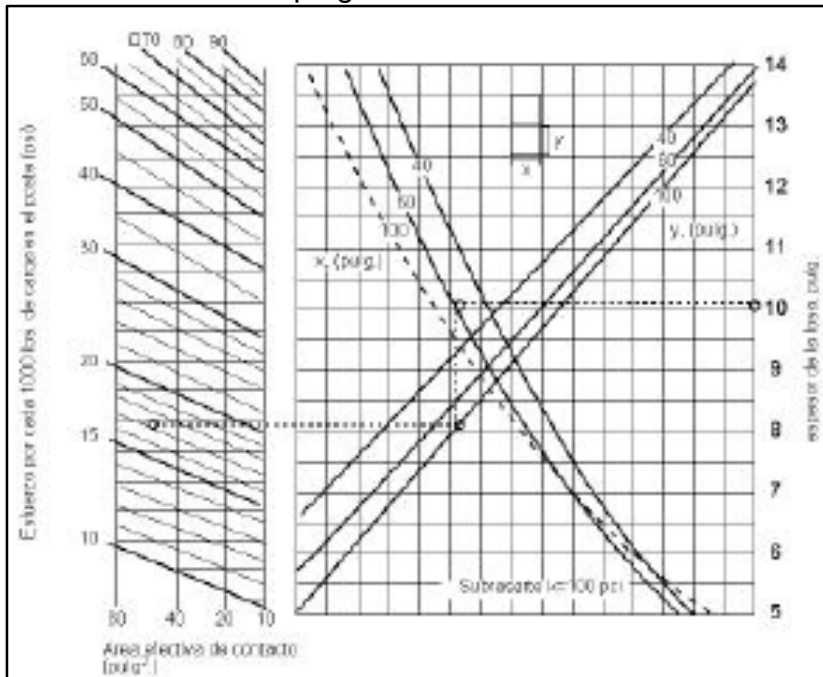
En las cartas de diseño de la Figura 29, Figura 30 y la Figura 31 el espaciamiento de los postes en Y es la separación en la dirección longitudinal de la estantería y X es la separación transversal. Las cartas de diseño proveen separaciones de 40 a 100 pulgadas por lo que las divisiones intermedias entre estas deben ser interpoladas en las cartas de diseño. Si dos postes de la estantería se encuentran muy cercanos como es el caso de la estantería espalda con espalda, los postes pueden asumirse que actúen como la equivalencia de la suma de las cargas.

Figura 29. Carta de diseño para cargas en poste, con subrasante de módulo de reacción  $k = 50 \text{ Lb/pulg}^3$ .



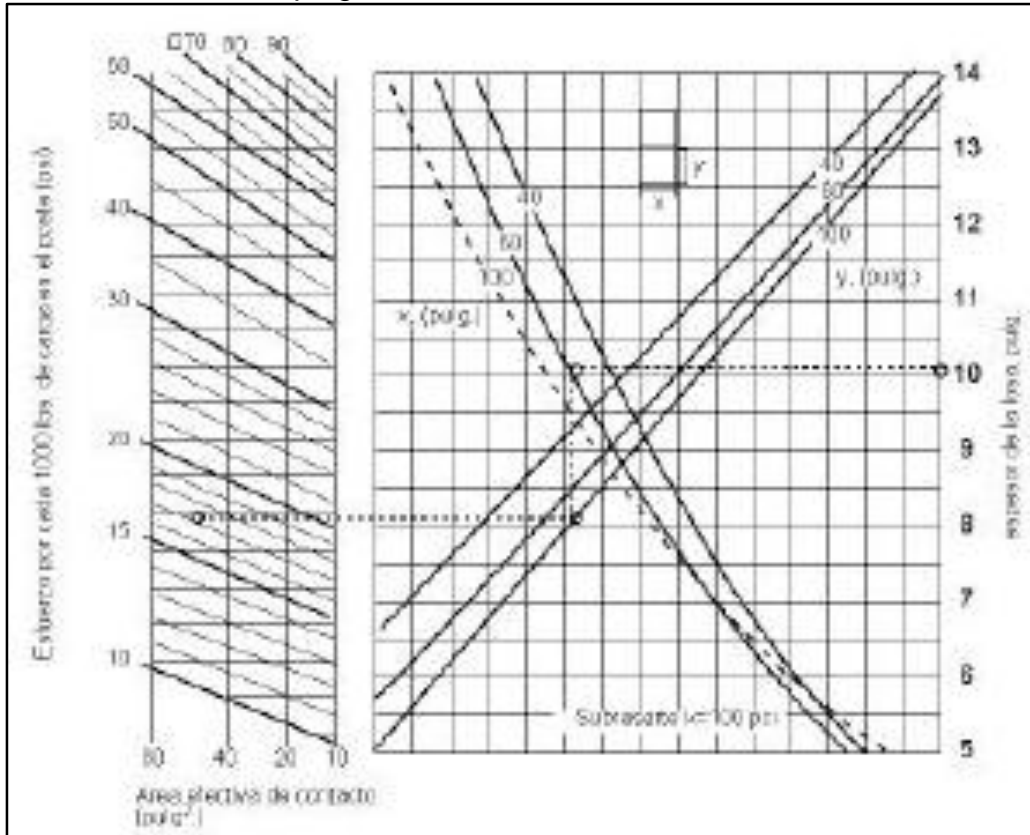
Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

Figura 30. Carta de diseño para cargas en poste, con subrasante de módulo de reacción  $k = 100 \text{ Lb/pulg}^3$ .



Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

Figura 31. Carta de diseño para cargas en poste, con subrasante de módulo de reacción  $k = 200 \text{ Lb/pulg}^3$



Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

3.2.4.1.2 Equipos de bodega – cargas dinámicas ( $\text{Lb/pulg}^3$ ). Para el diseño de pisos industriales que soporten las cargas impuestas por los equipos de manipulación de materiales, se debe conocer la composición de cada uno de los equipos dispuestos para el movimiento de las cargas dentro de la bodega o zona industrial. La capacidad de carga del equipo no es un indicador adecuado de las cargas que soporta el pavimento, la distribución de la carga y los pesos del eje puede variar significativamente entre la condición cargada y descargada, siempre que sea posible se deben usar los datos del fabricante del montacargas.

Existe un gran número de equipos de manipulación de cargas, los cuales dependiendo del uso de zona industrial pueden cambiar, sin embargo, la PCA determina que los equipos representativos para el diseño son aquellos que tienen ejes duales y sencillos en la parte frontal o de carga del equipo. La configuración anteriormente expuesta se encuentra en un gran número de equipos, a

continuación, se enuncian los equipos más comunes encontrados en bodegas industriales.

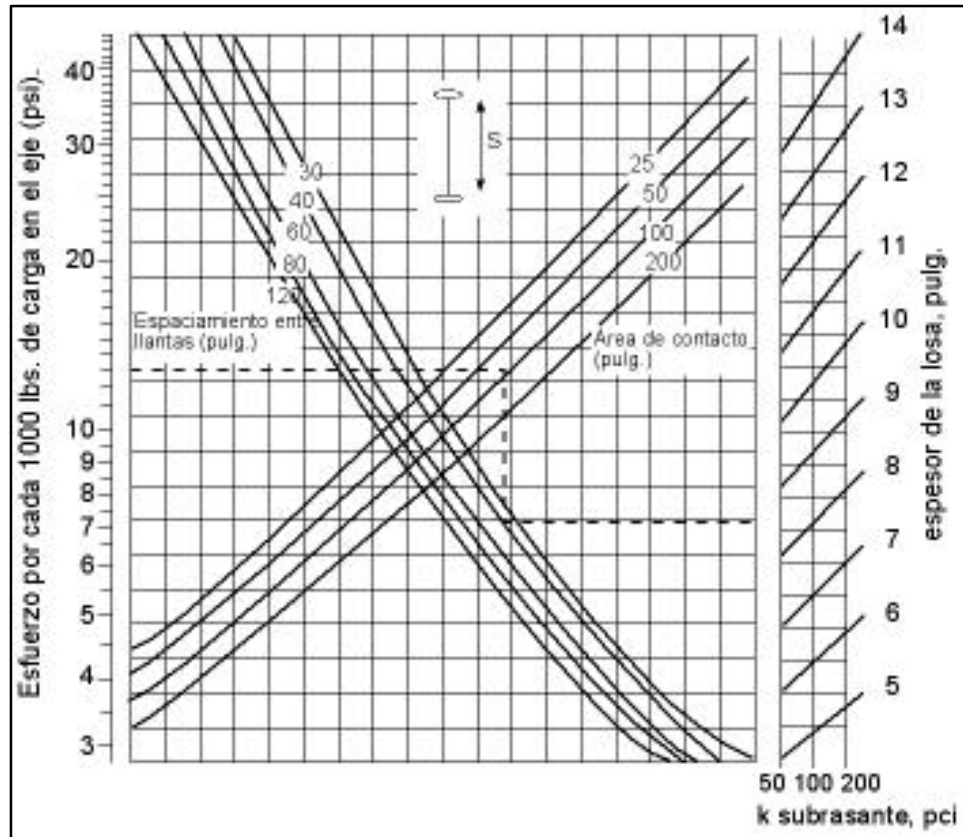
- Transpaletas.
- Montacargas con contrapeso.
- Montacargas de alcance.
- Montacargas frontales y laterales.
- Montacargas de contrapeso articulados.
- Grúas apiladoras.

Cuando se inicia un proyecto de diseño de una losa de concreto por cargas dinámicas, el procedimiento involucra la determinación de los siguientes componentes específicos para el diseño.

- Carga de eje máxima.
- Número de repeticiones de carga.
- Área de contacto de la llanta.
- Espaciamiento de ruedas del eje más pesado.
- Resistencia de la subrasante.
- Resistencia de flexión del concreto MR.
- Factor de seguridad.
- Transferencia de carga en las juntas.

Como se enuncio con anterioridad se tiene una gran variedad de tamaños, cargas por ejes y espaciamientos de las llantas de los montacargas, por este motivo la PCA no considero practico proveer cartas de diseño para cada vehículo en específico por lo tanto solo dispuso de dos características principales que es la configuración del eje de carga del equipo, sencillos (Figura 31) y duales (Figura 33).

Figura 32. Gráfica de diseño para la obtención de espesores de losa para ejes sencillos.

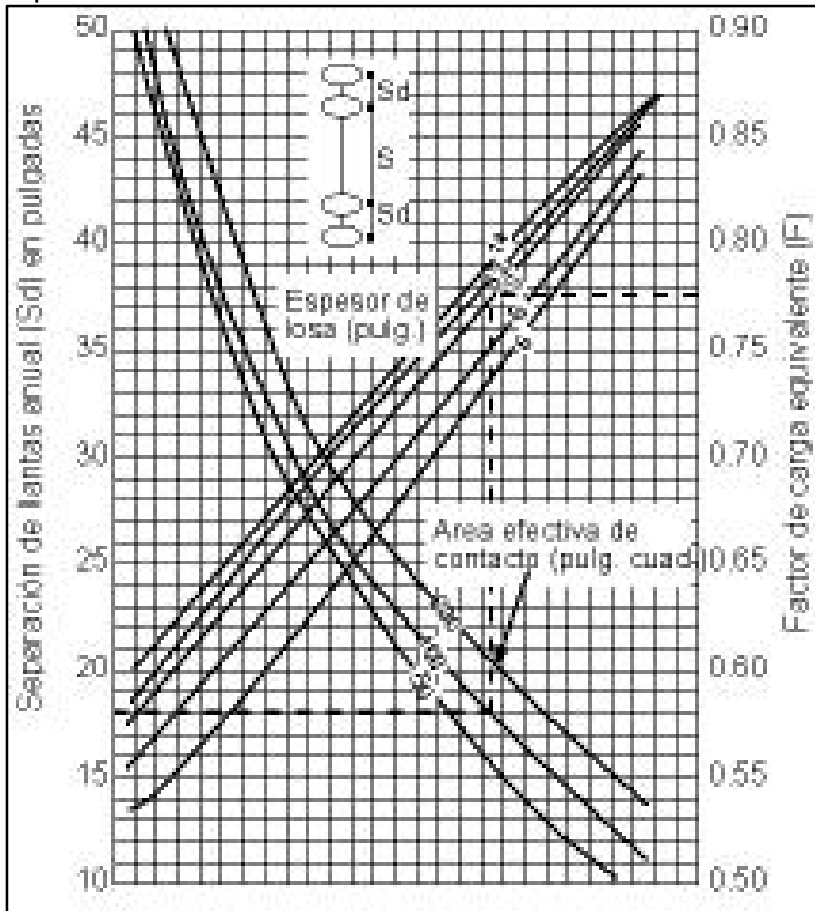


Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

En el uso de la Figura 33 es necesario suponer un espesor inicial de losa; esto es un proceso de prueba y error que se debe comprobar al final con el diseño de espesor requerido. Teniendo en cuenta que espesor inicial es hipotético, se debe corregir el área de contacto mediante la Figura 34 siempre que el área de contacto sea inferior a 100 pulg<sup>2</sup>, esto debido a que el grado de corrección se incrementa a medida que el área de contacto llega a ser muy pequeña y el espesor de la losa incrementa.

Dentro del diseño de los ejes duales se debe tener en cuenta que los ejes se convierten a ejes sencillos mediante la carta de diseño de ejes duales Figura 33 y posteriormente se obtiene el espesor de la losa a partir de la carta de la Figura 32

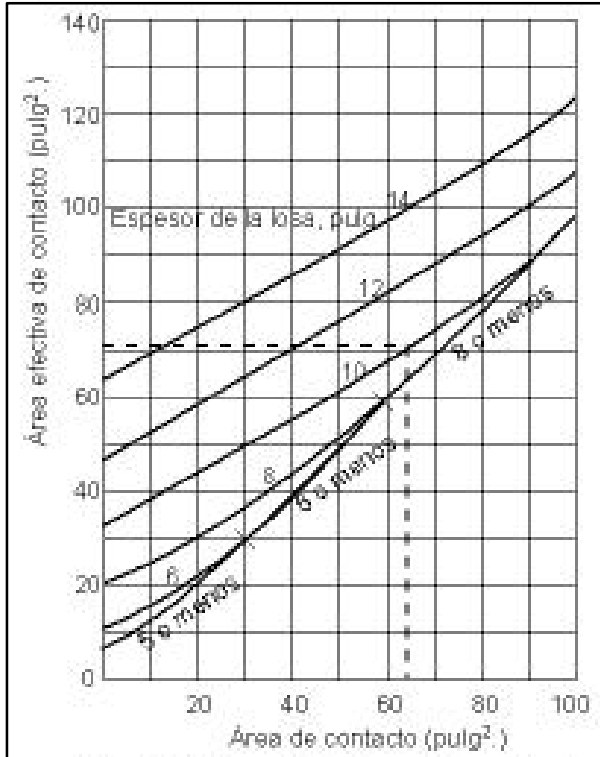
Figura 33. Gráfica de diseño para la conversión de ejes duales a ejes de carga equivalente.



Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

La grafica de presentada en la Figura 34 se utiliza para generar una corrección del área de contacto de la sobre la losa del pavimento y esta labor consiste revisar el área de contacto que sea tiene cruzándola con la el espesor de la losa se supuso para el inicio del ejercicio y con esta área de contacto si se debe calcular el factor de carga equivalente que se va a usar en el espesor de la losa.

Figura 34. Gráfica de corrección del área de contacto para diseño para ejes duales.



Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

3.2.4.1.3 Cargas distribuidas. Cuando se habla de cargas distribuidas se hace referencia a las cargas que convencionalmente actúan sobre un área grande del piso. Este tipo de cargas son consecuencia del almacenamiento de materiales directamente sobre el piso de la bodega o el área industrial.

Las cargas estáticas y dinámicas son las que generalmente controlan el diseño del espesor de la losa de concreto en un pavimento debido a que estas producen esfuerzos de tensión mayores a los que producen las cargas distribuidas. Sin embargo, después de que un espesor de losa ha sido calculado considerando la estantería y el equipo más pesado, se debe realizar el diseño por cargas distribuidas esto con el fin de controlar todos los aspectos que pueden intervenir en el correcto funcionamiento del pavimento.

Cuando se requiera que cargas excesivamente pesadas sean colocadas sobre el piso se debe tener suculiente cuidado del comportamiento del suelo de subrasante debido a que imponer cargas muy pesadas puede llevar a que el suelo se consolide,



generando asentamientos diferenciales en las losas y posteriormente el fracturamiento de las mismas.

El manual de la PCA dentro de los cálculos para el diseño de pisos industriales divide las cargas distribuidas en dos partes, cargas con arreglo definido y con arreglo variable.

a) **Almacenaje con arreglo variable de cargas distribuidas.** Las cargas distribuidas variables generan que los esfuerzos de flexión y deformaciones se puedan alterar de acuerdo al espesor de la losa y a la resistencia de la subrasante. Estas variaciones dependen también del ancho del pasillo, ancho del área cargada, magnitud de la carga y la presencia de juntas en zona. Estas variables generalmente son cambiantes por lo que no son predecibles durante la vida útil del pavimento. Por esta razón las cargas admisibles que se muestran en la Tabla 15, que representan la condición más crítica a la que se ve sometida la losa de concreto, es la que el manual recomienda que para el diseño cuando no se tiene certeza de cuáles son las magnitudes ni las distribuciones de las cargas a las cuales se va a ver expuesta la estructura del pavimento.

Teniendo en cuenta que las cargas permisibles presentadas consideran las condiciones críticas a las que se ve sometido el piso, no se tiene ningún tipo de restricción en el arreglo de la carga o en la uniformidad de la misma, las cargas máximas que pueden soportar los pavimentos con estas consideraciones pueden aumentar según se requiera durante toda la vida útil del pavimento, ya que por este motivo no se dejan cargas fijas en el diseño.

b) **Almacenaje con arreglo fijo de la carga distribuida.** Una losa expuesta a cargas distribuidas genera una variación según el ancho del pasillo, el ancho de la carga, la magnitud de la carga y la ubicación de las juntas, tal como se detalló anteriormente en las cargas con arreglo variable.

En una bodega donde en un área determinada el arreglo de cargas distribuidas es conocido y permanecerá fijo durante la vida útil del pavimento, las cargas distribuidas máximas admisibles se muestran la Tabla 16. Esas cargas admisibles tienen la función de limitar el momento negativo para que un pasillo o área no presente grietas.

Tabla 15. Carga distribuida permisible, con arreglos de carga variable.

Espesor		Esfuerzo de trabajo (Lb/pulg <sup>2</sup> )	Ancho crítico del pasillo		Al ancho crítico de pasillo		En pasillo de 6 ft de Ancho (1.8m)		En pasillo de 8 ft de Ancho (2.4m)		En pasillo de 10 ft de Ancho (3.0m)		En pasillo de 12 ft de Ancho (3.6m)		En pasillo de 14 ft de Ancho (4.2m)	
Pulg	cm		pies	m	Lb/pulg <sub>2</sub>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sub>2</sub>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>

Módulo de reacción K de la subrasante =50 Lb/pulg<sup>3</sup>

5	12.7	300	5.6	1.7	610	2978	615	3003	670	3271	815	3979	1050	5127	1215	5932
		350	5.6	1.7	710	3467	715	3491	685	3344	950	4638	1225	5981	1420	6933
		400	5.6	1.7	815	3979	820	4004	695	3393	1085	5297	1400	6835	1620	7910
6	15.24	300	6.4	2.0	670	3271	675	3296	695	3393	780	3808	945	4614	1175	5737
		350	6.4	2.0	785	3833	785	3833	810	3955	910	4443	1100	5371	1370	6689
		400	6.4	2.0	895	4370	895	4370	925	4516	1040	5078	1260	6152	1570	7665
8	20.32	300	8.0	2.4	770	3759	800	3906	770	3759	800	3906	880	4297	110	537
		350	8.0	2.4	900	4394	950	4638	900	4394	935	4565	1025	5004	1180	5761
		400	8.0	2.4	1025	5004	1070	5224	1025	5004	1065	5200	1175	5737	1350	6591
10	25.4	300	9.4	2.9	845	4126	930	4541	855	4174	950	4638	855	4174	960	4687
		350	9.4	2.9	985	4809	1085	5297	1000	4882	990	4834	1035	5053	1120	5468
		400	9.4	2.9	1130	5517	1240	6054	1145	5590	1135	5542	1185	5786	1285	6274
12	30.48	300	10.8	3.3	915	4467	1065	5200	955	4663	915	4467	925	4516	965	4712
		350	10.8	3.3	1065	5200	1240	6054	1115	5444	1070	5224	1080	5273	1125	5493
		400	10.8	3.3	1220	5957	1420	6933	1270	6201	1220	5957	1230	6005	1290	6298
14	35.56	300	12.1	3.7	980	4785	1225	5981	1070	5224	1000	4882	980	4785	995	4858
		350	12.1	3.7	1145	5590	1430	6982	1245	6079	1170	5712	1145	5590	1160	5664
		400	12.1	3.7	1310	6396	1630	7958	1425	6957	1335	6518	1310	6396	1330	6494

Módulo de reacción K de la subrasante =100 Lb/pulg<sup>3</sup>

5	12.7	300	4.7	1.4	865	4223	900	4394	1090	5322	1470	7177	1745	8520	1810	8837
		350	4.7	1.4	1010	4931	1050	5127	1270	6201	1715	8373	2035	9936	2115	10326
		400	4.7	1.4	1015	4956	1200	5859	1455	7104	1955	9545	2325	11352	2415	11791
6	15.24	300	5.4	1.6	950	4638	955	4663	1065	5200	1320	6445	1700	8300	1925	9399
		350	5.4	1.6	1105	5395	1115	5444	1245	6079	1540	7519	1985	9692	2245	10961
		400	5.4	1.6	1265	6176	1275	6225	1420	6933	1760	8593	2270	11083	2565	12523
8	20.32	300	6.7	2.0	1095	5346	1105	5395	1120	5468	1240	6054	1465	7153	1815	8862
		350	6.7	2.0	1280	6250	1285	6274	1305	6372	1445	7055	1705	8325	2120	10351
		400	6.7	2.0	1460	7128	1470	7177	1495	7299	1650	8056	1950	9521	2420	11815
10	25.4	300	7.9	2.4	1215	5932	1265	6176	1215	5932	1270	6201	1395	6811	1610	7861
		350	7.9	2.4	1420	6933	1475	7202	1420	6933	1480	7226	1630	7958	1880	9179
		400	7.9	2.4	1625	7934	1645	8032	1625	7934	1600	7812	1860	9081	2150	10497

Espesor		Esfuerzo de trabajo (Lb/pulg <sup>2</sup> )	Ancho crítico del pasillo		Al ancho crítico de pasillo		En pasillo de 6 ft de Ancho (1.8m)		En pasillo de 8 ft de Ancho (2.4m)		En pasillo de 10 ft de Ancho (3.0m)		En pasillo de 12 ft de Ancho (3.6m)		En pasillo de 14 ft de Ancho (4.2m)	
Pulg	cm		pies	m	Lb/pulg <sub>2</sub>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sub>2</sub>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>
12	30.48	300	9.1	2.8	1320	6445	1425	6957	1325	6469	1330	6494	1400	6835	1535	7495
		350	9.1	2.8	1540	7519	1665	8129	1545	7543	1550	7568	1635	7983	1880	9179
		400	9.1	2.8	1755	8569	1900	9277	1770	8642	1770	8642	1865	9106	2050	10009
14	35.56	300	10.2	3.1	1405	6860	1590	7763	1445	7055	1405	6860	1435	7006	1525	7446
		350	10.2	3.1	1640	8007	1855	9057	1685	8227	1640	8007	1675	8178	1775	8666
		400	10.2	3.1	1875	9155	2120	10351	1925	9399	1875	9155	1915	9350	2030	9911

Módulo de reacción K de la subrasante = 200 Lb/pulg<sup>3</sup>

5	12.7	300	5.6	1.7	1225	5981	1400	6835	1930	9423	2450	11962	2565	12523	2520	12304
		350	5.6	1.7	1425	6957	1630	7958	2255	11010	2860	13964	2990	14598	2940	14354
		400	5.6	1.7	1630	7958	1865	9106	2575	12572	3270	15966	3420	16698	3360	16405
6	15.24	300	6.4	2.0	1340	6542	1415	6909	1755	8569	2395	11693	2740	13378	2810	13720
		350	6.4	2.0	1565	7641	1650	8056	2050	10009	2800	13671	3200	15624	3275	15990
		400	6.4	2.0	1785	8715	1890	9228	2345	11449	3190	15575	3655	17845	3745	18285
8	20.32	300	8.0	2.4	1550	7568	1550	7568	1695	8276	2045	9985	2635	12865	3070	14989
		350	8.0	2.4	1810	8837	1810	8837	1980	9667	2385	11645	3075	15013	3580	17479
		400	8.0	2.4	2065	10082	2070	10107	2615	12768	2730	13329	3515	17162	4095	19994
10	25.4	300	9.4	2.9	1730	8447	1745	8520	1775	8666	1965	9594	2330	11376	2895	14135
		350	9.4	2.9	2020	9863	2035	9936	2070	10107	2290	11181	2715	13256	2300	11230
		400	9.4	2.9	2310	11278	2325	11352	2365	11547	2620	12792	3105	15160	3860	18846
12	30.48	300	10.8	3.3	1890	9228	1945	9496	1895	9252	1995	9740	2230	10888	2610	12743
		350	10.8	3.3	2205	10766	2270	11083	2210	10790	2330	11376	2600	12694	3045	14867
		400	10.8	3.3	2520	12304	2595	12670	2525	12328	2660	12987	2972	14511	3480	16991
14	35.56	300	12.1	3.7	2025	9887	2150	10497	2030	9911	2065	10082	2210	10790	2480	12108
		350	12.1	3.7	2360	11523	2510	12255	2365	11547	2405	11742	2580	12597	2890	14110
		400	12.1	3.7	2700	13183	2870	14013	2705	13207	2750	13427	2950	14403	3305	16136

Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

Tabla 16. Cargas distribuidas permisibles, con carga de arreglo no definido o fijo (\*).

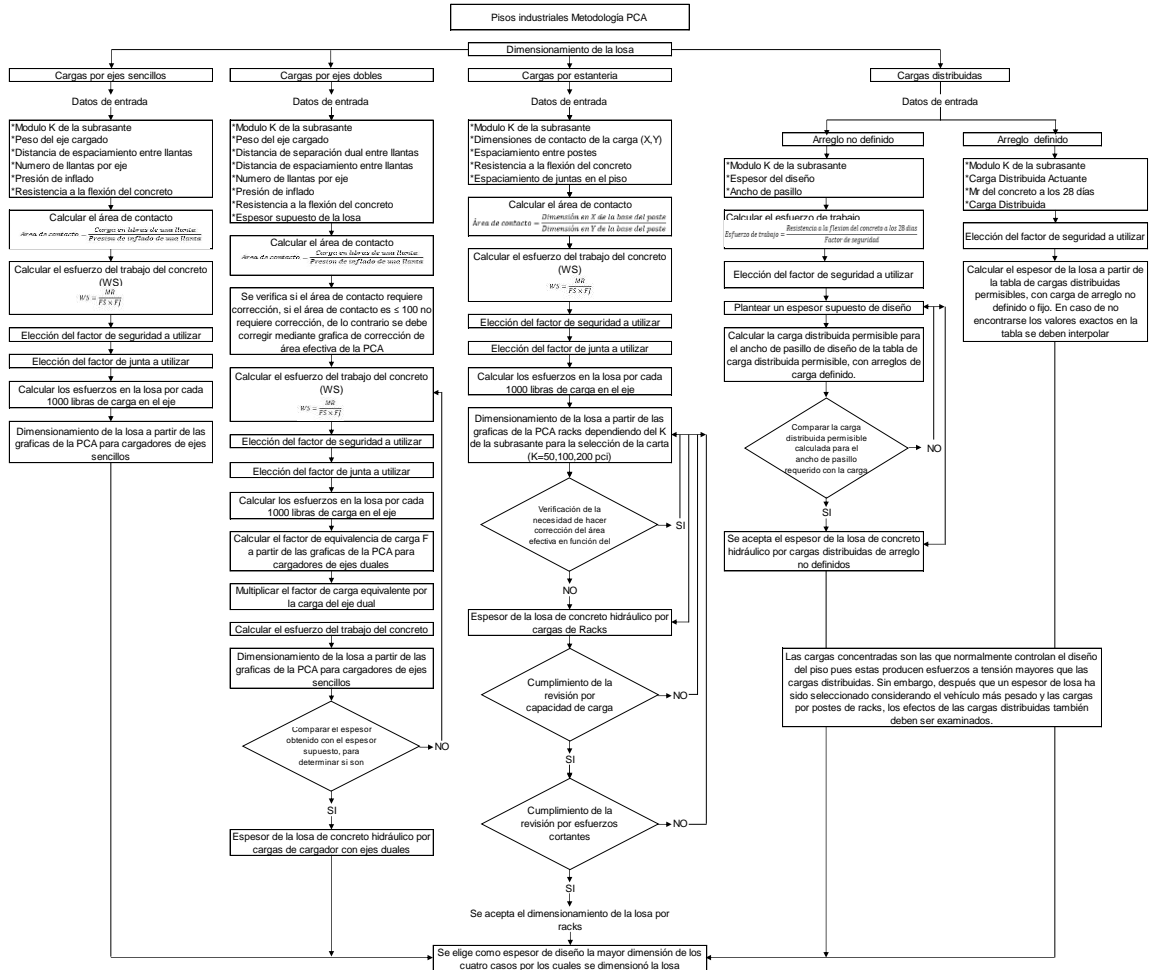
<b>CARGA DISTRIBUIDA PERMISIBLE</b> Para cargas sin arreglos definidos				<b>Módulo de Ruptura (MR)</b>							
				<b>550</b>	<b>38.67</b>	<b>600</b>	<b>42.18</b>	<b>650</b>	<b>45.70</b>	<b>700</b>	<b>49.21</b>
				Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
<b>Espesor</b>		<b>K</b>		<b>CARGA PERMISIBLE</b>							
Pulg	cm	Lb/pulg <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	Lb/pulg <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>
5	12.7	50	1.39	535	2612	585	2856	635	3100	685	3344
		100	2.77	760	3711	830	4052	900	4394	965	4712
		200	5.54	1075	5249	1175	5737	1270	6201	1370	6689
6	15.24	50	1.39	585	2856	640	3125	695	3393	750	3662
		100	2.77	830	4052	905	4419	980	4785	1055	5151
		200	5.54	1175	5737	1280	6250	1390	6787	1495	7299
8	20.32	50	1.39	680	3320	740	3613	800	3906	865	4223
		100	2.77	960	4687	1045	5102	11135	54366	1220	5957
		200	5.54	1355	6616	1480	7226	1603	7827	1725	8422
10	25.4	50	1.39	760	3711	830	4052	895	4370	965	4712
		100	2.77	1070	5224	1170	5712	1265	6176	1635	7983
		200	5.54	1515	7397	1655	8080	1790	8740	1930	9423
12	30.48	50	1.39	830	4052	905	4419	980	4785	1055	5151
		100	2.77	1175	5737	1280	6250	1390	6787	1495	7299
		200	5.54	1660	8105	1810	8837	1965	9594	2115	10326
14	35.56	50	1.39	895	4370	980	4785	1060	5175	1140	5566
		100	2.77	1270	6201	1385	6762	1500	7324	1645	8032
		200	5.54	1795	8764	1960	9570	2120	10351	2285	11156

(\*) Es importante aclarar que el k de la subrasante cuando se requieran hacer cálculos de diseño de losas por cargas distribuidas se debe tomar exclusivamente el módulo de reacción del suelo, sin tener en cuenta los aportes hechos por la base o subbase, esto debido a que lo que se quiere evitar es los asentamientos producidos por cargas de gran magnitud.

Fuente: <https://www.cemexmexico.com/documents/aplicaciones-manual-pisos-industriales>.

La metodología de diseño de la Portland Cement Association (PCA) tiene unos tópicos especiales para su diseño, por lo que se realizó un diagrama de flujo que se presentan en la Figura 35, el cual pretende una interacción más fácil y eficaz de los procedimientos de diseño de losas de concreto de tipo industrial.

Figura 35. Diagrama de flujo para el diseño de una losa a partir de la metodología de la PCA



Fuente: Elaboración propia a partir de: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Concrete Industrial Ground Floors. A guide to design and construction.

### 3.3 MANUAL DE DISEÑO DE PISOS INDUSTRIALES DEL INSTITUTO DE CEMENTO Y HORMIGÓN DE CHILE (ICH)<sup>21</sup>

La metodología de diseño de pisos industriales de Chile está basada en los métodos incorporados en la ACI-360-R-10, el manual busca dar a los diseñadores las herramientas suficientes para lograr el mejor diseño posible de un pavimento de tipo industrial. La guía se enfoca en diferentes pavimentos en concreto hidráulico como son los siguientes:

- Pavimentos en concreto simple con juntas con o sin dispositivos de transferencia de carga.
- Pavimentos en concreto reforzados para el control de ancho de grietas.
- Pavimentos en concreto con fibras.
- Pavimentos en concreto de retracción compensada.
- Pavimentos en concreto postensados.

Los pavimentos presentados anteriormente presentan fortalezas y deficiencias según sea el uso, así mismo el autor busca que con las características generales de proyecto se determine cuál es el pavimento que más se ajusta a las necesidades del proyecto. El manual principalmente está basado en la metodología de la PCA y teniendo en cuenta que esta metodología ya fue tratada en la sección anterior no se hace énfasis en las características del suelo, las capas granulares y demás que ya fueron tratados con anterioridad. Sin embargo, el autor presenta otras metodologías para el diseño de la losa de concreto que pueden ser usadas para el diseño de pisos industriales, a continuación, se presentan las metodologías que la ICH propone para la ejecución de un pavimento de uso industrial.

**3.3.1 Metodología de diseño del Instituto de Refuerzo con Cable (WRI).** Las cartas de diseño fueron desarrolladas solo para condiciones de carga al interior de la losa mediante un análisis de elementos discretos. Las variables de diseño requeridas por la WRI son el módulo de elasticidad del concreto, módulo de reacción de la subrasante, espesor provisional de losa, área de carga equivalente, distancia entre ruedas, resistencia a la tracción por flexión del concreto y tensión de trabajo. En lo concerniente a las cargas la metodología establece que no considera directamente las cargas concentradas y tampoco las cargas de construcción sin

---

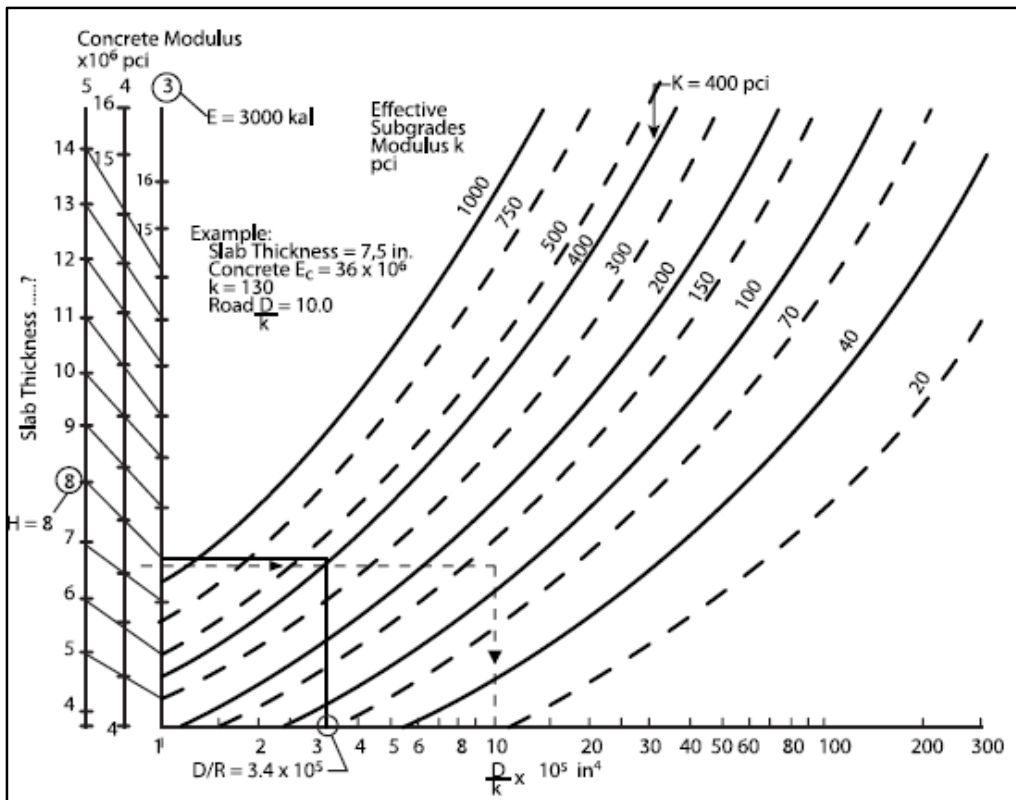
<sup>21</sup> SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. 1 edición. Chile: Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile, 2013. p. 55-77

embargo recomiendan que estas últimas se asimilen como cargas de rueda equivalente. Así mismo se tiene que las cargas uniformemente distribuidas requieren además de las variables anteriormente descritas el ancho del pasillo y la carga distribuida a la que se va a ver sometido el pavimento.

La WRI presenta dos juegos de cartas de diseño, para cargas de un eje simple con ruedas individuales y para cargas uniformemente distribuidas.

La primera serie de cartas controla el diseño mediante la tensión de tracción en la fibra inferior de la losa de concreto. La Figura 36 el ábaco con el cual se calcula la relación entre la rigidez de la losa y la subrasante ( $D/K$ ), Posteriormente con el parámetro  $D/K$  se ingresa a la Figura 37 donde se calcula la carga de rueda utilizada y finalmente se calcula el espesor de la losa mediante la carta de diseño de la Figura 38.

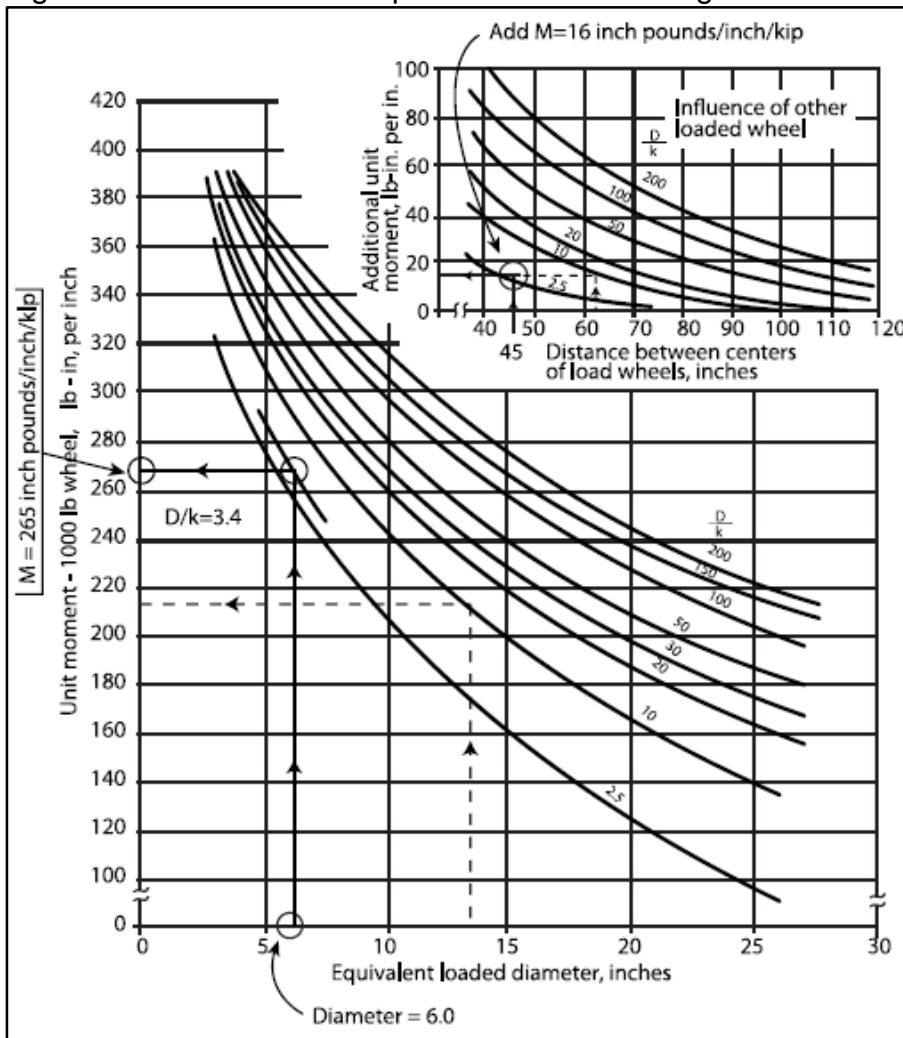
Figura 36. Carta de diseño para el cálculo de la relación de la rigidez de la losa y la subrasante.



Fuente: SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013. p. 71

Después del cálculo del parámetro de rigidez relativa ( $D/K$ ) se continúa con el cálculo de carga por rueda la cual se realiza a partir de la carta de diseño de la Figura 37, para la cual se ingresa con el diámetro de círculo equivalente del neumático y se corta la curva correspondiente a la  $D/K$  que se calculó de la Figura 36, para finalmente cortar en el eje vertical para seleccionar la carga por rueda. Así mismo dentro de la carta de diseño se tiene una segunda grafica con la cual se calcula el momento adicional que se presenta a causa de la segunda rueda y estas dos cargas se deben sumar para obtener el momento de diseño.

Figura 37. Carta de diseño para cálculo de la carga de rueda.

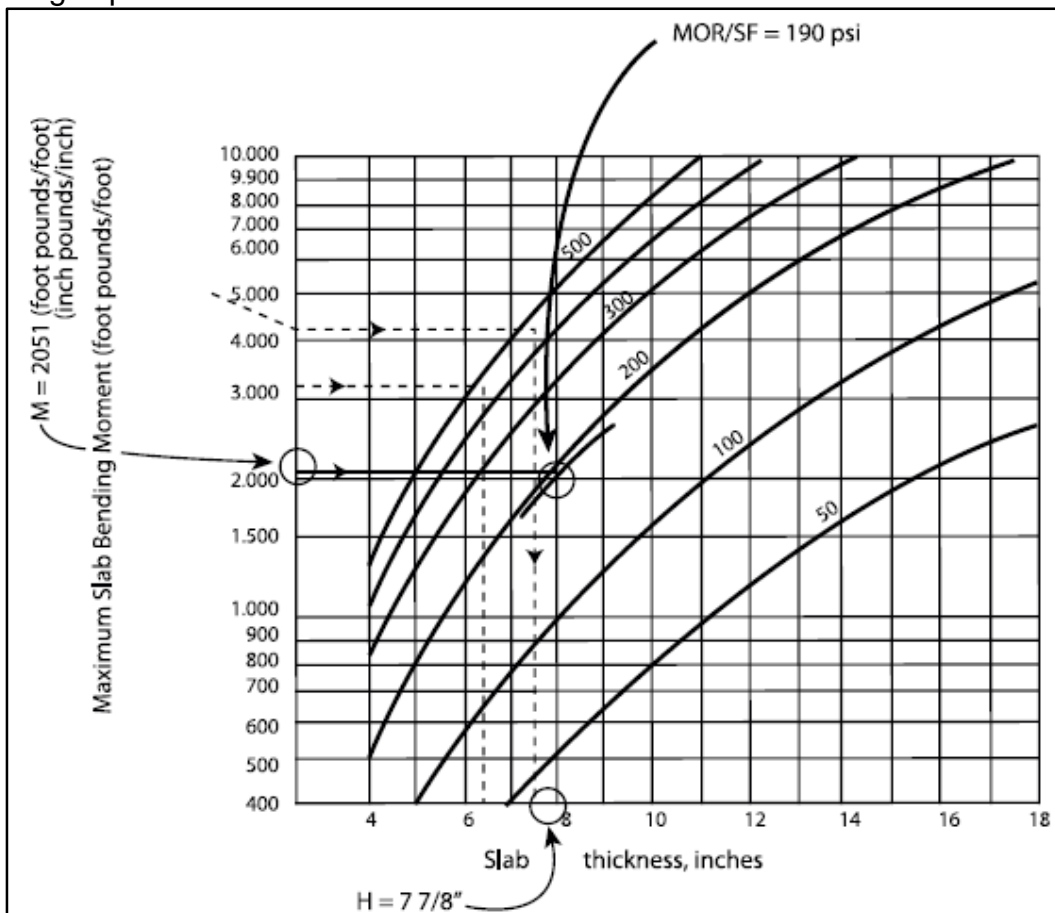


Fuente: SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013. p. 71



Finalmente con el cálculo del momento de diseño en pies-libra sobre pie (ft-lb/ft) se ingresa a la gráfica de diseño de la Figura 38, se corta con la curva de la tensión de tracción admisible y en el eje horizontal se calcula el espesor de la losa.

Figura 38. Carta de diseño para el cálculo la tensión de tracción en la losa para cargas por rueda

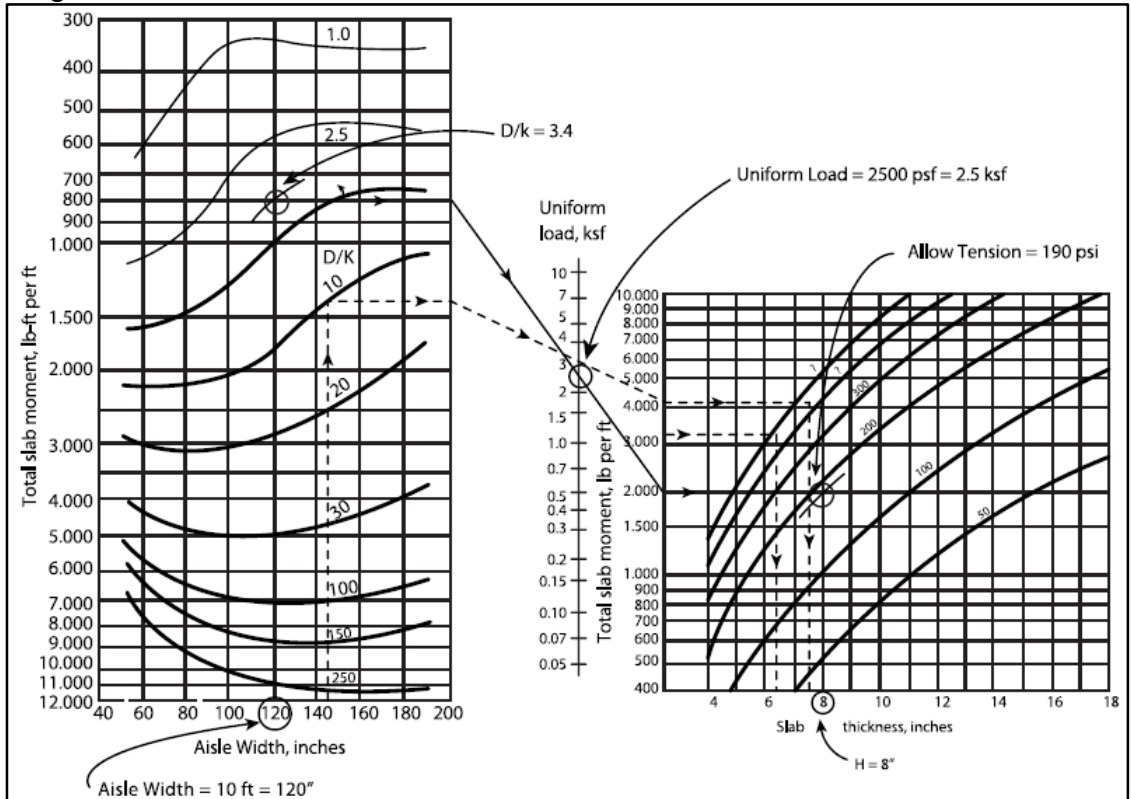


Fuente: SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013. p. 71

De la misma manera la metodología WRI tiene una serie de cartas para cuando las cargas son uniformemente distribuidas, inicialmente como se ve en la Figura 39 se ingresa con en la primera parte de la carta con el ancho del pasillo se corta con la relación D/K determinada en la Figura 36 y de ahí se pasa a la segunda parte de la carta cortando la carga uniformemente distribuida y se lleva a la curva de la tensión

permitida del concreto y finalmente se intersecta con el eje x para conocer el espesor de la losa de diseño.

Figura 39. Carta de diseño para el cálculo la tensión de tracción en la losa para cargas uniformemente distribuidas.



Fuente: SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013. p. 72

Este método de diseño determina de manera iterativa el espesor de la losa ya que una vez se obtiene el espesor producto de las cartas de diseño, este se debe comparar con el espesor supuesto inicialmente, si la diferencia de los espesores es sustancialmente alta se debe proceder a repetirse el diseño asumiendo un espesor diferente hasta que la diferencia sea razonable.

**3.3.2 Metodología del cuerpo de ingenieros de EEUU.** La metodología está concentrada solo para el caso de cargas de ruedas o ejes aplicados en el borde de la losa, por lo tanto, no considera las cargas concentradas, uniformemente distribuidas ni las cargas por construcción. Las variables de diseño son la capacidad del equipo, carga por eje, número de ruedas, área de contacto, efecto de la presión de contacto, ancho del neumático, espacio entre ruedas, ancho de pasillo y espacio entre los

neumáticos de doble rueda, a estos parámetros están incorporados en la Tabla 17 en la cual se calcula la categoría del índice de diseño, este índice es posteriormente utilizado en la carta de diseño que presenta la técnica. La metodología original presenta 10 categorías, de la 7 a la 10 corresponden a equipos excepcionalmente pesados y por este motivo la ICH no los tiene en cuenta para los diseños.

Tabla 17. Categorías de índice de diseño utilizado con el método Cuerpo de Ingeniero de EEUU para la selección del espesor de la losa.

<b>Categoría</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>
Capacidad, lb	4000	6000	10000	16000	20000	52000
Carga por eje de diseño, lb	10000	15000	25000	36000	43000	120000
Número de neumáticos	4	4	6	6	6	6
Tipo de neumáticos	Sólido	Sólido	Neumático	Neumático	Neumático	Neumático
Área de contacto del neumático, Pulg <sup>2</sup>	27	36.1	62.5	100	119	316
Efecto de presión de contacto, Lb/Pulg <sup>2</sup>	125	208	100	90	90	95
Ancho del neumático, Pulg	6	7	8	9	6	16
Espacio entre ruedas, Pulg	31	33	11-42-11	13-58-13	13-58-13	20-79-20
Ancho del pasillo, Pulg	90	90	132	144	144	192
Espacio entre los neumáticos de doble rueda, Pulg	-	-	3	4	4	4

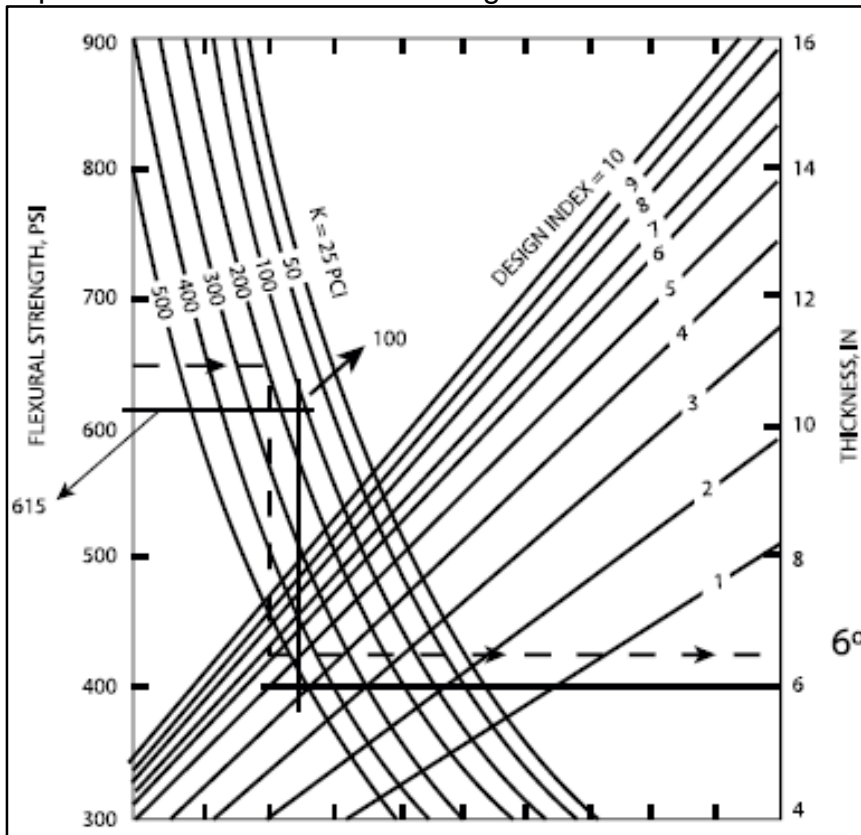
Fuente: SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013. p. 74

El método se basa en la ecuación de Westergaard para el caso de la carga de borde, a la ecuación se le aplica una transferencia de carga en la junta de 0.75. Adicionalmente a las variables ya mencionadas con las cuales se categoriza el índice de diseño se debe conocer la resistencia a tracción por flexión del concreto y el módulo de reacción de la subrasante.

El procedimiento utiliza la carta de diseño presentada en la Figura 39Figura 40, la metodología utiliza un factor de impacto de 25%, un módulo de elasticidad del concreto de 4000 ksi, un factor de seguridad 2 y un coeficiente de transferencia de junta de 0.75.

El procedimiento inicia por categorizar el índice del equipo de diseño, posteriormente se ingresa a la carta de diseño con la resistencia a la flexión de concreto, se precede a cortar la curva correspondiente a módulo de reacción de la subrasante, posteriormente se corta la línea del índice de diseño y de allí se desplaza horizontalmente hasta cortar la línea del espesor de la losa.

Figura 40. Carta de diseño del Cuerpo de ingenieros de EEUU para determinar el espesor de la losa de concreto según el índice de diseño.

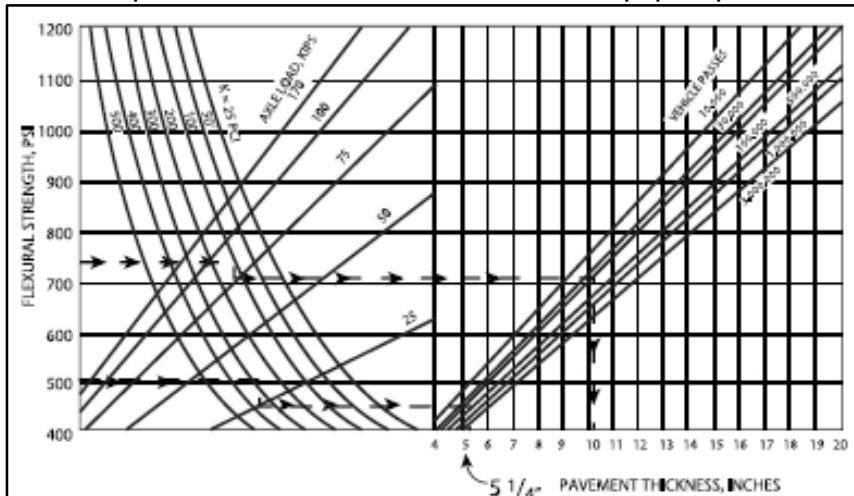


Fuente: SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013. p. 73

Cuando se tiene una carga pesada de un equipo de diseño se procede de una manera diferente, en este caso se deben conocer la carga del eje del equipo, el número de pasadas del equipo la resistencia la tracción por flexión del concreto y el módulo de reacción de la subrasante. Con las variables anteriormente descritas se ingresa a la carta de diseño (Ver Figura 41) y se procede a cortar cada una de las

curvas de las variables hasta llegar a la determinación del espesor de la losa con tránsito de equipos pesados.

Figura 41. Cartas de diseño del método del Cuerpo de Ingenieros de EEUU para losas de piso de concreto con tránsito de equipos pesados.



Fuente: SALSILLI, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013. p. 74

**3.3.3 Pavimentos de concreto hidráulico de retracción compensada (HRC).** La metodología HCR tiene como principal objetivo brindar las herramientas al diseñador de como diseñar un refuerzo estructural a las losas de concreto, esto con el fin de controlar las fisuras que se puedan presentar producto de la retracción en el fraguado del concreto y también aportar resistencia a la tracción a las losas de concreto. Por este motivo la metodología HCR dispone que el diseño del espesor de la losa se puede realizar por cualquiera de las metodologías consignadas en el manual ICH.

El objetivo principal de un concreto de retracción compensada es que la expansión del concreto sea restringida por la armadura de acero que se le provee a la losa. La deformación por expansión causa una tensión en el refuerzo generándose así una compresión en el concreto que se opone a la tensión de a armadura de acero. Se debe procurar que la restricción a la expansión sea mayor que la retracción resultante en el largo plazo. La ASTM C878/C878M recomienda que para este tipo de concretos la expansión mínima sea de 0.03%.

La funcionalidad de los pavimentos de retracción compensada es controlar la expansión inicial, en el caso de que sea insuficiente el concreto se fisurara. Para

lograr que este tipo de situaciones no se presentan según la ICH en la actualidad existen dos alternativas: usar cementos expansivos o usar aditivos expansores, en ambos casos lo que se realiza es incorporar controladamente en el concreto, aditivos de compuestos expansores.

Para el diseño de una losa de concreto reforzada estructuralmente se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se determina el espesor de la losa que puede ser través de cualquiera de las metodologías descritas en el manual ICH.
- La dimensión de las losas, estas deben ubicar en la medida de lo posible ubicar las juntas en la misma dirección de las columnas de la estructura o debajo de la línea de las estanterías. Igualmente, la ICH recomienda que se construyan losas cuadradas con relación largo/ancho menos a 3.
- Expansiones restringidas del concreto, de acuerdo a lo indicado por la ACI, la retracción por secado del concreto debe estar en el rango de 0.03% a 0.06%.
- Se deben tener en cuenta también las restricciones que presenta la armadura de la losa del pavimento las estructuras adyacentes y la fricción de la losa con la subbase. Los coeficientes de fricción de la subbase varían entre 0.5 y 2.0.
- Finalmente se debe generar la armadura de la losa, las características principales que debe tener la armadura surgen del cálculo estructural del refuerzo, sin embargo, siempre se debe tener en cuenta que la cuantía de refuerzo debe estar entre 0.15% y 0.6%

La HCR no solo se limita a los pavimentos reforzados estructuralmente, sino que también presenta consideraciones de diseño para losas de concreto postensados y reforzados con fibras que aportan diferentes beneficios a la losa de concreto.

3.3.3.1 Pavimentos de concreto postensados. Las losas de concreto postensadas es una losa a la que se le aplica una compresión por medio de unos cables de acero, de esta manera se logra que los espesores de la losa sean inferiores a los normales utilizados en pisos industriales esto teniendo en cuenta que el espesor no debe ser inferior a los 150mm. Generalmente se recomienda para pisos industriales que el tensado por medio de cables se haga bidireccionalmente y que el nivel de tensado sea similar en las dos direcciones.

Uno de los grandes beneficios de las losas con refuerzo postensados pueden tener longitudes de hasta 180 metros eliminando las juntas de contracción, así mismo se pueden obtener pavimentos muy planos que pueden ser beneficiosos dependiendo del uso que para el que se está diseñando el piso.

La metodología plantea que se deben tener unos requisitos mínimos en la superficie de apoyo de la losa del pavimento, esto debido a que las losas son más delgadas que las losas normalmente reforzadas y por lo tanto los esfuerzos verticales a los que se ve sometida la subrasante son mayores, por este motivo la ICH recomienda que para pavimentos postensados se tenga como mínimo un módulo de reacción de la subrasante de 50MPa/m.

Para el diseño de pavimentos postensados se deben determinar las siguientes variables:

- Espesor de la losa (mínimo 150mm)
- Nivel de tensado de en cada dirección, dependiendo del nivel de tensado se puede optar por un tensado total, parcial o una sub-tensión según sea el caso.

3.3.3.2 Pavimentos reforzados con fibras. Los pavimentos reforzados con fibras de acero o sintéticas son usados para mejorar las propiedades del pavimento fresco y endurecido. Las fibras pueden ayudar a reducir la segregación de la mezcla del concreto y así mismo controlar la fisuración de la losa en la etapa de curado.

Las fibras más utilizadas para el reforzamiento de losas de concreto son las de polipropileno, polietileno, nylon y de acero, estas fibras son beneficiosas para el concreto ya que controlan la severidad de las mismas, el control del ancho de las grietas está directamente relacionado con el tipo y la cantidad de fibra empleada.

Los principios de diseño de los pavimentos reforzados con fibras son básicamente los mismos que se usan en los pisos no reforzados, las fibras son usadas para proporcionar mayor resistencia al impacto, flexión, dureza, fatiga y control del ancho de las fisuras. El refuerzo con fibras no previene la presencia de las fisuras, sin embargo, controla el ancho y severidad de las mismas para que la losa se comporte de la manera esperada por el diseñador.

**3.3.4 Análisis estructural de las losas.** Para determinar las tensiones de la losa de concreto se tienen disponibles dos métodos: el análisis por medio de un modelo de elementos finitos o el análisis analítico mediante las ecuaciones de Westergaard, con el análisis de elementos finitos se puede calcular las tensiones de las losas de una manera muy exacta sin embargo un análisis de esta categoría requiere muchos recursos de toda clase, lo que la convierte en un método muy limitado en su utilización, sin embargo los análisis analíticos están basados en experiencias de los modelos de elementos finitos y la utilización de las ecuaciones producto de estos modelos es muy utilizado debido a que los resultados obtenidos se acercan en gran medida a la realidad del comportamiento de la tensión en una losa de concreto.

Las ecuaciones desarrolladas originalmente por Westergaard pueden aplicarse a cargas de tipo circular, semicircular, elíptica o semi-elíptica con carga en el borde, interior y esquina. Las ecuaciones pueden dar una buena aproximación para el cálculo de tensiones en la losa de concreto sin embargo para situaciones más complejas en donde se tengan cambios de temperatura a través del espesor de la losa o una longitud finita, estas ecuaciones no pueden incorporar este tipo de variables por lo que en estos casos se debe optar por un análisis de elementos finitos.

Westergaard como ya se mencionó generó 3 análisis para una losa de pavimento las cuales se describen en síntesis a continuación.

3.3.4.1 Carga de esquina. En 1926 Westergaard obtuvo la Ecuación 23 para la condición de carga en la esquina:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

$\sigma_c$  = Tensión máxima de esquina en la fibra superior de la losa (Fuerza/Longitud<sup>2</sup>).

P = Carga aplicada (Fuerza)

h = Espesor de la losa (Longitud).

a = Radio del área cargada (Longitud).

l = Radio de rigidez relativo del sistema losa - suelo de fundación (Longitud).

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad \text{Ecuación 24}$$

k = Módulo de reacción de la subrasante (Fuerza/Longitud<sup>3</sup>).



E= Módulo de elasticidad del concreto (Fuerza/Longitud<sup>2</sup>).  
μ= Relación de Poisson.

Westergaard también determinó que el punto donde se produce el momento máximo se encuentra a una distancia de la esquina dada por la Ecuación 25.

$$X_1 = 2(a\sqrt{2} \times l)^{0.5} \quad \text{Ecuación 25}$$

3.3.4.2 Carga de borde. Loannides y colaboradores (1985) actualizaron la ecuación original de Westergaard para determinar las tensiones de borde y producto de esta actualización se produjo la Ecuación 26.

$$\sigma = \frac{3(1 + \mu)P}{\pi(3 + \mu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^2}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4\mu}{3} + \frac{1 - \mu}{2} + 1.18(1 + 2\mu)(a/l) \right] \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

σ = Tensión máxima bajo la carga en la fibra inferior de la losa (Fuerza/Longitud<sup>2</sup>).

P = Carga total aplicada (Fuerza).

E = Módulo de elasticidad del hormigón (Fuerza/Longitud<sup>2</sup>).

h = Espesor de la losa (Longitud).

k = Módulo de reacción de la subrasante (Fuerza/Longitud<sup>3</sup>).

a = Radio del área cargada (Longitud).

l = Radio de rigidez relativa losa - suelo de fundación (Longitud).

μ = Relación de Poisson.

La metodología desarrollada presenta una serie de correcciones por borde que se deben emplear para el análisis estructural de las losas de concreto, las condiciones por corrección de borde son las siguientes.

- Corrección por el radio equivalente de carga aislada.
- Corrección por el efecto de la longitud de losa.
- Corrección por distancia de la carga al borde de la losa.
- Corrección por la transferencia de carga de losa adyacente.

3.3.4.3 Carga Interior. Westergaard propuso para determinar la tensión por carga interior de losa La Ecuación 27.

$$\sigma = \frac{3P(1 + \mu)}{2\pi h^2} \left[ \ln \left( \frac{2l}{a} \right) + 0.5 - \gamma \right] + \frac{3P(1 + \mu)}{64h^2} \left[ \left( \frac{a}{l} \right)^2 \right]$$

Ecuación 27

Donde:

P = Carga total aplicada (Fuerza)

h = Espesor de la losa (Longitud)

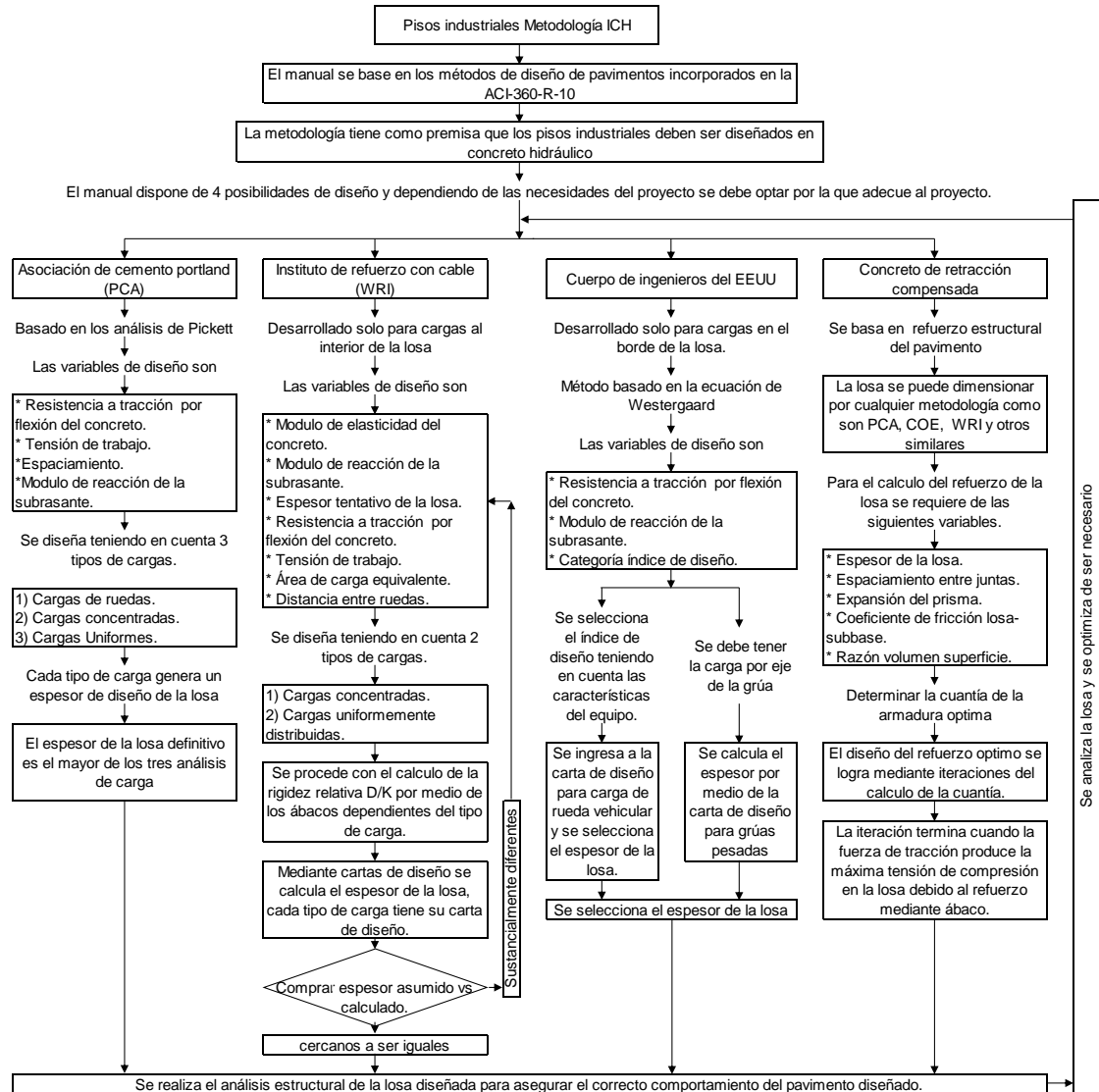
a = Radio del área de contacto de una rueda (Longitud)

l = Radio de rigidez relativa losa - suelo de fundación

$\mu$  = Relación de Poisson.

La metodología Chilena compila varias técnicas de diseño de dimensionamiento de losas de concreto con diferentes componentes de refuerzos, en la Figura 42 se dispone de un diagrama de flujo con estos métodos, y así mismo establece los pasos a seguir para el diseño de un piso industrial.

Figura 42. Diagrama de flujo de la metodología de diseño de pisos industriales ICH.



Fuente: Elaboración propia a partir del Manual de diseño de pisos industriales del Instituto del Cemento y el Hormigón de Chile. 2013.

#### **4 REVISIÓN Y COMPARACIÓN DE FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS DE ACUERDO A LAS NECESIDADES, NORMAS Y MATERIALES COLOMBIANOS.**

Dentro del desarrollo de la presente guía se han desarrollado 3 metodologías de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales, sin embargo, de las técnicas desarrolladas las metodologías de la Portland Cement Association (PCA) y la del instituto de cemento y hormigón de Chile (ICH), no hacen referencia explícita a normativas o requisitos de materiales que requieran de un análisis comparativo entre las normas colombianas y las propuestas, es importante aclarar que estas dos metodologías están limitadas a diseños de pavimentos en concreto hidráulico, sin embargo la metodología de la British Ports Association (BPA) dentro de su contenido nombra y enuncia los materiales disponibles para el diseño de un pavimento industrial y dota al diseñador de herramientas para realizar diseños de todo el paquete estructural, y a su vez permite diseños en pavimento rígido, flexible y articulado, por lo tanto la metodología que se emplea para la implementación en Colombia es la metodología de la BPA, es por esto que en el presente capítulo se hará una revisión comparativa de las normas que se referencian en la BPA y las normas INVIAS-2013.

Con el fin de estructurar un guía de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicada a Colombia, se debe tener en cuenta que la metodología desarrollada por el Dr Knapton la cual es uno de los principales manuales a nivel global, esta metodología fue desarrollada en el Reino Unido y por este motivo los diseños resultantes se presentan con normativas de materiales propios de la del Reino Unido (BS) y Unión Europea (UE), por este motivo se requiere realizar una comparación teórica de las normas de materiales con los que fue creada la metodología y las normas colombianas, esto con el fin de determinar que materiales tienen similitudes con los colombianos y a su vez la posibilidad de que estos puedan ser producidos en el país bajo las normas INVIAS-2013, para de esta manera lograr generar diseños que sean construibles teniendo en cuenta las normas de materiales disponibles en Colombia.

La metodología de la BPA dentro de su desarrollo presenta la Tabla 6 la cual permite al diseñador realizar una serie de conversiones de materiales, esta tabla está dividida en 5 grandes grupos que son.

a) Bases estabilizadas con cemento.

- b) Concretos hidráulicos.
- c) Concretos asfálticos.
- d) Materiales granulares tipo base.
- e) Adoquines de concreto.

Cada uno de estos materiales dentro de la metodología presenta una serie de subdivisiones de resistencia o requisitos de calidad de los materiales todos enfocados a las normativas británicas y europeas, es por esto que a continuación se realizara un análisis comparativo de los materiales que especifica la metodología BPA y los que se pueden preparar a partir de las normas INVIAS-2013.

#### **4.1 BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO.**

En primera medida la metodología británica tiene como principal material el denominado C8/10 que significa que se tiene un concreto con una resistencia del cilindro a la compresión a los 28 días de  $8\text{N/mm}^2$  y el segundo es la resistencia característica del cubo de compresión que es de  $10\text{N/mm}^2$ . Este material es con el que están calibradas las cartas de diseño y el cual en es el resultado inicial del diseño de pavimentos y que posteriormente se llevara a la conversión de otros materiales para generar un diseño multicapa.

Dentro de la revisión del principal material (C8/10) descrito en la norma BS EN 14227-1 "Cement And Other Hydraulically Bound Mixtures", y su comparación con el material de "Base tratada con cemento" expuesto en las Especificaciones Generales de Construcción de carreteras INVIAS-2013 en su capítulo 3 y artículo 351, establece que el INVIAS propone dos rangos de resistencia a compresión del material a los 7 días, el primero (R3.5) el cual está entre los 3.5 y los 7.0 MPa y el segundo (R5.2) que se encuentra entre 5.2 y 7.0 MPa. Teniendo como referencia que la norma de la unión europea (UE) propone resistencia de la base tratada con cemento a los 28 días se tiene una diferencia de edades de resistencia del material, por este motivo es necesario extrapolar las resistencias expuestas por las especificaciones INVIAS-2013 a los 28 días.

La norma de Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) en el artículo 30.5 define las resistencias mínimas que debe cumplir el concreto a ciertas edades. La Tabla 18 presenta la tabla 30.4.b de dicha norma que define los coeficientes de

proporcionalidad entre las resistencias a 3, 7, 28, 90 y 360 días en función de la resistencia a compresión de un material del mismo tipo.

Tabla 18. Resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo de concreto

Edad del concreto, en días	3	7	28	90	360
Concreto a endurecimiento normal	0.40	0.65	1.00	1.20	1.35
Concreto a endurecimiento rápido	0.55	0.75	1.00	1.15	1.20

Fuente: Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), artículo 30.5

Teniendo en cuenta las recomendaciones de proporcionalidad que nos da la EHE, podemos observar que los rangos de resistencia que presentan los materiales descritos en la norma INVIAS-2013 llevados a los 28 días estarían en el orden de, Para R3.5 de 4.73 a 9.45 MPa y para R5.2 de 7.02 a 9.45 MPa.

Por lo consiguiente del análisis anterior se puede observar que los materiales de base tratada con cemento denominada C8/10 por las normas UE está en los rangos establecidos por las especificaciones INVIAS-2013, especialmente el material de clase A con resistencia de 5.2, material con el cual en adelante se trabajarán los diseños de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicados a Colombia, dadas las condiciones anteriormente expuestas el material con el cual están calibradas las cartas de diseño de la metodología británica es factible de prepararse desde el concepto de la resistencia de acuerdo con las especificaciones y condiciones propias de Colombia.

En lo referente a las características de los materiales granulares que componen el material de base tratada con cemento se realizó una comparación entre los requisitos de los agregados para una base tratada con cemento de acuerdo con el Artículo 341 de las normas INVIAS-2013 versus los requerimientos de las normas BS-EN en lo referente a las bases tratadas con cemento, en la Tabla 19 se presenta la comparación descrita en la cual se incluyeron todos los requisitos que el artículo 351 solicita como mínimos establecidos en calidades de materiales para la preparación de una base tratada con cemento, esto sin tener en cuenta si estos mismos requisitos son requeridos por las normas del Reino Unido.

Tabla 19. Comparación entre los requisitos de los agregados para una base tratada con cemento entre normas INVIAS-2013 y normas británicas.

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	CLASE DE AGREGADO INV		NORMA DE ENSAYO UE	AGREGADO BS
		CLASE A	CLASE B		
<b>Dureza</b>					
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E-218	40 8	35 7	EN 1097-2	35
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)		30	25	N/A	N/A
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (KN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	70 75	90 75	N/A	N/A
				N/A	N/A
				N/A	N/A
<b>Durabilidad (O)</b>					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	18 18	N/A	N/A
				N/A	N/A
				N/A	N/A
<b>Limpieza (F)</b>					
Límite líquido, máximo (%)	E-125	-	-	BS-EN 103103	<25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	0	0	BS-EN 103104	<6
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	BS-EN 933-8	40
Valor de azul de metileno, máximo	E-235	10	10	EN 933-9	<10

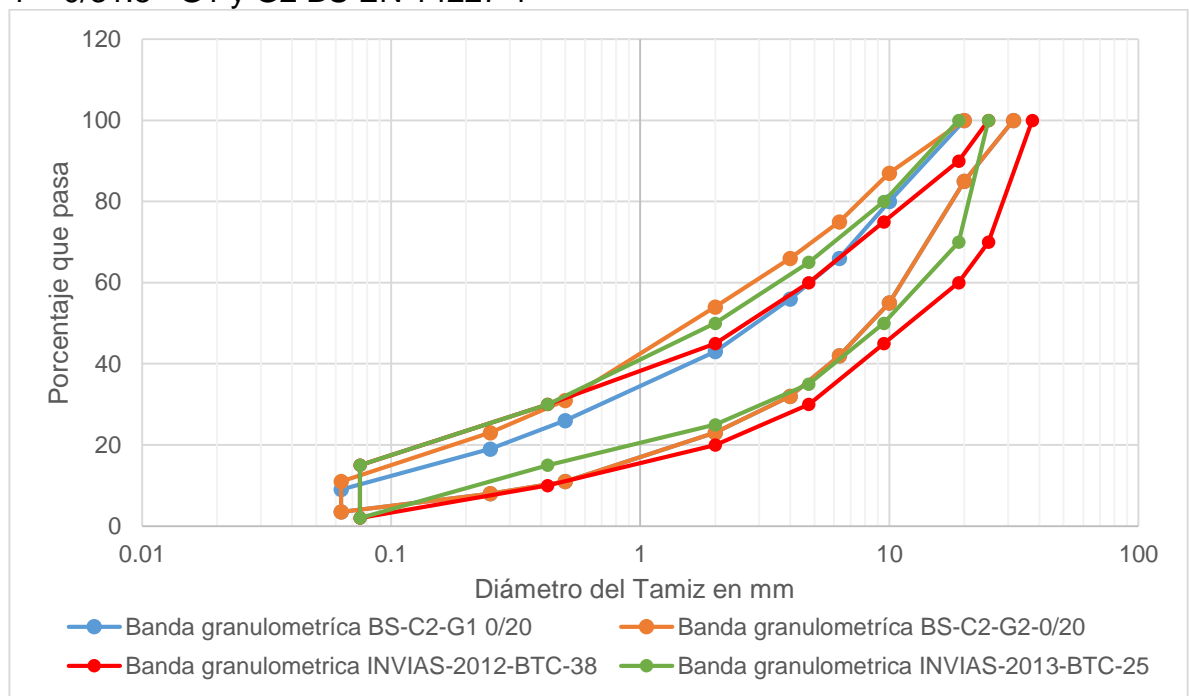
ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	CLASE DE AGREGADO INV		NORMA DE ENSAYO UE	AGREGADO BS
		CLASE A	CLASE B		
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	1	1	BS-EN103204	≤1
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2	2	N/A	N/A
<b>Geometría de las partículas (F)</b>					
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	-	35	BS-EN 933-3	35
Caras fracturadas (una cara), mínimo(%)	E-227	50	60	BS-EN 933-5	≥70
<b>Resistencia del material (F)</b>					
CBR para una compactación del 95 % del ensayo modificado de compactación (norma INV E-142), medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo (%)	E-148	60	80	BS-EN-14227	N/A
<b>Características químicas (O)</b>					
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como SO <sub>4</sub> =, máximo (%)	E-233	0.5	0.5	BS-EN 1744-1	≤0.8
Reactividad álcali - agregado: Concentración SiO <sub>2</sub> y reducción de alcalinidad R	E-234	SiO <sub>2</sub> < R cuando R > 70 SiO <sub>2</sub> < 35 + 0.5R cuando R < 70		BS-EN 932-3	0

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007.



Sin embargo, al entrar a detallar la granulometría de las 5 categorías de mezclas que contemplan las normas Britanicas se pudo evidenciar que solo el límite superior de la granulometría de la base tratada con cemento de la norma INVIAS-2013 está dentro del rango de la mezcla granular tratada con cemento 1 – 0/31.5 – G2, como se muestra en la Figura 43, en donde se realizó la comparación de las granulometrías de los dos materiales descritos.

Figura 43. Comparación de las granulometrías del material de base de concreto hidráulico INVIAS-2013 BTC-38, BTC-25 y la mezcla granular tratada con cemento 1 – 0/31.5 –G1 y G2 BS EN 14227-1



Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Hydraulically bound mixtures. Specifications. Cement bound granular mixtures BS EN 14227-1.

Por lo anteriormente mencionado para lograr un material optimo enmarcado en las normas INVAS-2013 y sea utilizable en el diseño de pavimentos industriales según la metodología de la BPA se debe tener obtener un material con granulometría similar al límite superior de la base tratada con cemento, o en su defecto realizar una mezcla de materiales granulares que se encuentren dentro de la banda granulométrica de la norma BS EN 14227-1.

Por otra parte, la tabla de factores de equivalencia de materiales presenta una gama alta de materiales estabilizados con cemento portland, las cuales tienen resistencias a los 28 días que van desde 1.5 MPa hasta 20 MPa, sin embargo, las resistencias que las normas INVIAS están solamente en el rango de 5 a 8 MPa, por lo tanto, en este caso el rango de materiales se ve reducido solo a dos, mientras que la guía y normas del reino unido presentan 7 alternativas de bases tratadas con cemento. En la Tabla 20 se muestra los factores de equivalencia de materiales presentados en la guía británica y los posibles materiales que se pueden elaborar teniendo en cuenta las normas INVIAS-2013.

Tabla 20. Comparación de factores de equivalencia de materiales para bases estabilizadas con cemento con normas del Reino Unido e INVIAS-2013.

Agrupación de materiales	Material de construcción de base de pavimento				Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)
Mezclas estabilizadas con cemento	Resistencia del material a la compresión del cilindro a los 28 días (BS)	Normas Británicas aplicables	Resistencia del material a la compresión del cilindro a los 28 días (INVIAS)	Normas INVIAS aplicables	
	C1.5/2.0	<i>En BS EN 14227-1</i>	C1.5/2.0	-	1.74
	C3/4	<i>En BS EN 14227-1</i>	C3/4	-	1.38
	5 MPa	<i>En BS EN 14227-1</i>	5.0 MPa	Artículo 505-2013 Agregado Clase B	1.16
	<b>8 MPa</b>	<b>En BS EN 14227-1</b>	<b>8.5 MPa</b>	<b>Artículo 505-2013 Agregado Clase A</b>	<b>1.00</b>
	C12/15	<i>En BS EN 14227-1</i>	C12/15	-	0.87
	C16/20	<i>En BS EN 14227-1</i>	C16/20	-	0.79
	C20/25	<i>En BS EN 14227-1</i>	C20/25	-	0.74

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007.

En la misma línea de comparación la guía del Dr Knapton presenta una serie factores de equivalencia de materiales para mezclas estabilizadas con cenizas de

alto horno y escorias las cuales son altamente utilizadas en el reino unido, sin embargo, estas mezclas en Colombia no tienen normativa que permita realizar una comparación teórica de manera efectiva, es por esto que estas capas granulares no pueden ser comparadas con respecto a las normas INVIAS, y en su defecto tendrán que ser retiradas de la aplicación que se pretende hacer de la guía a las condiciones colombianas. No obstante, en caso que se estos materiales se quieran utilizar en un proyecto se deben establecer pruebas de laboratorio que tengan como guía la norma En BS EN 14227-2 y En BS EN 14227-3, esto con el fin que los factores de equivalencia de materiales se puedan utilizar directamente.

#### **4.2 CONCRETO HIDRÁULICO.**

El concreto hidráulico en la guía de la BPA, establece 8 diferencias resistencias del concreto para usar dentro de los diseños, y adicionalmente presenta dentro de los mismos rangos de resistencia, concretos con reforzamiento de fibras de acero de diferentes resistencias que permiten mejores comportamientos de las losas, todo esto enmarcado dentro de la norma BS8500-1 “Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier”.

En lo referente a normas colombianas el INVIAS en sus especificaciones de 2012 en el artículo 500 establece 3 diferentes tipos de resistencias para losas de pavimento, de acuerdo con los niveles de transito que se proyecten van a resistir los pavimentos, nivel de transito 1 (NT1), nivel de transito 2 (NT2) y nivel de transito 3 (NT3), por lo tanto, una comparación inicial permite establecer que en primera medida los rangos de resistencia que establece la BPA no son cubiertos en su totalidad por las normas INVIAS-2013, y en segunda medida que estas no tienen en cuanta concretos con reforzamiento con fibras de acero.

Sin embargo, pese a que se tienen 3 rangos de resistencia en el INVIAS estos están determinados bajo la resistencia a la flexión, mientras que las resistencias de los concretos expresados en la metodología BPA son resistencias a compresión. Para poder realizar una comparación el texto Concreto Simple expresa. “El módulo de rotura presenta valores que varían entre un 10% y un 20% de la resistencia a la

compresión. Una relación aproximada, que puede utilizarse cuando no se disponga de ensayos de flexión, se expresa en la Ecuación 28<sup>22</sup>.

$$MR = [k(RC)^{1/2}] \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

MR = Módulo de rotura estimado para el concreto (kg/cm<sup>2</sup>).

RC = Resistencia a la compresión obtenida en el concreto (kg/cm<sup>2</sup>).

k = Constante que varía normalmente entre 2,0 y 2,7, para resistencias en kg/cm<sup>2</sup> a 28 días.

Para la comparación de resistencias del concreto entra la norma BS8500-1 y el artículo 500 de las especificaciones INVIAS-2013, se tomó como base la Ecuación 28 y se analizaron las resistencias de los 3 niveles de transito que establece el INVIAS, en la Tabla 21 se muestra la el resultado de la comparación de resultados.

Tabla 21. Comparación de módulos de rotura según normas BS e INVIAS-2013

Resistencia del cilindro a la compresión BS (MPa)	Resistencia del cilindro a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de rotura Basado en Correlación MR=2.35(RC) <sup>1/2</sup> en (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de rotura (Mpa)
8	81.58	21.23	2.08
12	122.37	26.00	2.55
16	163.15	30.02	2.94
20	203.94	33.56	3.29
25	254.93	37.52	3.68
28	285.52	39.71	3.89
32	326.31	42.45	4.16
35	356.90	44.40	4.35

Fuente: Propia a partir de las Normas INVIAS-2013 y KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007.

<sup>22</sup> RIVERA LOPEZ, Gerardo Antonio. Concreto Simple: Popayán: Universidad del Cauca, 2010. p.138

Como se puede observar en la Tabla 21 los tres valores mínimos establecidos por el INVIAS 2012 para niveles de tránsito 1, 2 y 3 están en el rango de los tres más altos que establece las normas BS. 28, 32 y 35 MPa, sin embargo, es importante precisar que en la medida de requerir concretos con resistencias menores a las establecidas en las normas INVIAS, se deberá concertar con el fabricante, esto teniendo en cuenta que al tener unas resistencias menores a las normalizadas, los fabricantes de concretos no deberán tener inconvenientes en producirlos.

Las especificaciones INVIAS-2013 en las tablas 500-2 y 500-4 establecen los requerimientos mínimos de los agregados finos y gruesos, por el contrario, la norma BS8500-1 no establece rangos de necesidades de calidades mínimas de los materiales, en este se establece que estas condiciones se deben consultar en la norma BS EN 206-2002, sin embargo, en esta se dispone que lo relacionado con los agregados pétreos deberá ser consultado a detalle en la norma BS EN 12620:2002.

La norma BS EN 12620:2002, establece algunos requerimientos de los agregados pétreos naturales, no obstante, como se muestra en la Tabla 22 estos requerimientos son difícilmente comparables con los requeridos por las especificaciones INVIAS, esto debido a que en primera medida no generan requerimientos en los mismos aspectos que lo realiza el INVIAS, y en segunda medida en gran parte de las obligaciones las dejan que las declare el productor.

Tabla 22. Recomendaciones para agregados naturales de peso normal y pesado y para escoria de alto horno refrigerada por aire

<b>Propiedad<sup>a</sup></b>	<b>Sección en la norma EN 12620:2002</b>	<b>Categoría según EN 12620<sup>a</sup></b>
Contenido de finos	4.6	Categoría o valor a declarar
Índice de lajas	4.4	≤ FI 50 o ≤ SI 55
Índice de Shell <sup>b</sup>	4.4 y 4.5	SC 10
Resistencia al desgaste	5.2	≤ LA 50 o ≤ SZ 32
Densidad de partículas secas al horno	5.5	Valor a declarar
Absorción de agua	5.5	Valor a declarar
Sulfato soluble en ácido	6.3.1	Agregados naturales: ≤AS 0.8

		Escoria de alto horno enfriada por aire: $\leq$ AS 1.0
Contenido total de azufre	6.3.2	Agregados naturales: $\leq$ 1% en masa. Escoria de alto horno enfriada por aire: $\leq$ 2% en masa
Contenido de cloruro soluble en agua	6.2	Valor a declarar
<p><sup>a</sup> La categoría NR (sin requisito) puede aplicarse a otras propiedades no mencionadas en esta tabla para las que se puede declarar una categoría NR según EN 12620.</p> <p><sup>b</sup> Solo relevante para áridos de origen marino.</p>		

Fuente: BS EN BS EN 206-2002 - Concrete - Specification, performance, production and conformity, Anexo E. p. 76

Basados en el análisis anteriormente desarrollado, se establece que las características de los concretos en su análisis de resistencia pueden ser comparable y equiparable con las normas y requisitos colombianos, no obstante, en los relacionado a las características de los materiales que constituyen el concreto la comparación no es productiva.

En este orden de ideas y si se tiene en cuenta que el factor más representativo en los concretos es la resistencia, se puede concluir de este análisis que 3 de las resistencias de los concretos establecidos en el manual de diseño de la BPA si se pueden elaborar con las normas y especificaciones colombianas, en la Tabla 23 se establece en el aspecto de los concretos como quedaría reducida la tabla de equivalencia de materiales que es el motivo del análisis de la presente sección.

Tabla 23. Factores de equivalencia de materiales para losas de concreto hidráulico con normas del Reino Unido e INVIAS-2013.

Resistencia de concreto según norma BS (MPa)	Norma BS	Norma INVIAS	Módulo de rotura BS (MPa)	Módulo de rotura INVIAS (MPa)	Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)
C <sub>28/35</sub>	En BS8500-1	Art. 500 INVIAS-2013	3.89	3.80	0.62
C <sub>32/40</sub>	En BS8500-1	Art. 500 INVIAS-2013	4.16	4.00	0.60
C <sub>35/45</sub>	En BS8500-1	Art. 500 INVIAS-2013	4.35	4.20	0.58

Fuente: Propia a partir de las Normas INVIAS-2013 y KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p.28-29

### 4.3 CONCRETOS ASFALTICOS.

El manual de diseño de pisos industriales del Dr. Knapton en lo referente a concretos asfálticos expresa que estos son de tres clases, mezcla asfáltica de alta resistencia (HDM por sus siglas en inglés), mezcla densa en caliente (DBM por sus siglas en inglés) y mezclas discontinuas en caliente (HRA por sus siglas en inglés), a su vez el manual indica que estas mezclas deben estar de acuerdo a las Especificaciones para obras viales de la Agencia de Carreteras del Reino Unido SHW por sus siglas en inglés.

La SHW en su serie 900 “Pavimentos de carretera - materiales mezclados con asfalto”, proporciona requisitos generales para las propiedades de los agregados y los asfaltos utilizados en mezclas de concreto asfáltico, de igual manera las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 en su capítulo 4 artículo 450-13 y 452-13 mencionan las características mínimas que deben contener los materiales para mezclas densas en caliente, mezclas de alto modulo y mezclas discontinuas, en la Tabla 24 se presenta un análisis comparativo de los requisitos de propiedades de los agregados entre las normas SHW serie 900 y el capítulo 4 de las normas INVIAS-2013.

#### 4.3.1 Comparación de calidades de los materiales granulares. En la Tabla 24

se puede observar que no todas las características que requiere las normas INVIAS-2013 son requeridas por las normas BS EN, sin embargo, varias de las particularidades de los agregados que coinciden son equivalentes para los 3 niveles de tránsito, a excepción de las partículas planas y alargadas y las pérdidas en sulfato de magnesio, ya que en las normas INVIAS-2013 están por debajo de lo solicitado en las normas británicas.



Tabla 24. Comparación Normas SHW Vs INVIAS-2013 de calidades de los materiales para mezclas asfálticas.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO			NORMA DE ENSAYO BS-EN	VALOR
		NT1	NT2	NT3		
<b>Dureza, agregado grueso (O)</b>						
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones - Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones	E-218	25/35/- 5/7/-	25/35/35 5/7/7	25 / 35 / 35 5/7/7	13043	≥30
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-238		25/30/30	20/25/25	13043	≤25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base - Valor en seco, mínimo (KN) - Relación húmedo/seco, mínima (%)	E-224			110/90/75 75/75/75	N/A	N/A
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45	BSI PD 6691	0.45
<b>Durabilidad (O)</b>						
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18	BSI PD 6691	25
<b>Limpieza, agregado grueso (F)</b>						
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5	N/A	N/A
<b>Limpieza, gradación combinada (F)</b>						
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP	N/A	N/A

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO			NORMA DE ENSAYO BS-EN	VALOR
		NT1	NT2	NT3		
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	50	50	50	BS EN 13043	50
Valor de azul de metileno, máximo	E-235	10	10	10	N/A	N/A
<b>Geometría de las partículas, agregado grueso (F)</b>						
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10	BS EN 13043	20
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara: rodadura / intermedia / base - Dos caras: rodadura / intermedia / base	E-227	75/60/- -/-	75/75/60 60/-	85/75/60 70/-	BS EN 13043	Reportar
<b>Geometría de las partículas, agregado fino (F)</b>						
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%) - Capa de: rodadura / intermedia / base	E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35	N/A	N/A
<b>Adhesividad (O)</b>						
Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%)	E-757	Reportar			BS EN 12697-37	≥5
Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método riedel-weber), índice mínimo	E-774	4			BS EN 12697-38	≥4

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones para obras viales de la Agencia de Carreteras del Reino Unido SHW, mayo de 2018.

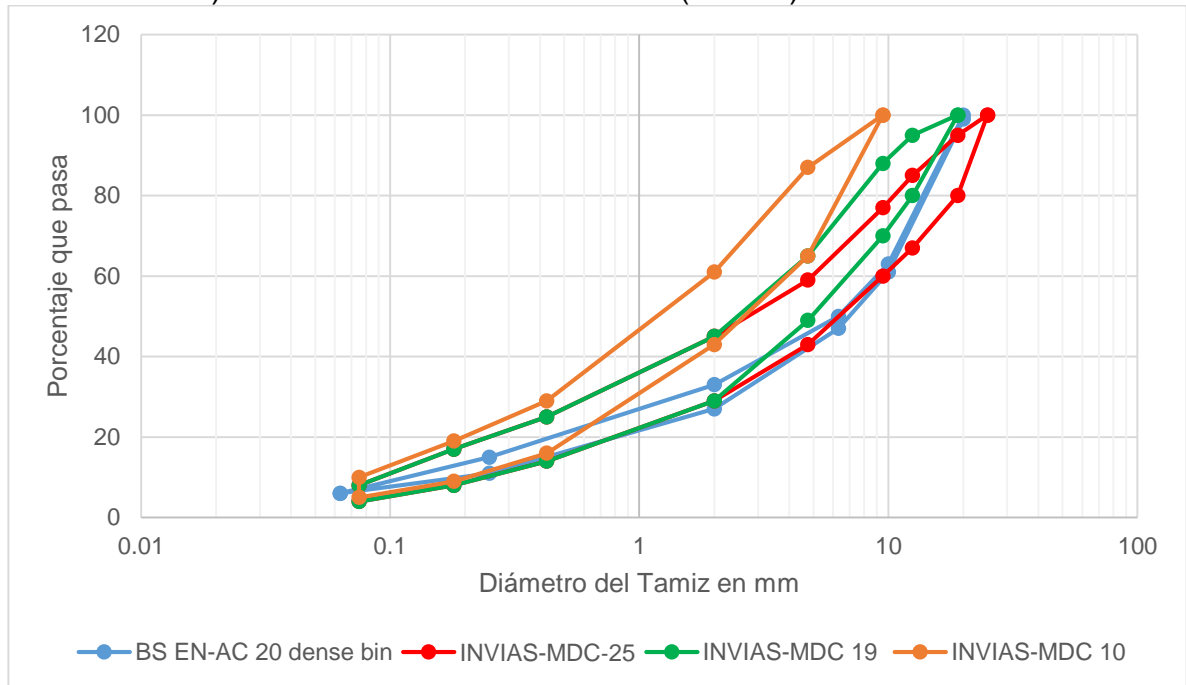
**4.3.2 Comparación de granulometrías para mezclas asfálticas.** La metodología de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales de la British Ports Association (BPA) contempla 3 tipos de mezclas bituminosas que pueden ser utilizadas en el diseño de pavimentos, por tanto, a continuación, se describen cada uno de los requisitos granulométricos para cada una de las mezclas que la BPA exponen en su manual.

4.3.2.1 Mezclas densas en caliente (DBM): En el anexo B de la norma BSI PD 6691 se especifica las características principales de los materiales usados para las mezclas densas en caliente DBM, estas las subdividen en dos tipos, para mezclas de capas intermedias denominada “AC 20 dense bin” y mezclas para capas de rodadura denominadas “AC 10 close surf y AC 6 dense surf”, a cada una de estas mezclas la norma le define, la granulometría, y sus respectivas tolerancias. De la misma manera las especificaciones INVIAS-2013 en el artículo 450 del capítulo 4 se presentan las granulometrías para las mezclas densas en caliente la cual esta subdividida en 3 tipos de mezcla, MDC-25, MDC-19 y MDC-10.

En primera medida al revisar las granulometrías presentadas en cada una de las normas, se debe indicar que estas mezclas de agregados pétreos utilizan diferentes series de tamices, las especificaciones INVIAS utiliza la serie U.S. estándar de tamices a diferencia de las normas SHW emplea la serie británica de tamices, sin embargo, pese a estas diferencias iniciales se puede realizar una comparación grafica de las granulometrías de las mezclas asfálticas en caliente.

Por tanto, en la Figura 44 se presenta la comparación grafica de las granulometrías de la mezcla AC 20 dense bin, comprada con los 3 tipos de mezclas densas en caliente detalladas en las especificaciones INVIAS-2013.

Figura 44. Comparación granulométrica de una mezcla AC 20 dense bin (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezclas densas en caliente (450-13) INVIAS-2013.



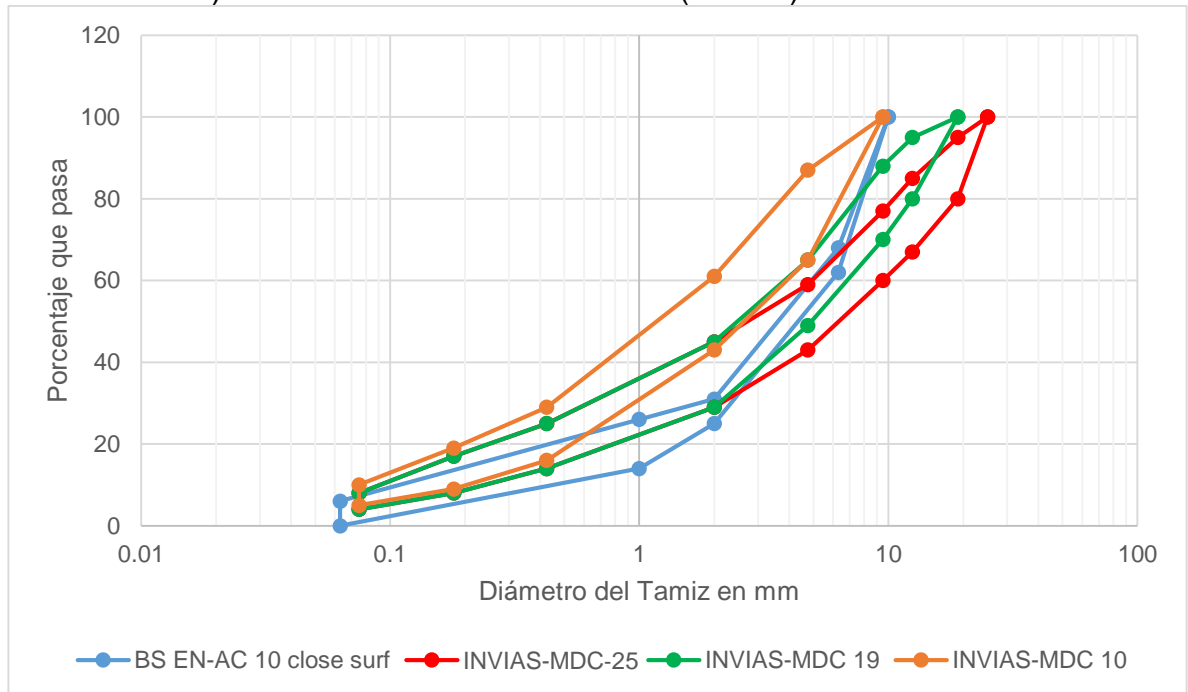
Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido, mayo de 2006.

Como se puede observar en la Figura 44 la mezcla AC 20 dense bin tiene grandes similitudes en la granulometría con respecto a la MDC-20 teniendo solo diferencias en el inicio y final de las curvas granulométricas, esto debido a que la serie de tamices inicia y finaliza en aberturas de tamiz diferentes sin embargo con las respectivas precauciones estas mezclas de materiales granulares se pueden realizar bajo las especificaciones INVIAS-2013.

La segunda mezcla que la norma BSI PD 6691 en su anexo B especifica la granulometría para una mezcla es la “AC 10 close surf”, la cual al igual que la primera mezcla se realizó la comparación grafica con respecto de las curvas granulométricas de las mezclas densas en caliente de las especificaciones INVIAS-2013, como se puede ver en la Figura 45 la curva granulométrica que más se ajusta a la curva de las especificaciones británicas es la mezcla MDC-19, no obstante, la granulometría de la mezcla inicialmente mencionada pese a coincidir con una de las mezclas INVIAS-2013 se debe tener especial cuidado en la preparación de esta mezcla con las características de las especificaciones colombianas, esto debido a que el rango de acción de es muy reducido, sin embargo como lo muestra la Figura

45, la mezcla MDC-19 de materiales granulares se ajusta en gran medida a las condiciones de la mezcla británica, por tanto es factible su ejecución en las condiciones nacionales.

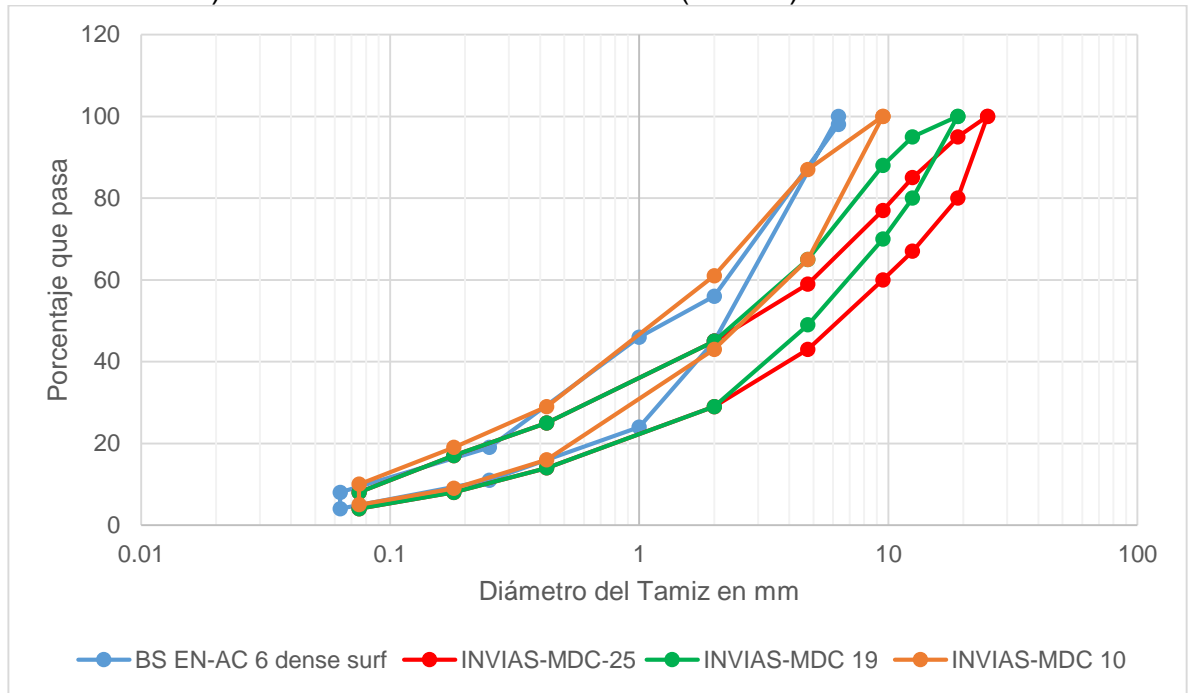
Figura 45. Comparación granulométrica de una mezcla AC 10 close surf (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezclas densas en caliente (450-13) INVIAS-2013.



Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido, mayo de 2006.

Por último, las especificaciones de mezclas bituminosas del reino unido establece una mezcla de materiales granulares denominada “AC 6 dense surf”, la cual como se puede ver en la Figura 46 se realizó la respectiva comparación con las mezclas densas en caliente que determina las especificaciones INVIAS-2013, esta comparación permite evidenciar que la mezcla que más se asemeja es la MDC-10 teniendo unas ligeras diferencias en el inicio y final de las curvas granulométricas, esto debido a que la serie de tamices difieren, ahora eso sin especificar que es probable la elaboración de este tipo de mezcla contando con las normas colombianas.

Figura 46. Comparación granulométrica de una mezcla AC 6 close surf (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezclas densas en caliente (450-13) INVIAS-2013.



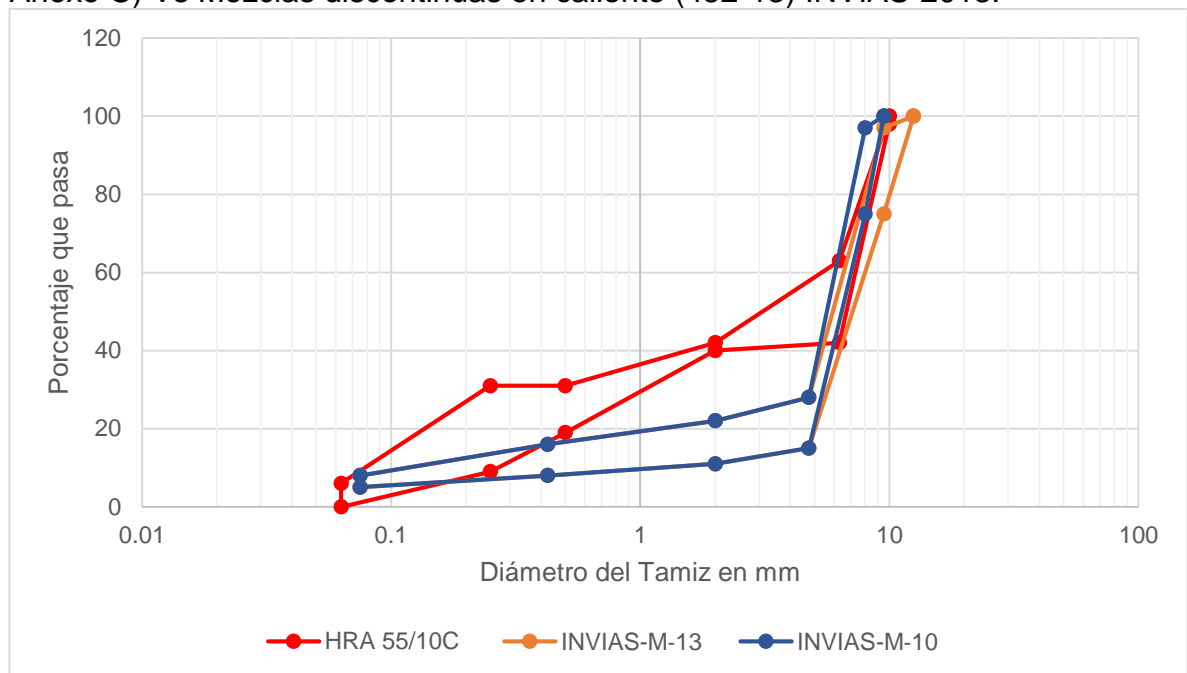
Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido, mayo de 2006.

La comparación de curvas granulométricas de las mezclas densas en caliente nos permite inferir que los tres tipos de mezcla desde el componente de la granulometría de la mezcla pueden ser elaboradas bajo las características y especificaciones colombianas.

4.3.2.2 Mezclas discontinuas en caliente (HRA): La serie 900 de la SHW detalla que siempre que se requiera realizar una mezcla discontinua en caliente se debe revisar las granulometrías respectivas en el anexo B de la norma BSI PD 6691, en esta norma se distinguen 3 tipos de mezclas, “HRA 30/14F y HRA 55/10F” las cuales tienen unas condiciones de mezcla cerrada y “HRA 55/10C”, la cual presenta condiciones de mezcla abierta. De igual modo las especificaciones INVIAS-2013 en su capítulo 452, presentan 4 granulometrías para mezclas discontinuas, F-13 y F-10 que al igual que las normas británicas especifican que este tipo de mezclas es de tipo cerrada y M-13 y M-10 que son de tipo abierta.

En lo referente a la mezcla HRA 30/14F es pertinente realizar una comparación grafica con las mezclas discontinuas cerradas de las especificaciones INVIAS-2013, como se puede ver en la Figura 47 de las curvas granulométricas tienen características muy distintas, encontrado coincidencias granulométricas muy pobres, es por esto que granulométricamente es muy difícil generar una mezcla granular con especificaciones colombianas de condiciones similares a las que se requieren en las especificaciones del reino unido.

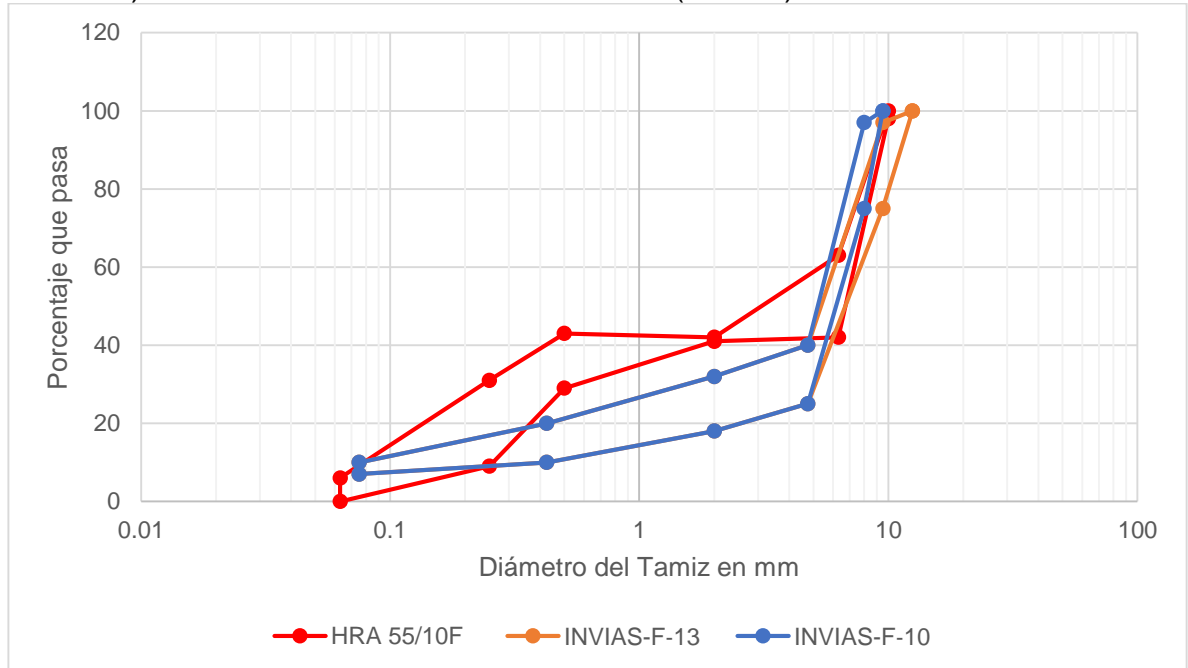
Figura 47. Comparación granulométrica de una mezcla HRA 55/10F (BS EN 6691-Anexo C) Vs Mezclas discontinuas en caliente (452-13) INVIAS-2013.



Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido, mayo de 2006.

Así mismo la curva granulométrica de la mezcla HRA 55/10F comparada con las curvas granulométricas de las mezclas discontinuas de tipo cerrado de las especificaciones INVIAS-2013 como se muestra en la Figura 48 tienen pocos sectores coincidentes entre sí, es por esto que al igual que la primera mezcla esta genera grandes inconvenientes para ser elaborada bajo las condiciones normativas de Colombia,

Figura 48. Comparación granulométrica de una mezcla HRA 55/10F (BS EN 6691-Anexo C) Vs Mezclas discontinuas en caliente (452-13) INVIAS-2013.

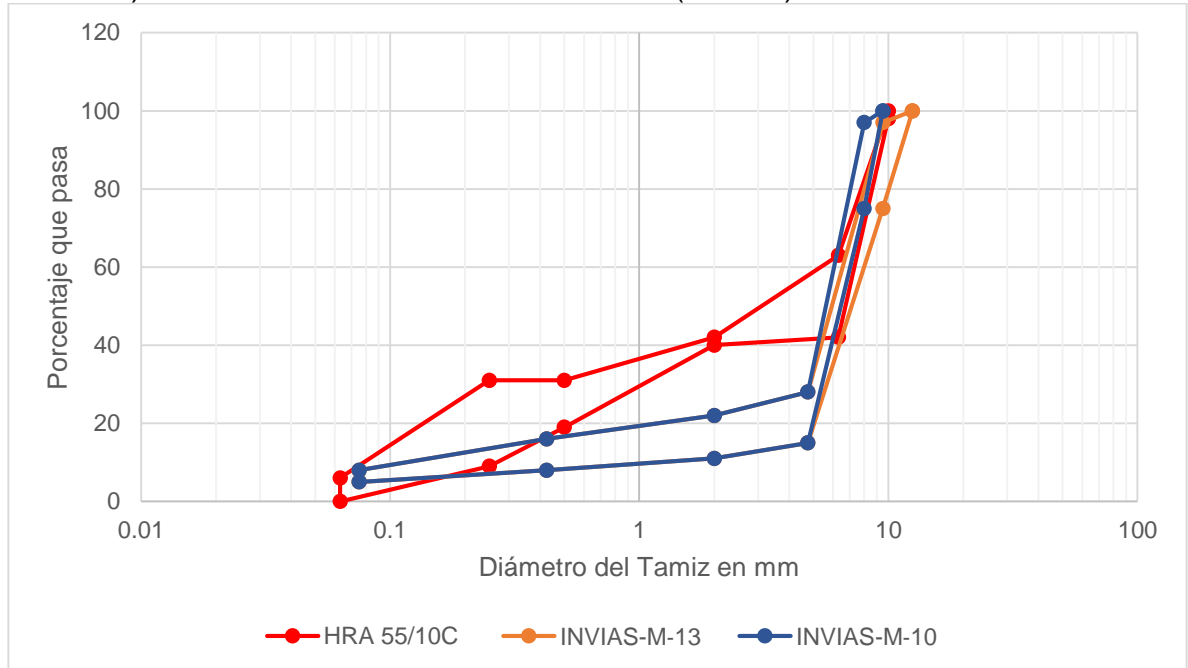


Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido, mayo de 2006.

La tercera curva granulométrica de la mezcla que la serie 900 de las especificaciones SHW resumida en el anexo B de la norma BSI PD 6691 denominada “HRA 55/10C”, expone que esta es una mezcla discontinua con condición abierta la cual es similar a las mezclas tipo M de las especificaciones INVIAS-2013 la cual establece dos tipos de mezclas, M-13 y M-10, teniendo en cuenta la similitud teórica de estas mezclas en la Figura 49 se realizó una comparación grafica de las curvas granulométricas, en donde esta paralelo nos permite visualizar que al igual que las mezclas discontinuas de tipo cerrado no se tienen mayores coincidencias con las normas normativas con las granulometrías colombianas, esto permite inferir que este tipo de mezcla es de difícil elaboración bajo las especificaciones INVIAS-2013 en lo relacionado con la mezcla de materiales granulares.



Figura 49. Comparación granulométrica de una mezcla HRA 55/10C (BS EN 6691-Anexo C) Vs Mezclas discontinuas en caliente (452-13) INVIAS-2013.



Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido, mayo de 2006.

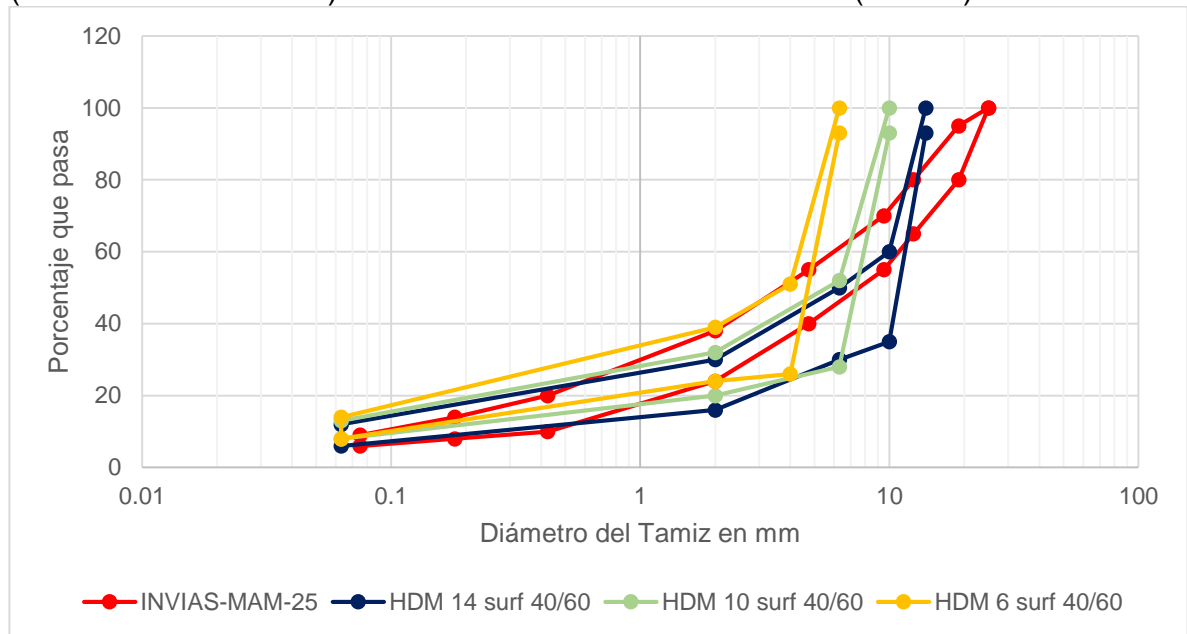
De las anteriores comparaciones se puede deducir que las características granulométricas de las mezclas discontinuas de tipo abierto y cerrado que nos solicita las especificaciones SHW, son difícilmente desde la granulometría de poderse elaborar bajo las condiciones y especificaciones colombianas, esto debido a que las curvas granulométricas tienen grandes diferencias entre sí.

4.3.2.3 Mezclas de alto módulo HDM: Las mezclas de alto modulo según la serie 900 de las especificaciones SHW expuesta en la norma BSI PD 6691 anexo B, la cual las subdividen en 3 tipos de mezclas, HDM 14 surf 40/60, HDM 10 surf 40/60 y HDM 6 surf 40/60, por el contrario, el INVIAS-2013 en su artículo 450 del capítulo 4 especifica solo un tipo de mezcla de alto módulo que es de tipo MAM-25.

Teniendo en cuenta que las especificaciones británicas tienen 3 tipos de mezcla y la normativa colombiana solo cuenta con una, se realiza un análisis comparativo de las granulometrías de las tres mezclas británicas comparadas contra la mezcla INVIAS-2013, como se muestra en la Figura 50 la granulometría que más se ajusta

a la MAM-25 es la HDM 14 surf 40/60, esto sin desconocer que el límite inferior de la banda granulométrica esta por fuera de la banda colombiana, sin embargo con las respectivas precauciones esta mezcla es factible de elaborar con las especificaciones particulares del INVIAS-2013.

Figura 50. Comparación granulométrica de una mezcla HDM 14, 10 y 6 surf 40/60 (BS EN 6691-Anexo B) Vs Mezcla de alto módulo MAM-25 (450-13) INVIAS-2013.



Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido, mayo de 2006.

Con la ejecución de la comparación grafica de las granulometrías se puede deducir que la mezcla de agregados petroso tipo HDM 14 surf 40/60 es factible de prepararse bajo las especificaciones INVIAS-2013 de acuerdo al capítulo 4 artículo 450, esta preparación en caso de requerirse se deberá hacer con un estricto control esto debido a que se tiene muy poca maniobrabilidad entre el limite supero e inferior de la banda granulométrica que se ajuste tanto a la normativa británica como a la colombiana.

**4.3.3 Comparación de requisitos de diseño de las mezclas asfálticas.** En lo referente a los diferentes tipos de mezclas, dentro de las especificaciones para obras viales de la agencia de carreteras del Reino Unido (SHW) se define que para cada una de las capas y materiales de las mezclas asfálticas se deben revisar los

aspectos específicos en los anexos A, B y C de norma BSI PD 6691, en el anexo B se especifican las condiciones mínimas de la mezcla densa en caliente DBM, anexo C la cual especifica las condiciones de la mezcla de gradación discontinua HRA y D se detallan las necesidades de la mezcla de alta resistencia HDM, en esta norma se definen los criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.

Así mismo en el capítulo 4 de la norma INVIAS-2013 se definen na serie de aspectos a tener en cuenta en el diseño de la mezcla, en el artículo 450-13 se especifican los criterios para las mezclas asfálticas en caliente de gradación continúa incluyendo mezclas de alto modulo, y en el artículo 452-13 las mezclas discontinuas en caliente para capa de rodadura.

Realizado una comparación de los aspectos detallados tanto en las normas SHW y las INVIAS-2013 en lo referente a las mezclas densas en caliente y de alto modulo estas en rangos equiparables de requerimientos mínimos de la mezcla, en la Tabla 25 se muestra la comparación de los requisitos mínimos que se solicitan en cada una de las mezclas.

Estos dos tipos de mezclas requieren aspectos similares comparativamente entre las dos normas, esto sin dejar de lado que cada una de las normas exige algunos aspectos diferentes, sin embargo, dentro de las solicitudes en las que coinciden las dos normas se tiene características que se encuentran dentro de los mismos rangos, es por esto que en lo referente a las características de las mezclas y teniendo en cuenta que las dos normas utilizan el método Marshall para diseño de la mezcla, se puede establecer que las mesclas densas en caliente y las mezclas de alto modulo se pueden diseñar con las normas INVIAS-2013.

Tabla 25. Comparación de parámetros diseños por el método Marshall para mezclas de densas en caliente y mezclas de alto modulo entre las normas SHW Vs INVIAS-2013.

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	NORMA ENSAYO BS EN	MEZCLAS DBM	MEZCLAS HDM	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO							
		NT1	NT2	NT3					
Compactación (golpes/cara)	E-748 ( E-800)	50	75(112)	75 (112)	75	BS EN 12697-32	75	75	
Estabilidad mínima (N)		5000	7500 (16875)	9000 (33750)	15000		5000 a 12500	15000	
Flujo(mm)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0	BS EN 13108-20	1 a 8	1 a 8	
Relación Estabilidad/ Flujo (KN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-	BS EN 13108-20	1 a 4	1 a 4	
Vacíos con aire (Va), %	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA	BS EN 13108-20	2 a 14	2 a 14
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0			
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0			
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13		-	BS EN 13108-20	8 a 18	8 a 18	
	T. Máx. 25 mm		14		14				
	T. Máx. 19 mm		15		-				
	T. Máx. 10 mm		16		-				
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75	BS EN 12697-8	50 a 78	50 a 78	
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso	E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4	N/A	N/A	N/A	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico				EN 12697- 1	3 a 8	3 a 8	
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo µm	E-741	7.5				N/A	N/A	N/A	

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones para obras viales de la Agencia de Carreteras del Reino Unido SHW, mayo de 2018.

Las mezclas de gradación discontinua denominadas HRA según SHW igualmente que las mezclas densas en caliente se basan en el método Marshall, sin embargo, los requerimientos solicitados son menores que los que se requieren para las mezclas densas en caliente, en el artículo 452 del capítulo 4 de las especificaciones INVIAS-2013 se establecen los parámetros mínimos a cumplir para el diseño de una mezcla de gradación abierta, en este mismo aspecto la norma BSI PD 6691, en el anexo C se establecen los rangos mínimos para este tipo de mezcla. Estas mezclas se subdividen según las especificaciones INVIAS-2013 en mezclas de tipo M que son mezclas abiertas con porcentajes elevados de vacíos y tipo F las cuales son mezclas con características cerradas y con un porcentaje de vacíos inferiores a las de tipo M.

Al realizar un análisis comparativo entre las dos normas se debe iniciar indicando que las especificaciones INVIAS-2013 establece parámetros mínimos tanto para las mezclas tipo M como para las F, a diferencia de las normas SHW que establece los mismos parámetros tanto para mezclas abiertas como para cerradas. En la Tabla 26 se relacionan los aspectos característicos de diseño del método Marshall para las mezclas abiertas, así mismo se en la Tabla 27 se relacionan las características de diseño de las mezclas cerradas.

El análisis comparativo de los requisitos para las mezclas de gradación discontinua debido a que están gobernados por los criterios Marshall tienen aspectos similares a comprar, esto sin dejar de lado que las dos normativas solicitan algunos aspectos que no se pueden comparar, no obstante, se encontró que en los aspectos comparables las dos normas están en rangos similares, es por esto que este tipo de mezclas en lo referente a diseño de mezclas pueden ser trabajables bajo las normas INVIAS-2013.

Tabla 26. Comparación de parámetros diseños por el método Marshall para mezclas de gradación discontinua abierta en caliente entre las normas SHW Vs INVIAS-2013.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>NORMA DE ENSAYO INV</b>	<b>MEZCLAS INVIAS</b>	<b>NORMA ENSAYO BS EN</b>	<b>MEZCLAS DBM</b>
Contenido de ligante: % en masa sobre el agregado seco, mínimo	-	5.0	BS EN 12697-8	4.6

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>NORMA DE ENSAYO INV</b>	<b>MEZCLAS INVIAS</b>	<b>NORMA ENSAYO BS EN</b>	<b>MEZCLAS DBM</b>
Compactación: número de golpes por cara	E-760	50	BS EN 12697-32	75
Pérdida por abrasión en seco, máximo (%)	E-760	15	N/A	N/A
Vacios con aire en la mezcla compactada, mínimo (%)	E-736	12	BS EN 13108-20	3.0
Relación llenante/ligante efectivo, en peso	-	1.2 a 1.4	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones para obras viales de la Agencia de Carreteras del Reino Unido SHW, mayo de 2018.

Tabla 27. Comparación de parámetros diseños por el método Marshall para mezclas de gradación discontinua cerrada en caliente entre las normas SHW Vs INVIAS-2013

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>NORMA DE ENSAYO INV</b>	<b>MEZCLAS INVIAS</b>	<b>NORMA ENSAYO BS EN</b>	<b>MEZCLAS DBM</b>
Contenido de ligante: % en masa sobre el agregado seco, mínimo	-	5.5	BS EN 12697-8	4.6
Compactación: número de golpes por cara	E-748	50	BS EN 12697-32	75
Estabilidad, mínimo (N)	E-748	7500	BS EN 12697-32	5000 a 12500
Vacios con aire, mínimo (%)	E-736	4	BS EN 13108-20	3.0
Relación llenante/ligante efectivo, en peso	-	1.4 a 1.8	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones para obras viales de la Agencia de Carreteras del Reino Unido SHW, mayo de 2018.

El análisis general de los requisitos de para mezclas asfálticas permite establecer que las mezclas densas en caliente y las mezclas de alto modulo son elaborables bajo las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013,

esto teniendo un gran control con los materiales y acompañado de las respectivas verificaciones en laboratorio, por el contrario las mezclas discontinuas tienen grandes diferencias especialmente en las granulometrías de las mezclas con las propuestas por las especificaciones INVIAS-2013, es por eso que para el presente trabajo se tendrán en cuenta para el cuadro de factores de equivalencia de materiales solo las mezclas densas en caliente DBM y las mezclas de alto módulo HDM, como se puede ver en la Tabla 28 en el caso de los concretos asfálticos la tabla de factores de equivalencia de materiales quedara constituido con estos dos tipos de mezclas.

Tabla 28. Factores de equivalencia de materiales para concretos asfálticos con normas del Reino Unido e INVIAS-2013.

<b>Agrupación de materiales</b>	<b>Norma BS</b>	<b>Norma INVIAS</b>	<b>Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)</b>
<b>Materiales mezclados con asfalto</b>	HDM según lo define SHW	INVIAS-2013 Art. 450	0.82
	DBM según lo define SHW	INVIAS-2013 Art. 451	1

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y Especificaciones de materiales para mezclas bituminosas del Reino Unido (SHW), mayo de 2006.

#### **4.4 MATERIALES GRANULARES TIPO BASE.**

Los materiales granulares tipo bases granulares, en la guía de la British Ports Association (BPA), no solicita calidades o algún requerimiento en específico para el diseño de la mezcla de los materiales, en este aspecto la guía británica solicita que los materiales tipo base que se utilicen para los diseños de pavimentos para puertos y áreas industriales deben tener un CBR igual o superior al 80%.

Por otro lado el capítulo 3 de las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013 en su artículo 330 especifica 3 clases de bases granulares definidas en función de la calidad de sus materiales, clase A, B y C, las cuales igualmente están en función de los niveles de tránsito a los que va a ser sometida la capa granular, revisando el requerimiento de porcentaje de CBR para la clase B

y C las especificaciones INVIAS-2013 solicitan que estas dos mezclas deben tener un CBR igual o superior al 80% y para la clase A una CBR mayor o igual a 95%.

Dado lo anteriormente mencionado las capas granulares tipo base que solicita la BPA para los factores de equivalencia de materiales son construibles bajo las condiciones y especificaciones INVIAS-2013, esto teniendo en cuenta que la única condición que se tiene para estos tipos de capas es la capacidad de soporte CBR. Por este motivo en la Tabla 29 se presenta la configuración de la tabla de factores de equivalencia de materiales en lo concerniente a bases granulares.

Tabla 29. Factores de equivalencia de materiales para bases granulares con normas del Reino Unido e INVIAS-2013.

<b>Agrupación de materiales</b>	<b>Norma BS</b>	<b>Norma INVIAS</b>	<b>Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)</b>
<b>Materiales sin consolidar</b>	Material granular de base con CBR $\geq$ 80%	INVIAS-2013 Art. 330 BG-A, B, C	3.00

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 29.

#### **4.5 ADOQUINES DE CONCRETO.**

La metodología de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales que propone el Dr. Knapton en su metodología enuncia que se deben tener en cuenta como capa de rodadura los adoquines en concreto de modulares con dimensiones de 200mm x100mm y un espesor de 80 mm, sin embargo, dentro de las especificaciones y la guía de diseño no se tienen especificaciones o consideraciones especiales para este tipo de material.

Las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013 en su capítulo 5 artículo 510 informa los requisitos mínimos que se deben tener para capas de pavimento con adoquines. La norma al igual que la guía británica especifica que los adoquines deben ser rectangulares de 200mm de largo, 100mm de ancho y 80mm de espesor. Basados solo en las dimensiones y uso que se les dará a los adoquines se puede prever que con la normatividad colombiana son elaborables los adoquines en concreto y que a su vez estos tienen la calidad de materiales que permitan el tránsito de vehículos de carga sobre ellos, es por esto que este tipo de



materiales se deja dentro de la tabla de equivalencia de materiales, en la Tabla 30 se presenta la configuración de factores de equivalencia de materiales en lo relacionado con adoquines de concreto.

Tabla 30. Factores de equivalencia de materiales para adoquines de concreto con normas del Reino Unido e INVIAS-2013.

Agrupación de materiales	Norma BS	Norma INVIAS	Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)
Adoquines de concreto	Pavimentación con adoquines de concreto como capa de rodadura.	INVIAS-2013 Art. 510	1.00

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 29.

#### 4.6 PLANTEAMIENTO DE LA TABLA DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE MATERIALES APLICADOS A COLOMBIA.

Dados los análisis de cada uno de los materiales que componen la tabla de equivalencia de materiales de la guía The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries 2007, con la factibilidad de diseñar y construir este tipo de capas bajo las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, y pese a que la gama de materiales que podrán transformarse a materiales de los cuales está compuesta la guía BPA son inferiores, los materiales disponibles para ser utilizados permiten una correcta implementación de la guía de diseño con las condiciones colombianas, es por esto que en la Tabla 31 se presentan los factores de equivalencia de materiales incorporando solamente los materiales que se analizaron pueden ser diseñados y construidos bajo las especificaciones INVIAS-2013.

La factibilidad del diseño y construcción de los materiales está directamente relacionada con el control que se le realice a cada uno de los procesos de diseño y construcción de cada una de las capas, toda vez que en algunos casos el cumplimiento de los parámetros de acuerdo a las normas británicas hace que las tolerancias de cada uno de los aspectos a cumplir en las especificaciones INVIAS-

2013 sean más pequeñas, es por esto que se deberá tener especial cuidado con la preparación de cada uno de los materiales llevándolos al cumplimiento simultaneo de las dos normas.

Tabla 31. Factores de Equivalencia de Materiales construibles bajo las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013.

Agrupación de materiales	Material de construcción de base de pavimento				Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)
	Resistencia del material a la compresión a los 28 días (BS)	Normas BS EN aplicables	Resistencia del material a la compresión a los 28 días (INVIAS)	Normas INVIAS aplicables	
Mezclas estabilizadas con cemento	5 MPa	En BS EN 14227-1	5.0 MPa	Art. 505-2013 Clase B	1.16
	8 MPa	En BS EN 14227-1	8.5 MPa	Art. 505-2013 Clase A	1
	28 MPa	En BS8500-1	27 MPa	Art. 500 INVIAS-2013 Mr-3.8 MPa	0.62
Concreto	32 MPa	En BS8500-1	30 MPa	Art. 500 INVIAS-2013 Mr-4.0 MPa	0.6
	35 MPa	En BS8500-1	33 MPa	Art. 500 INVIAS-2013 Mr-4.2 MPa	0.58
Agrupación de materiales	Norma BS		Norma INVIAS		Factor de Equivalencia de Materiales (MEF)
Materiales mezclados con asfalto	HDM según lo define SHW		INVIAS-2013 Art. 450 MDC-25, 19 y 10		0.82
	DBM según lo define SHW		INVIAS-2013 Art. 450 MAM-25		1
Materiales sin consolidar	Material granular de base con CBR $\geq$ 80%		INVIAS-2013 Art. 330 BG-A ,B y C		3
Adoquines de concreto	Pavimentación con adoquines de concreto como capa de rodadura.		INVIAS-2013 Art. 510		1.00

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 28-29.

#### 4.7 CAPAS DE SUBBASE Y RECUBRIMIENTO PARA CIMENTACIONES DE PAVIMENTOS INDUSTRIALES.

Una de las premisas que se tiene en el diseño de pavimentos con la metodología de la BPA es que la subrasante deben tener como mínimo un valor de CBR igual a superior al 5% esto debido a las grandes deformaciones que los equipos puedan generar en el momento de operar sobre el pavimento. Basados en esta premisa y que la metodología BPA plantea en la Tabla 11 los valores de materiales de recubrimiento y de subbase que se deben usar dependiendo del valor de CBR que tenga la subrasante donde se va a cimentar el pavimento.

La guía de la BPA construyo la Tabla 11 con un material de mejoramiento el cual es de tipo granular y con un módulo de rigidez de 50 MPa, a su vez se plantea un material de subbase granular con un valor de CBR 80%, teniendo en cuenta que el material de mejoramiento su capacidad de soporte esta expresada en módulo de resiliencia y las normas colombianas formula las capacidades de soporte de los materiales en valores de porcentaje de CBR en primera medida se debe realizar la conversión del material a un valor de CBR .

El instituto nacional de vías en su Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito<sup>23</sup> presenta la Ecuación 29 en la cual establece una correlación entre el módulo de rigidez y el CBR para suelos con un valor de CBR ≤10%, este expresado en Lb/pulg<sup>2</sup>, sin embargo, en el caso del manual BPA para el material de mejoramiento se disponer del módulo de rigidez por lo tanto en la Ecuación 30 se despeja el CBR de la correlación presentada por el INVIAS.

$$M_r = 2555 \times (\text{CBR})^{0.64} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

$M_r$ : Valor del Módulo de rigidez, en libras por pulgada cuadrada (Lb/pulg<sup>2</sup>)

$\text{CBR}$ : En porcentaje

$$\text{CBR} = \sqrt[0.64]{\frac{M_r}{2555}} \quad \text{Ecuación 30}$$

Por tanto en el CBR del material de mejoramiento propuesto por el manual de la BPA queda expresado en la Ecuación 31, esto permite realizar la comparación con los materiales que dispone las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013.

<sup>23</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. Colombia. 2007. p. 70

$$CBR = \sqrt[0.64]{\frac{7251.89}{2555}} = 5.1\%$$

Ecuación 31

El material que el manual de la BPA especifica como capa de mejoramiento debe ser un material con un CBR de 5.1%, en las especificaciones INVIAS-2013 el material granular que menos especificaciones de resistencia tiene es el afirmado este material esta normalizado en el artículo 311, sin embargo este tiene como resistencia mínima una valor de CBR 15% por tanto este material es más competente del requerido por la guía BPA, sin embargo, un material de afirmado puede ser utilizado como capa de mejoramiento y por tanto es factible su elaboración bajo las especificaciones generales de carreteras INVIAS-2013.

En lo concerniente a las capas de subbase el manual de la British Ports Association define que la capa de subbase para mejoramiento de la subrasante debe tener un CBR mayor o igual a 80%, es te orden de ideas los materiales competentes según las especificaciones INVIAS-2013 en su capítulo 3, son los materiales tipo base clase B y C los cuales dentro de sus requerimientos generales tiene que el CBR de este tipo de materiales debe ser mayor o igual a 80%, es por esto el material tipo subbase para la BPA es probable de elaborar bajo las especificaciones INVIAS-2013.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto la tabla de valores de subbase sin compactar y espesores de recubrimiento para varios valores de CBR de la subrasante expuesta en el numeral 3.1.5 puede ser usada para el diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales, en la Tabla 32 se presentan los espesores para cada uno de valores de CBR que requieren capas de mejoramiento especificando las normas y materiales a utilizar según normas INVIAS-2013.

Tabla 32. Subbase sin compactar y espesores de recubrimiento para varios valores de CBR de la subrasante aplicadas a Colombia.

CBR de la subrasante	Espesor del recubrimiento (mm)	Norma INVIAS	Espesor de la subbase (mm)	Norma INVIAS
1%	900	Capítulo 3 Art. 311 INVIAS- 2013	150	Capítulo 3 Art. 330 INVIAS- 2013 Base
2%	600		150	
3%	400		150	
4%	250		150	

<b>CBR de la subrasante</b>	<b>Espesor del recubrimiento (mm)</b>	<b>Norma INVIAS</b>	<b>Espesor de la subbase (mm)</b>	<b>Norma INVIAS</b>
>5%	No requiere		150	granular Tipo B y C

Fuente: Elaboración propia a partir de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2013 y KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 52.

## **5 PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROCESO DE DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE LA BRITISH PORTS ASSOCIATION (BPA), ESCOGIDA PARA LA IMPLEMENTACIÓN EN COLOMBIA**

La metodología de la British Ports Association (BPA) la cual fue escogida para la implementación en Colombia, en el capítulo 4 fue analizada y evaluadas las características de las mezclas de materiales que se pueden usar en el ámbito colombiano para la implementación, la metodología fue escogida por las diferentes bondades que presenta inicialmente una característica importante que presenta la BPA es el hecho de poder lograr diseños de pavimentos con 3 diferentes tipos de capas de rodadura, en concreto hidráulico, asfáltico y con adoquines de concreto hidráulico.

En segunda medida los diseños que se pueden realizar bajo las premisas de la BPA presentan todo el paquete estructural del pavimento mientras que las otras dos metodologías evaluadas se limitan al cálculo de la losa del concreto hidráulico como capa de rodadura, a su vez los materiales en los cuales se basa la metodología se identificó que pueden ser preparados bajo las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013 lo que hace viable que la metodología pueda ser implantada en Colombia.

Otra de las bondades que presenta la metodología es que se presentan criterios técnicos para el diseño de sobrecarpetas o rehabilitaciones de pavimentos que han cumplido o están próximas a cumplir su vida útil lo cual genera que la metodología escogida condense aspectos técnicos para diseños de pavimentos industriales nuevos y de reforzamiento. por este motivo a continuación se presenta un planteamiento general del proceso de diseño de los pavimentos para puertos y áreas industriales basados en la BPA y en los análisis realizados con los materiales colombianos.

El proceso de diseño que presenta la metodología BPA se divide en 4 procedimientos dependientes de las condiciones iniciales o premisas de diseño del proyecto en particular.

- Diseño de fundaciones.
- Diseño de pavimentos por cargas estáticas.
- Diseño de pavimentos por cargas dinámicas.
- Diseño de rehabilitación o sobrecapas.

## 5.1 DISEÑO DE FUNDACIONES.

El diseño de las fundaciones se divide en tres etapas para llegar al diseño definitivo de la cimentación sobre la cual se va a soportar el pavimento para puertos y áreas industriales, la fundación diseñada se compone de dos capas, la primera al recubrimiento de la subrasante y la segunda corresponde a una subbase.

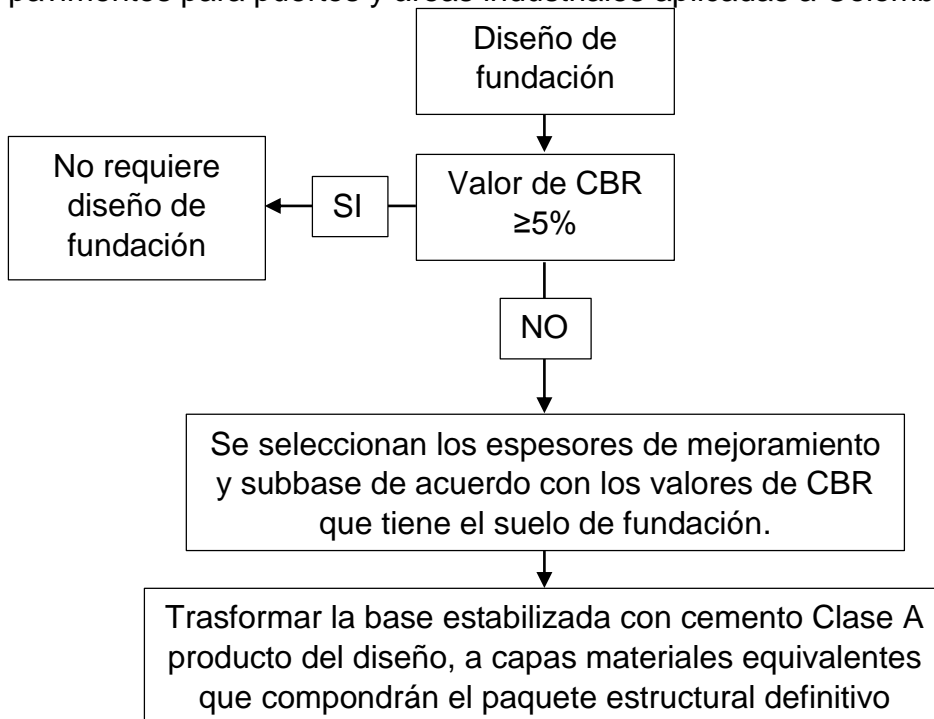
a) Establecer el valor del CBR que se va a usar en los diseños, si este es inferior al 5% se procede a continuar con el cálculo del espesor de capa de fundación que se requiere, en caso contrario el diseño del pavimento no requiere mejoramiento del suelo de soporte.

b) Teniendo como base el CBR del suelo se ingresa en la Tabla 32 y se selecciona de acuerdo al CBR el espesor de la capa de recubrimiento y de subbase, en las cuales los espesores seleccionados pueden ser usados con nomas colombianas como lo especifica las tabla mencionada

c) Con los espesores definidos de capa de recubrimiento y subbase se procede a realizar la conversión de materiales a unos que se adecuen a las necesidades y disponibilidades del proyecto, esta transformación se realiza teniendo como base con los factores de equivalencia de materiales aplicables según las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013 contenidos en la Tabla 31.

Para una mejor interpretación del procedimiento de diseño de fundaciones de los pavimentos para puertos y áreas industriales en la Figura 51 se presenta el diagrama de flujo que resume el mecanismo que debe ser usado para el diseño mejoramientos.

Figura 51 Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de fundaciones para pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia.



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 51-53.

## 5.2 DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES APLICANDO CARGAS ESTÁTICAS.

El procedimiento para el dimensionamiento de un pavimento para puertos y áreas industriales consta de 5 etapas en las cuales se definen los espesores de las capas que hacen parte de paquete estructural.

a) Se establecen las características de los contenedores y las disposiciones que van a tener dentro de la zona de almacenamiento, las características requeridas son:

- Capacidad de los contenedores la cual está estandarizada en 40 pies con un peso vacío de 3800 kg y de 20 pies el cual tiene un peso vacío de 2500 kg.
- Altura de apilamiento de los contenedores la cual puede ser hasta de 8 contenedores completamente cargados sin embargo esta condición es muy poco probable que suceda por tanto se considera un factor de reducción por peso.



- Disposición del apilamiento de los contenedores esta puede ser individual, en fila o en bloques las cuales tienen disposiciones de carga diferente.

En caso que a la zona se le impongan cargas diferentes a las de los contenedores se debe optar por realizar un análisis de las cargas específicas que se van a almacenar, teniendo en cuenta las condiciones críticas que se puedan presentar.

b) Con las características de los contenedores se ingresa a la Tabla 9 y se calcula la carga que los contenedores aplican al pavimento, como es poco probable que todos los contenedores estén llenos a su máxima capacidad la misma Tabla 9 dispone de una porcentajes de reducción del peso bruto dependiendo de la altura de apilamiento de los contenedores, debido a que los contenedores están estandarizados a nivel mundial en sus dimensiones y peso no requiere modificaciones el cálculo de la carga ejercida sobre el pavimento para las condiciones colombianas.

En los casos en que las cargas sean diferentes a los contenedores, y dado que en el numeral anterior se debe realizar un análisis de cargas específicas estas cargas se deben utilizar directamente, esto debido a que estas no se van a ver afectadas por ningún factor de reducción de cargas

c) Con la carga calculada se ingresa a la carta de diseño de espesor de la base para contenedores presentada en la Figura 25 y se calcula el espesor del material de base tipo C/8/10 ingresando con la carga de los contenedores en el eje Y con la carga de los contenedores calculada previamente, se avanza horizontalmente y se corta con la curva de la carta de diseño, posteriormente se desplaza verticalmente hasta intersectar el eje de la X en donde se establece espesor de diseño en milímetros, en este aspecto se debe tener en cuenta el análisis realizado en el numeral 4.1 en el cual el material tipo C8/10 corresponde a una base estabilizada con cemento tipo Clase A con nivel de resistencia 5.2 de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013.

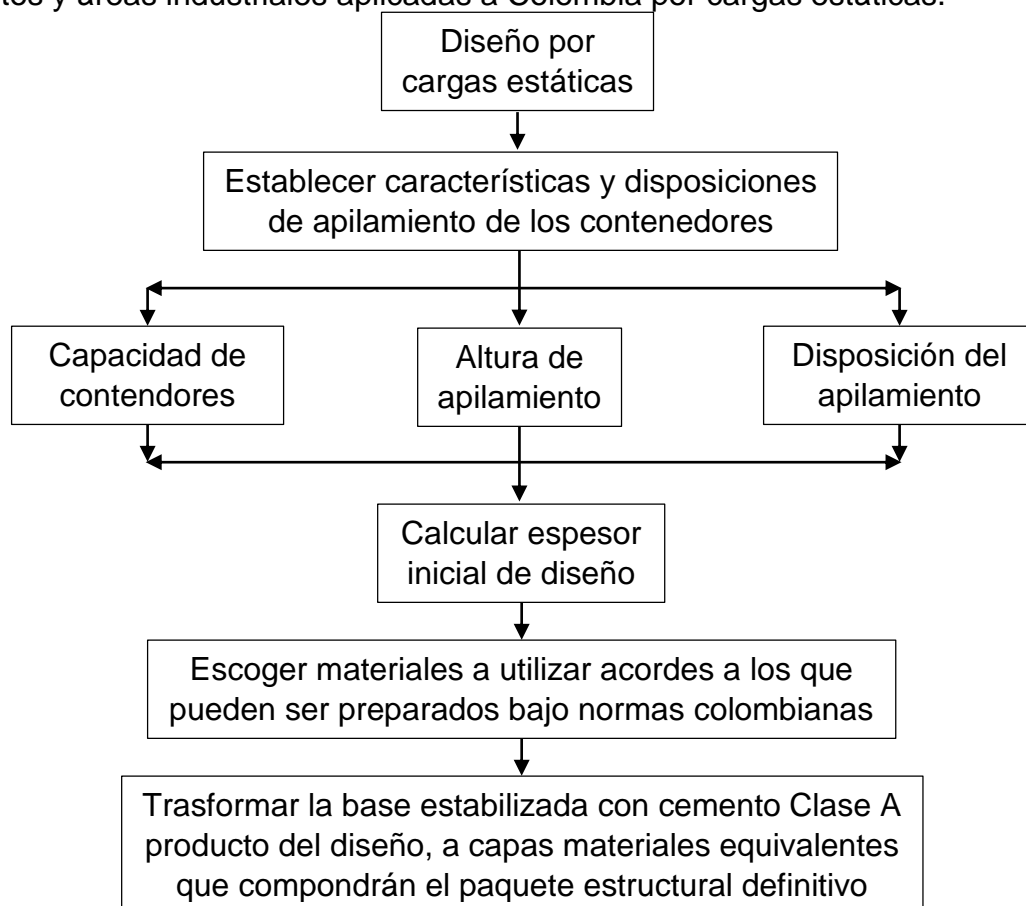
d) Para la determinación de los espesores de los materiales que van a componer el paquete estructural del pavimento, primero se deben establecer las características de los materiales de acuerdo a los que se tienen disponibles conforme con la Tabla 31, de esta se deben elegir, la capa de rodadura que se van a emplear y los espesores tentativos de cada material, los cuales deben ser corroborados y/o ajustados en la etapa de conversión de materiales.

e) Con el espesor de la base estabilizada con cemento Clase A (C8/10), las características de los materiales y los espesores tentativos a utilizar en el pavimento se procede a convertir el espesor de cada capa a material de base estabilizada con cemento Clase A y este valor restarlo del total de la base, este procedimiento consiste en establecer en factor de equivalencia del material a convertir de la Tabla

31 y multiplicarlo por el espesor tentativo que se estableció. Este procedimiento se realiza con todos los materiales hasta lograr una equivalencia entre los espesores transformados y el espesor de material base estabilizada con cemento Clase A calculado en la carta de diseño.

Del procedimiento de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicada a Colombia para cargas estáticas en la Figura 52 se presenta el diagrama de flujo que facilita la comprensión del método de diseño.

Figura 52. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia por cargas estáticas.



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 51-53.

### **5.3 DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES APLICANDO CARGAS DINÁMICAS.**

Esta metodología de diseño dispone de 11 etapas con las cuales se dimensiona la estructura del pavimento teniendo en cuenta las cargas dinámicas que se le aplican a la estructura junto los factores de cargas dinámicas que pueden interferir en el diseño del paquete estructural.

a) En el dimensionamiento de la estructura del pavimento se tienen cinco diferentes tipos de equipos: apilador de alcance o cargador frontal, grúa pórtico, cargador lateral, tractor y remolque, grúa pórtico de ruedas de goma (RTG), de los cuales se debe establecer en primera medida cual es el equipo de manejo de mercancía que se va a usar en el diseño.

b) Teniendo definido el equipo de manejo de mercancías a usar se procede al cálculo de carga por rueda del equipo vacío, que consiste en dividir el peso total del equipo sin carga en el número de ruedas que lo componen.

c) Seguidamente se procede al cálculo de la carga crítica, en lo referente a esta carga el Dr. Knapton establece que cuando los contenedores que se manipulan comprenden el 100% de contenedores de 40 pies, la carga crítica es 22,000 kg y cuando se manipulan contenedores de 20 pies, la carga crítica es de 20,000 kg y que en general, las mezclas de contenedores de 40 y 20 pies tienen una carga crítica de 21,000 kg. En el caso de las áreas industriales la carga crítica debe ser equivalente a la carga máxima que puede manipular el equipo de diseño.

Sin embargo en caso que se tengan diferentes porcentajes de distribución de manipulación de contenedores, mediante la Tabla 7 se puede calcular el peso del contenedor crítico, a esta tabla se ingresa estableciendo en la primera fila el porcentaje de contenedores de 20 y 40 pies que se van a mover en el sector del diseño, con este valor se establece el peso del contenedor crítico.

Para la aplicación en el ámbito colombiano, en caso que se tengan datos conocidos de los pesos de los contenedores en el puerto o área industrial a diseñar el pavimento se debe optar por la utilización de estos, calculando el factor de daño como lo establece la Ecuación 1, sin embargo, si no se dispone de datos de referencia se puede utilizar la Tabla 7 que esta calibrada con los pesos típicos de los contenedores.

d) La carga calculada del contenedor crítico se divide por el número de ruedas que contiene del equipo de diseño, a este resultado se le suma la carga de rueda del equipo vacío calculada previamente en el numeral b y el producto de estas será la carga por rueda estática del equipo de diseño.

e) Posteriormente se procede con el cálculo de la profundidad específica a la que actúa la carga mediante la Ecuación 4 expresada en milímetros, con el resultado de la profundidad específica se ingresa en la primera fila de la Tabla 10, seguidamente se ingresa a la primera columna con la distancia medida entre las ruedas del eje, de la intersección de estas dos medidas se establece el factor de proximidad por rueda, en caso que alguna de estas dos medidas no se acoplen exactamente a la tabla se procederá a realizar una interpolación. Finalmente, el factor calculado debe multiplicarse por la carga por rueda estática calculado en el numeral d y este resultado será la carga total de una rueda.

f) A continuación se procede a identificar los factores dinámicos establecidos en la Tabla 8, la BPA establece 4 tipos de factores dinámicos: Frenado, giros, aceleración, y superficie irregular. Estos factores establecen porcentajes para el aumento de la carga por rueda dependiendo del equipo usado y se puede tener uno o varios factores presentes en un diseño de un pavimento, en el caso que se tenga más de un factor presente en el diseño se procede a sumarlos.

g) Con los factores establecidos se calcula las cargas por rueda teniendo como premisa que el eje en donde se aplica la carga del contenedor o la mercancía aumenta con los factores calculados y el eje contrario disminuirá con la misma equivalencia que determinen los factores dinámicos. En caso de que el equipo contenga más de dos ejes estos deben ajustarse de manera similar, pero usando un factor inferior el cual se determina considerando las distancias desde la línea central del equipo.

La rueda con más carga en esta etapa es establecida para el diseño como la carga de rueda equivalente única (SEWL por sus siglas en inglés) y esta será usada en la carta de diseño.

h) Posteriormente se procede a expresar las cargas que pasaran por un punto en número equivalente de pasadas del equipo (SEWL), que consiste en establecer el porcentaje de cada rueda con respecto a la más cargada y la suma de estos es equivalente a carga que impone el equipo cada vez que pasa por un punto. Este porcentaje se multiplica por el número de repeticiones para las cuales se está diseñando el pavimento, este resultado se considera la vida útil que tendrá el pavimento en su etapa de diseño.

i) Con la carga de rueda equivalente única y el número de repeticiones de carga se procede a ingresar a la carta de diseño para el espesor de la base para equipos de manipulación de mercancías que se presenta en la Figura 26 y se calcula el espesor de base estabilizada con cemento Clase A. En el caso de que el número de repeticiones no esté en las curvas de la carta de diseño se debe interpolar entre las dos más cercanas.

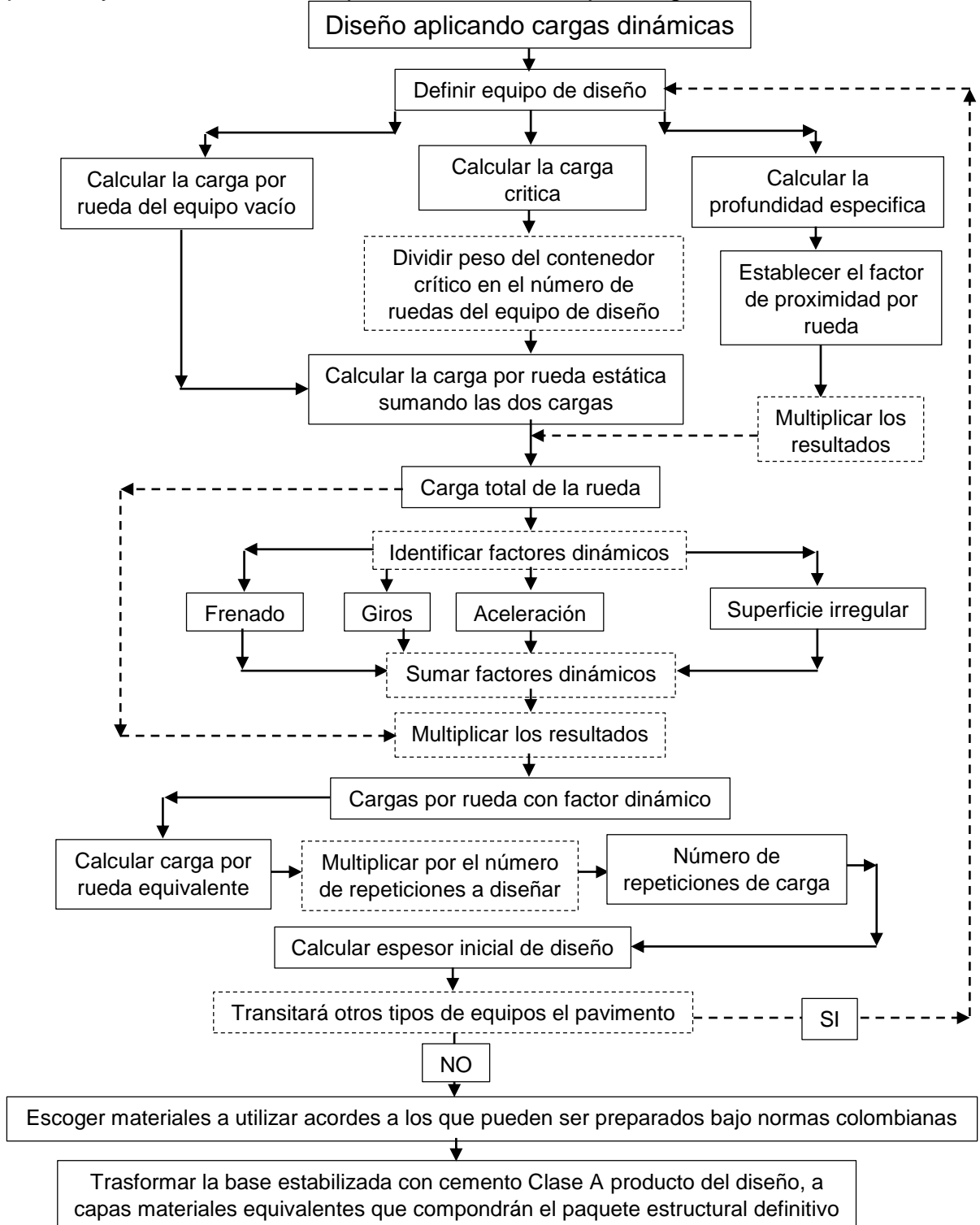
En el caso que el diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales requiera la movilización de mercancías por más de una tipología de equipo, se debe realizar el proceso descrito para diseño de pavimentos para cargas dinámicas hasta la etapa de deducción del espesor de base estabilizada con cemento Clase A (C8/10), con el caculo realizado de todos los equipos que van a imponer cargas sobre el pavimento diseñado y con los espesores que arrojaron los respectivos diseños se debe optar por el que contenga un mayor espesor.

j) Una vez se tiene el espesor final de la base estabilizada con cemento Clase A, siendo siempre el mayor espesor calculado de los diferentes equipos, esto si el patio diseñado será transitado por más de un equipo, o en su defecto por el único equipo de diseño, seguido a la definición del espesor de la base estabilizada con cemento se procede a establecer que materiales se van a utilizar dentro del paquete estructural del pavimento y los espesores tentativos de cada uno.

k) Determinado el espesor de la base estabilizada con cemento Clase A (C8/10) de la carta de diseño y contando con las características de los materiales y su espesores tentativos se procede a convertir el espesor total de base a los diferentes espesores de los materiales propuestos mediante los factores de equivalencia de materiales, este proceso consiste en establecer el factor de equivalencia de cada material a partir de la Tabla 31 y el espesor resultante de base estabilizada con cemento Clase A, producto de multiplicar el espesor tentativo del material por el factor de equivalencia, este valor resultante se de restar del total de la base. Este procedimiento se realiza con todos los materiales hasta lograr una semejanza entre los espesores trasformados y el espesor total de base estabilizada con cemento Clase A calculada en la carta de diseño.

Como síntesis del procedimiento de diseño en la Figura 53 se presenta el diagramara de flujo que condensa las diferentes etapas que se deben seguir para el diseño de un pavimento para puertos y áreas industriales con cargas dinámicas y bajo las condiciones colombianas.

Figura 53. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia por cargas dinámicas.



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 8-53.

#### **5.4 DISEÑO DE REHABILITACIÓN O SOBRECAPAS PARA PAVIMENTOS INDUSTRIALES APLICADOS A COLOMBIA.**

El diseño de la rehabilitación consiste en establecer la capacidad resultante de la estructura que se encuentra construida y se quiere reforzar y esta convertirla a material de base estabilizada con cemento Clase A (C8/10), para posteriormente restársela a la estructura diseñada, el proceso general de diseño de una sobrecapa comprende 7 etapas que se describen a continuación:

a) Se debe establecer en primera medida la condición actual y las características de cada una de las capas que componen el pavimento, estas características deben proceder de una auscultación acompañada del respectivo estudio geotécnico de la estructura del pavimento en donde se deben definir claramente los espesores de cada una de las capas que componen el paquete estructural del pavimento por medio de la toma de núcleos, que como máximo deben realizarse una por cada 500 m<sup>2</sup>.

De la auscultación del pavimento deben registrarse todos los deterioros presentes en el pavimento y diferenciarlos si la condición es cambiante en las diferentes zonas esto debido a que los diseños de sobrecapa pueden diferenciarse en los diferentes sectores y de esta manera disminuir costos de intervención.

b) Teniendo como entrada los datos del pavimento existente se procede a establecer el factor de equivalencia del material mediante de cada una de las capas que componen el pavimento por medio de la Tabla 31, seguidamente se establece el factor de condición por grietas y astillamientos (CF1) los cuales están dispuestos en la Tabla 13, igualmente se establece el factor de condición por ahuellamiento y asentamiento que se determina de la Tabla 14.

c) Con los espesores expresados en milímetros y los factores de equivalencia de materiales deducidos en el numeral b se procede a dividir los espesores por el factor de equivalencia de materiales que le corresponde de cada uno de los materiales, de esta operación obtiene el espesor de cada una de las capas que componen el pavimento en su equivalencia a material de base estabilizado con cemento Clase A (C8/10).

d) Con los espesores de cada una de las capas calculadas de material de base estabilizada con cemento Clase A (C8/10), se procede a multiplicar cada uno de los espesores por el factor de condición por grietas y astillamientos, y al producto de esta operación nuevamente se le multiplica por el factor de condición de ahuellamiento y asentamientos

La suma de todos los espesores calculados y afectados por los dos tipos de factores de condición, la cual será el espesor equivalente del pavimento el cual es refleja la vida útil que tiene el pavimento que se está analizando, el presente numeral para efectos de facilidad de cálculos se puede condensar en una tabla que a manera de ejemplo se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33. Ejemplo de organización de cálculos del espesor equivalente de pavimento para diseño de sobrecapas.

Tipo capa	Espesor de la capa (mm)	Factor de conversión del material (Tabla 31)	CF1	CF2	Espesor Equivalente Efectivo de Clase A (mm)
<b>TOTAL</b>					

Fuente: KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 73.

e) Seguido del procedimiento anterior se debe realizar el diseño del pavimento para puertos o áreas industriales por cargas estáticas o dinámicas según se requiera de acuerdo a lo establecido en la sección 5.2 o 5.3, este diseño se debe llevar hasta la etapa del cálculo del espesor de la base estabilizada con cemento Clase A (C8/10) el cual se logra luego del ingreso y respectivo cálculo del espesor en las cartas de diseño de la Figura 25 o Figura 26 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** dependiendo de cuál sea el caso de diseño.

f) Al espesor de material de base estabilizada con cemento Clase A (C8/10) calculado de acuerdo lo establecido en el anterior numeral se le resta el espesor equivalente del pavimento existente calculado en los numerales c y d, el resultado de esa operación corresponde al espesor de a capa de refuerzo requerido o sobrecapa de pavimento.

g) Finalmente, para la determinación del espesor o espesores de los materiales que van a componer reforzamiento o la sobrecapa del pavimento, en primera medida se deben establecer las características de los materiales de acuerdo a los que se tienen disponibles en la Tabla 31, de esta se deben elegir los materiales que se quieren utilizar en el reforzamiento, los cuales deben ser corroborados y/o ajustados en la etapa de conversión de materiales.

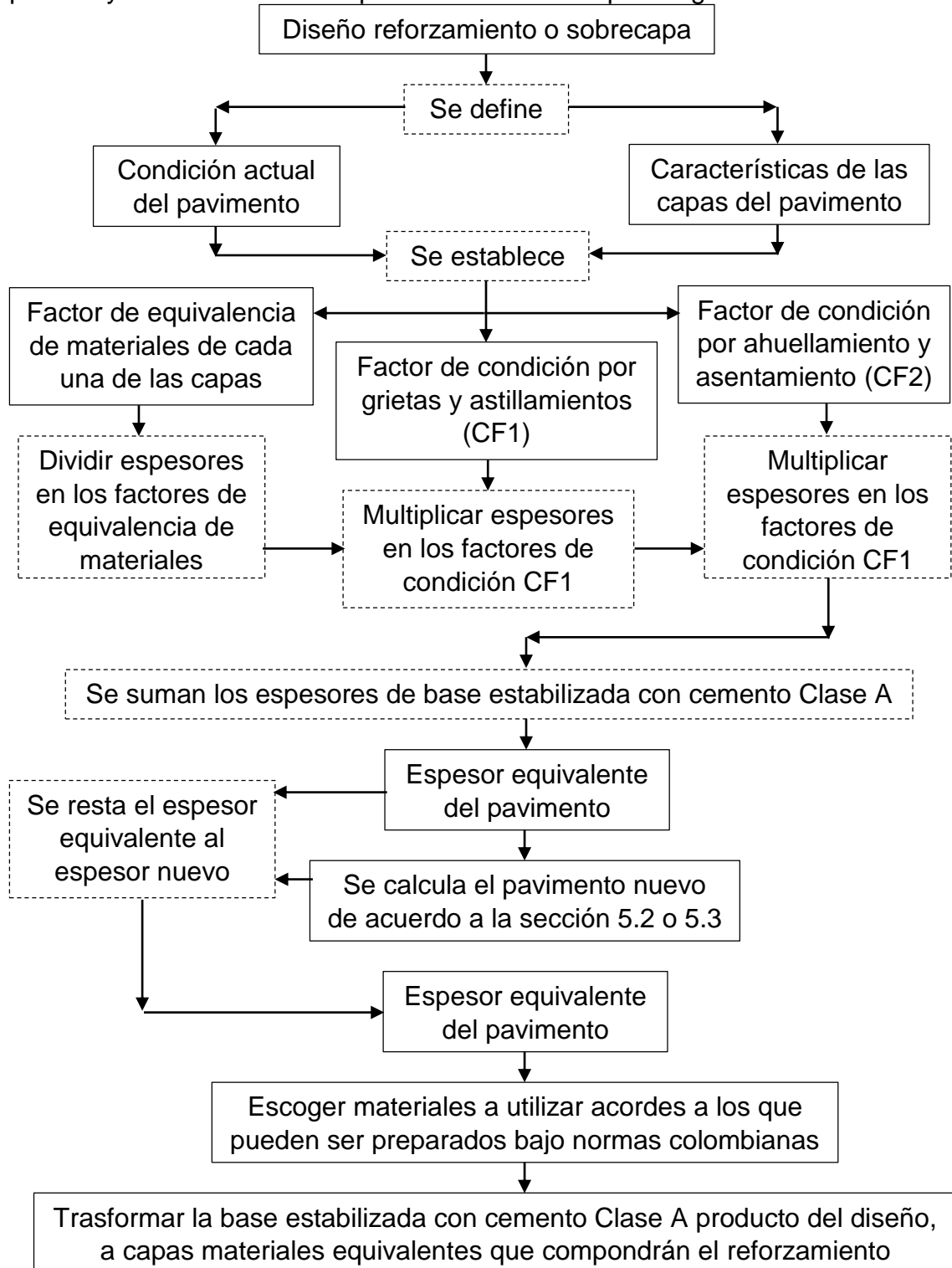
h) Con el espesor de la base estabilizada con cemento Clase A (C8/10), las características de los materiales y los espesores tentativos a utilizar en el pavimento se procede a convertir el espesor de cada capa a material de base estabilizada con cemento Clase A y este valor restarlo del total de la base calculada para el reforzamiento, este procedimiento consiste en establecer en factor de equivalencia



del material a convertir de la Tabla 31 y multiplicarlo por el espesor tentativo que se estableció. Este procedimiento se realiza con todos los materiales que se pretenden usar hasta lograr una equivalencia entre los espesores transformados y el espesor de material base estabilizada con cemento Clase A establecido en el numeral f.

Mediante un diagrama de flujo representado en la Figura 54 se resume el procedimiento de diseño de un reforzamiento o sobrecapa para un pavimento para puertos o áreas industriales aplicable a Colombia.

Figura 54. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de pavimentos para puertos y áreas industriales aplicadas a Colombia por cargas dinámicas.



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 67-82.

## 6 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE PUERTOS Y ÁREAS INDUSTRIALES EN PROYECTOS COLOMBIANOS.

Dentro del marco del desarrollo de la guía de diseño para puertos y áreas industriales se establecen desarrollar implementaciones de la técnica de diseño establecida, por este motivo se presentó la metodología a diferentes entidades con el fin la obtención de una aceptación para la realización de dichas implementaciones, la zona franca de Tocancipá y el puerto de Aguadulce en el municipio de Buenaventura nos facilitaron la información pertinente para realizar implementaciones a nivel de diseño de la metodología plateada.

### 6.1 DISEÑO DE PAVIMENTO PARA LAS ÁREAS INDUSTRIALES DEL LOTE 72 DE LA FASE V DE LA ZONA FRANCA DE TOCANCIPÁ.

Proyecto Zona Franca está localizado Sobre la vía Briceño – Zipaquirá, que se conecta con la doble calzada Bogotá – Tunja – Sogamoso en el municipio de Tocancipá Cundinamarca Vereda Tibio predio Bellavista. El proyecto consta de 5 fases de construcción con una división de 92 lotes los cuales consta de un área bruta de 285.708 m<sup>2</sup> para desarrollo industrial como se muestras en la Figura 55,

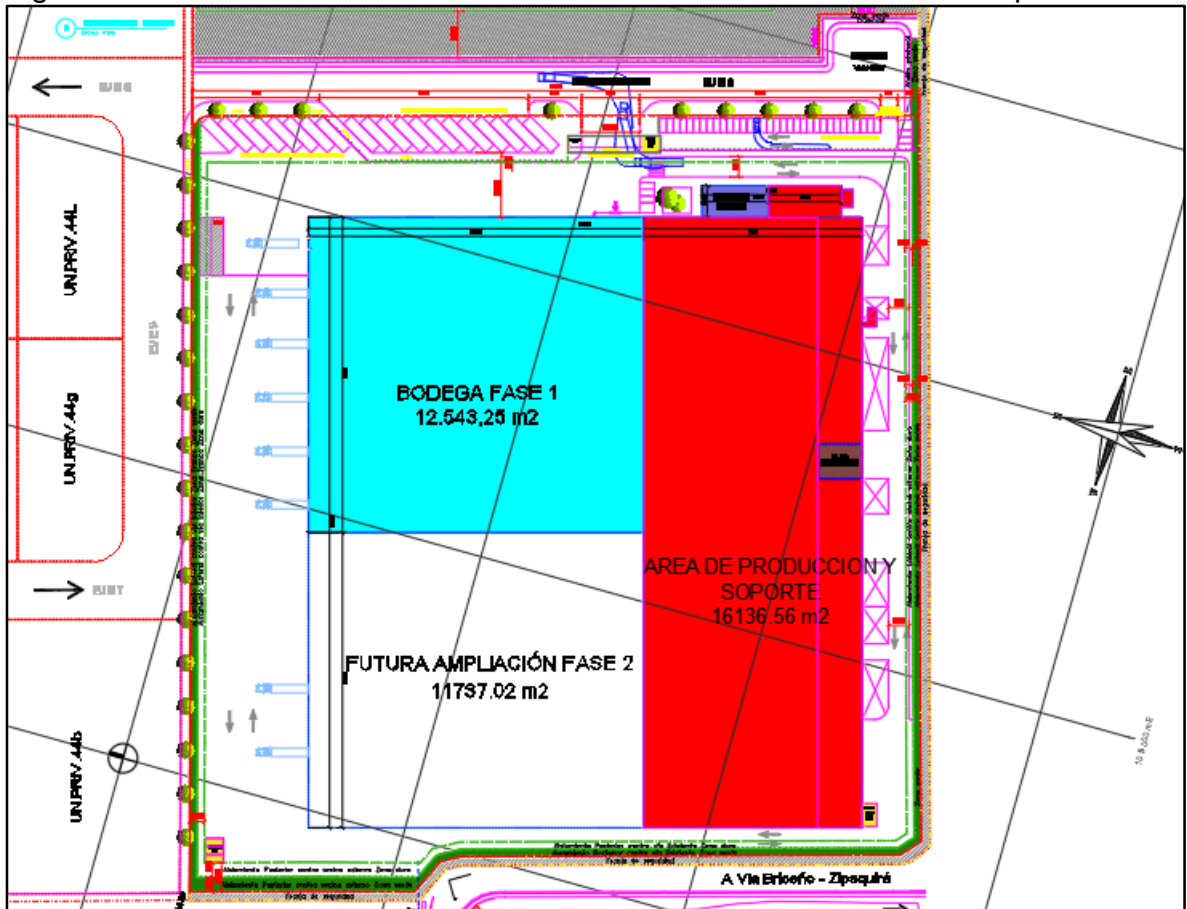
Figura 55. Ubicación Zona Franca de Tocancipá.



Fuente: [www.zonafrancatocancipa.com](http://www.zonafrancatocancipa.com) consultada el 21 de septiembre de 2019

El proyecto a diseñar está ubicado en el lote 72 de la Zona Franca de Tocancipá, el cual hace parte de la fase V de construcción, dentro de este proyecto se busca el diseño del pavimento industrial de dos zonas, un área destinada a la producción con equipos pesados y la segunda área es una bodega destinada al almacenaje de productos, en la Figura 56 se muestra la distribución de las zonas del proyecto y a su vez las zonas que requieren diseño del pavimento industrial.

Figura 56. Sectores a diseñar del lote 72 de la Zona Franca de Tocancipá



Fuente: Proyecto de desarrollo del lote 72 de la Zona Franca de Tocancipá entregada por el consultor ARPRO Arquitectos Ingenieros S.A.

**6.1.1 Diseño de pavimento industrial de la bodega por medio de la metodología de diseño de pavimentos y áreas industriales propuesta.** Como se estableció en anteriormente se requieren dos tipos de diseños, el primero para la zona de bodega y el segundo para la zona de producción con una vida útil de 20 años, en primera medida es importante señalar que el estudio de suelos determino para la zona de bodega que la capacidad de soporte de la subrasante expresada

en términos de CBR es igual a 2,5%, dada esta condición de la subrasante se inicia con el diseño del mejoramiento de la subrasante.

a) Teniendo como base el estudio de suelos el cual arroja que el CBR del suelo es de 2.5%, se ingresa a la Tabla 32 en donde el proceso de interpolación se obtuvo que para la fundación del pavimento se requiere de dos capas, una capa 500 mm de afirmado de acuerdo con el artículo 311 INVIAS-2013 y una capa de base de 150 mm de Base granular Tipo B la cual debe cumplir con lo especificado en el artículo 330 de las especificaciones INVIAS-2013. Es preciso indicar que esta estructura de cimentación se sumará a la que arroja el diseño de pavimento final producto del desarrollo de la metodología de diseño de pavimentos industriales por cargas dinámicas

Posteriormente se procede al diseño de la capa de base estabilizada con cemento de Clase A, para este se realiza el diseño para cada uno de los equipos de diseño que se tienen contemplados para operar sobre el pavimento, una vez realizado este proceso se decantará por el mayor espesor resultante de cada uno de los diseños, este procedimiento se realiza por separado para cada una de las áreas que componen el proyecto.

6.1.1.1 Diseño de pavimento industrial en zona de bodega: En el presente diseño se siguen las fases de diseño propuestas en el capítulo 5.

a) Equipo de manejo de mercancías: de acuerdo con el proyecto en la zona de bodegaje se requiere el uso de dos equipos para el movimiento de mercancías para la operación del patio de bodegas, los equipos que se van usar son montacargas con capacidad de 8 y 20 toneladas, los cuales tienen las características presentadas en la Tabla 34.

Tabla 34. Características de los equipos de diseño de la zona de bodega del proyecto.

Equipo	Capacidad de carga	Peso total del equipo	Numero de ruedas del equipo	Distancia entre ruedas
Hyster H190HD	8000 kg	12968 kg	6 Und	2438 mm
Hyster H450HD	20000 kg	27660 kg	6 Und	2940 mm

Fuente: Elaboración propia a partir de los equipos de diseño.

b) Cálculo de carga por rueda del equipo vacío. En primera medida se va calcular la carga por rueda de montacargas de 8 ton, este equipo tiene un peso total sin carga de 12968 kg, a su vez está compuesto por dos ejes, el trasero que a su vez es el direccional que consta de dos ruedas en los extremos del eje, y el eje delantero que funciona como eje de carga, compuesto por 4 llantas 2 en cada extremo del eje

Procediendo con el cálculo de la carga por rueda del equipo vacío se tiene que se debe dividir el peso total del equipo por el número total de ruedas que componen el montacargas de la siguiente manera:

$$Carga\ por\ rueda\ del\ equipo\ vacío = \frac{12968\ kg}{6} = 2161.33\ kg$$

c) Se calcula la carga crítica, teniendo en cuenta que el diseño es de una zona industrial la cual no está destinada al almacenamiento de contenedores se toma como carga crítica los 8000 kg que puede manipular el equipo de diseño.

d) Posteriormente se procede con el cálculo de carga por rueda estática del equipo de diseño que consiste en sumar la carga por rueda del equipo vacío dividida en el número de ruedas más sobre carga crítica del equipo.

$$Carga\ por\ rueda\ estática = \frac{2161.33Kg}{6} + 8000 = 8360.22\ kg = 81.99\ kN$$

e) Se calculó de la profundidad efectiva de la carga mediante la Ecuación 4 de la siguiente manera:

$$Profundidad\ efectiva = 300 \times \sqrt[3]{\frac{35000}{5 \times 10}} = 2663.71\ mm$$

Con la profundidad efectiva de la carga y la distancia entre ruedas en mm se procede al ingreso a la Tabla 10 en donde como no se tiene un valor expresado directamente en la tabla se procede con una interpolación para el cálculo del factor de proximidad por rueda el cual es de 1.02

Con el factor de proximidad por rueda y la carga por rueda estática se procede a multiplicar estos dos valores para determinar la carga total de una rueda.

$$Carga\ total\ de\ una\ rueda = 81.99 \times 1.02 = 83.27\ kN$$

f) El proyecto solicita incorporar para la zona de bodega de factores dinámicos por frenado, giros y aceleración, por lo tanto, se procede a definir los valores por

factores dinámicos de acuerdo a la Tabla 8, de este proceso se obtuvieron los porcentajes por factores dinámicos que se presentan en la Tabla 35

Tabla 35. Factores dinámicos requeridos para el diseño.

Condición	Tipo de equipo	Factor Dinámico fd
Frenado	Cargador frontal	±30%
Giros	Cargador frontal	±40%
Aceleración	Cargador frontal	±10%
Superficie irregular	Cargador frontal	0
$\Sigma$ Total		±80%

Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 38.

Se procede con el cálculo de carga por rueda con factores dinámicos en donde como el equipo solo tiene dos ejes, el eje delantero aumentará con el factor dinámico y el trasero disminuirá como se presenta en la Tabla 36.

Tabla 36. Calculo de carga por rueda con factores dinámicos

Ítem	Valor
Carga por rueda	83.27 KN
Factores Dinámicos	±80%
Carga por rueda eje delantero	149.89 KN
Carga por rueda eje trasero	66.62 KN

Fuente: Elaboración propia.

g) Como se puede evidenciar con el análisis anterior la carga de las ruedas más cargadas se encuentran en eje delantero por tanto se procede con el cálculo del porcentaje del eje trasero con respecto a la más cargada, por lo tanto, el eje trasero del equipo de diseño es equivalente al 44.4% de una rueda del eje delantero por tanto una pasada del equipo por un punto equivale a 1.44 pasadas de la rueda más cargada.

h) El proyecto en general espera que el equipo transite en el punto más cargado 390 veces por día y como ya se había anunciado anteriormente, el pavimento debe diseñarse para una vida útil de 20 años es por esto que el número de pasadas para el diseño del pavimento de la bodega es:

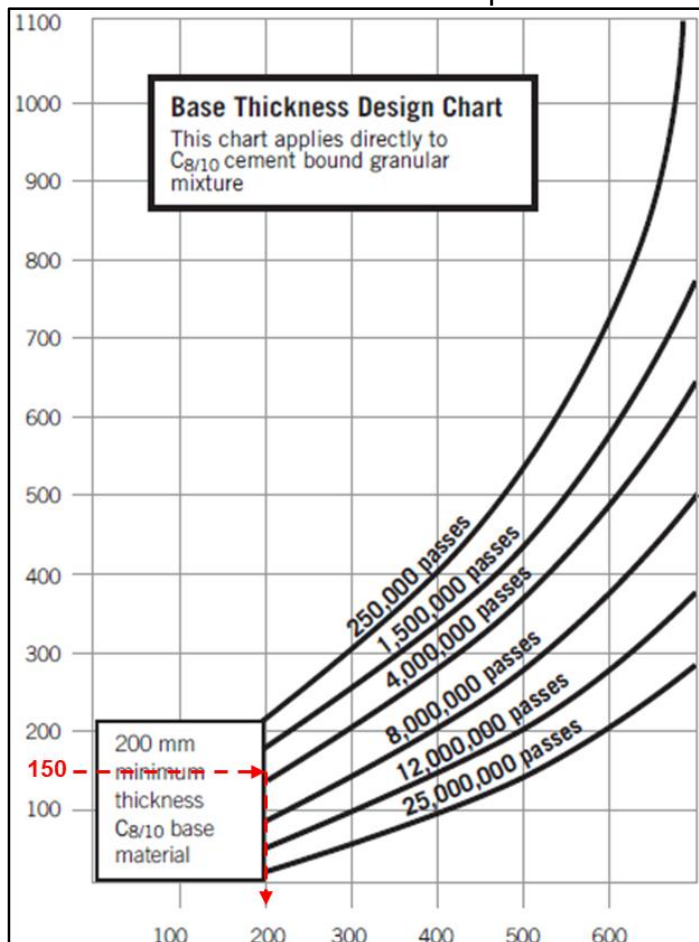
$$N^{\circ} \text{ de pasadas en el vida útil del diseño} = (390 \times 0.44) \times 365 \times 20 = 1.252.680$$

i) Con los análisis desarrollados en los numerales anteriores se tienen como valores de entrada para la carta de diseño:

- Carga por rueda: 149.89 KN
- Vida Útil: 1.252.680 pasadas de la carga por rueda

Con estos valores se procede al ingreso a la carta de diseño y se calcula el espesor de material Tipo C8/10 el cual como se analizó en el capítulo 4 es equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A, en la Figura 57 se muestra el cálculo del espesor de material de base estabilizada, el cual por tener una carga inferior a 200 KN es de 200 mm de base estabilizada con cemento.

Figura 57. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 10 Ton



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 84.



La metodología de diseño de pavimentos para puestos y áreas industriales establece que en caso de tener más de un equipo de diseño, el procedimiento de diseño hasta el cálculo del espesor de material de base estabilizada con cemento se debe realizar para todos los equipos y se debe tomar como el espesor de diseño el mayor valor calculado, es por esto que se procede al cálculo del espesor de diseño con un montacargas frontal de 20 toneladas y con las especificaciones consignadas en la Tabla 34. No obstante que el procedimiento de diseño para este montacargas es el mismo que ya se realizó para el equipo de 8 toneladas en la Tabla 37 se presenta el resumen de cálculos del diseño para el segundo equipo de diseño.

Tabla 37. Resumen de cálculos del diseño para montacargas de 20 toneladas.

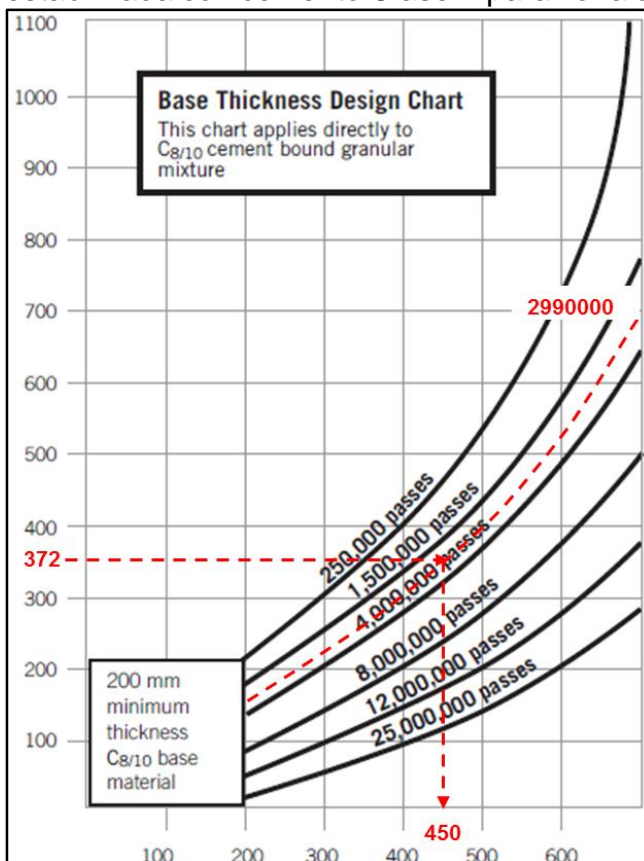
N°	Calculo	Valor
<b>Características del proyecto</b>		
1	CBR de la Subrasante	2.5%
2	Transito máximo	390 Pasadas
3	Vida útil del pavimento	20 Años
<b>a) Características del equipo</b>		
1	Peso total del equipo	27660 kg
2	Capacidad de carga	20000 kg
3	Numero de ruedas del equipo	6 Und
4	Distancia entre ruedas	2940 mm
<b>b) Carga del equipo vacío por rueda</b>		4610.00 kg
<b>c) Carga critica</b>		20000 kg
<b>d) Carga por rueda estática</b>		203.67 KN
<b>e) Profundidad efectiva de la carga</b>		2664 mm
1	Factor de proximidad por rueda	1.016
2	Carga total de una rueda	206.85 KN
<b>f) Factores dinámicos</b>		
1	Frenado	±30%
2	Giros	±40%
3	Aceleración	±10%
4	Superficie irregular	0
5	Factores dinámicos totales	80%
6	Carga por rueda eje delantero con factores dinámicos	372.32 KN
7	Carga por rueda eje trasero con factores dinámicos	165.48 KN

N°	Calculo	Valor
g)	Porcentaje del eje menos cargado	0.05
1	Carga por pasada del equipo	1.05
h)	N° de pasadas en el vida útil del diseño	2983051
i)	Espesor de Base estabilizada con Cemento Clase A (C8/10)	450 mm

Fuente: Elaboración propia.

De los datos calculados en la Tabla 37 se ingresa a la carta de diseño como lo muestra la Figura 58, calculando un espesor de base estabilizada con cemento Clase A de 450 mm, siguiendo con el desarrollo de la metodología de diseño se debe optar por el espesor más alto de los calculados, es por esto que para el diseño de la zona de bodega se tendrá un espesor total del pavimento de 450 mm, y con este se procederá a continuar con el proceso de diseño.

Figura 58. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 20 Ton



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 84.

j) Con el fin de evidenciar las bondades de la metodología se plantearán diseños con capa de rodadura en concreto hidráulico, concreto asfáltico y adoquines de concreto, en la Tabla 38. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos se presentan las características y espesores tentativos de los materiales que se plantean van a contener las estructuras del pavimento diseñadas, a su vez los factores de equivalencia de materiales que cada uno de los materiales propuestos tienen, para finalmente proponer los espesores de cada uno de los materiales que compondrá el paquete estructural del pavimento.

Tabla 38. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos

Material	Espesor a construir	Factor de Equivalencia de Materiales	Espesor de diseño
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Losa de concreto MR-3.8 MPa	300 mm	0.6	180 mm
Carpeta asfáltica MDC-25	150 mm	1	150 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	120 mm	1	120 mm
<b>Espesor final</b>	570 mm	<b>Total de diseño</b>	450 mm
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Carpeta asfáltica tipo MAM	280 mm	0.82	230 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	110 mm	1	110 mm
Base Granular BG-A	330 mm	3	110 mm
<b>Espesor final</b>	720 mm	<b>Total de diseño</b>	450 mm
<b>Adoquines en Concreto Hidráulico</b>			
Adoquines en concreto hidráulico	80 mm	1	80 mm
Base de arena	40 mm	0	0 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	300 mm	1	300 mm
Base Granular BG-A	210 mm	3	70 mm
<b>Espesor final</b>	630 mm	<b>Total de diseño</b>	450 mm

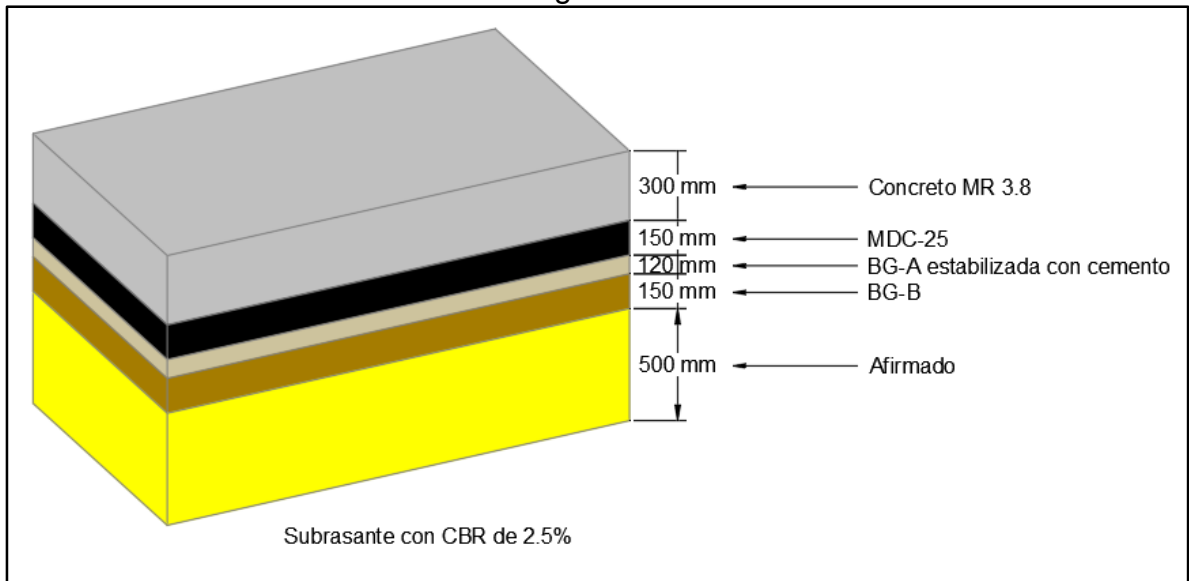
Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de las estructuras de pavimento definitivas se debe tener en cuenta que en el numeral 6.1.1 se calculó la cimentación del pavimento industrial, que está compuesta por una capa 150 mm de material de base clase B y una capa

de afirmado de 500 mm, las cuales se incorporan al paquete estructural diseñado para la zona de bodega.

En la Figura 59 se presenta se sección diseñada teniendo como capa de rodadura una losa de concreto hidráulico con un  $M_r$  3.8 MPa y un espesor total de la estructura 1220 mm, cada una de estas capas se trasformó a materiales que estén acordes a las especificaciones generales de contracción de carreteras INVIAS-2013.

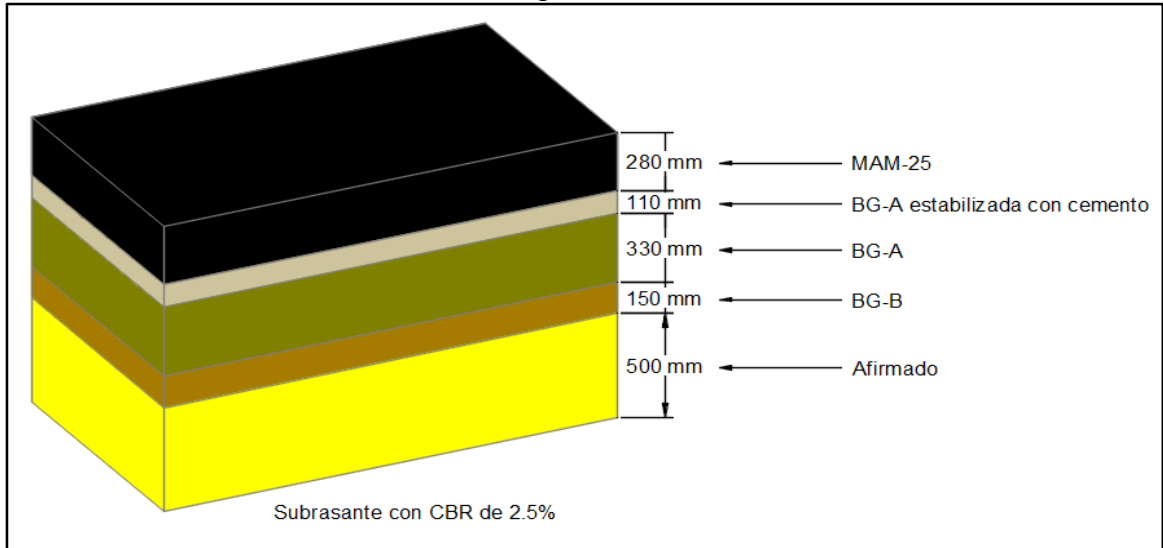
Figura 59. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto hidráulico en la zona de bodega.



Fuente: Elaboración propia.

En segunda medida en la Figura 60 se presenta la sección de diseño contempla 5 capas con un espesor total de 1370 mm, con una mezcla asfáltica de alto módulo MAM-25 las cuales están en concordancia con las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013.

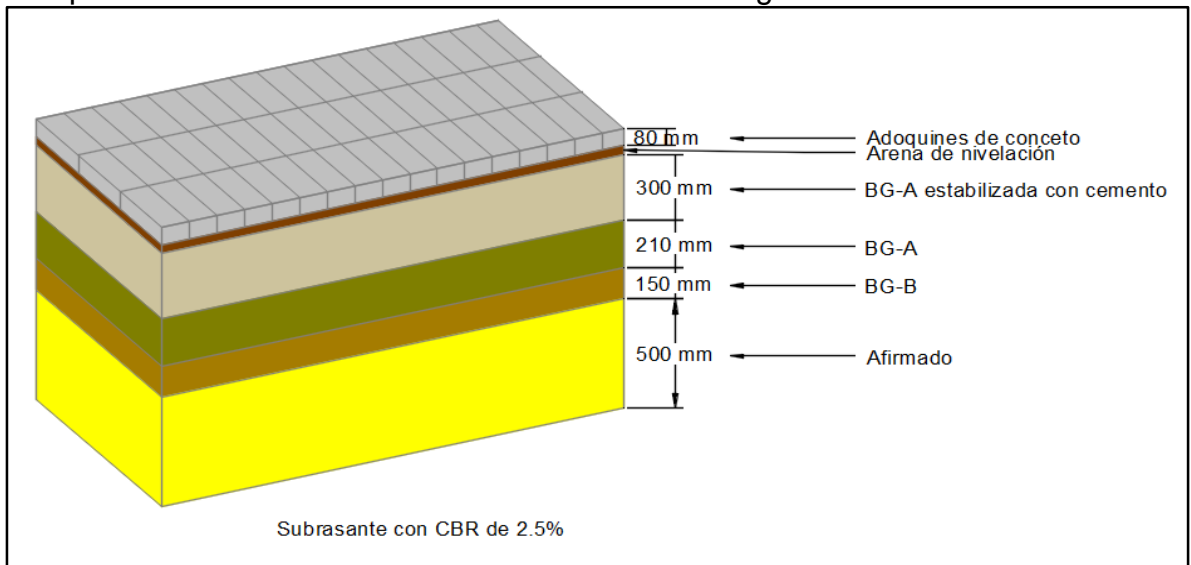
Figura 60. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de bodega.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, se puede optar por un diseño con capa de rodadura en adoquines de concreto de acuerdo con el artículo 510 de las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, es por esto que en la Figura 61 se presenta la propuesta de diseño con estas características.

Figura 61. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en adoquines de concreto hidráulico en la zona de bodega.



Fuente: Elaboración propia.

6.1.1.2 Diseño de pavimento industrial en zona de producción. Al igual que el diseño de la zona de bodega se debe obtener un diseño de pavimento con una vida útil de 20 años, con una capacidad de soporte de la subrasante según el estudio de suelos de 3.7%, el equipo de diseño que va a transitar por la zona de producción es un montacargas con capacidad de 15 toneladas, el tránsito de este equipo en las zonas más usadas se espera sea de 3200 pasadas diarias.

En primera medida debemos tener en cuenta que como la subrasante tiene una capacidad de soporte expresada en CBR inferior al 5%, es por esto que inicialmente se calculan los espesores de cimentación que requiere el pavimento de uso industrial. Para el cálculo y como se enuncia en la metodología propuesta se recurrió a la utilización de la Tabla 32, la cual indica que para una subrasante con CBR de 3.7% se debe mejorar el suelo de fundación con una capa de afirmado de acuerdo con el artículo 311 las especificaciones INVIAS-2013 de 300 mm y una capa de base de clase B de acuerdo con el artículo 330 de las especificaciones INVIAS-2013 de 150 mm

Para el diseño del pavimento industrial del sector del área de producción se realiza de acuerdo al capítulo 5, para este diseño se tiene en cuenta las cargas dinámicas que aporta el montacargas sobre el pavimento, es de resaltar que para esta zona se plantea solamente el uso de un equipo, este es un montacargas Caterpillar P33000 el cual se describe en la Tabla 39 junto con los cálculos del procedimiento de diseño del pavimento de acuerdo al procedimiento que se establece para cargas dinámicas.

Tabla 39. Resumen de cálculos del diseño para montacargas de 15 toneladas.

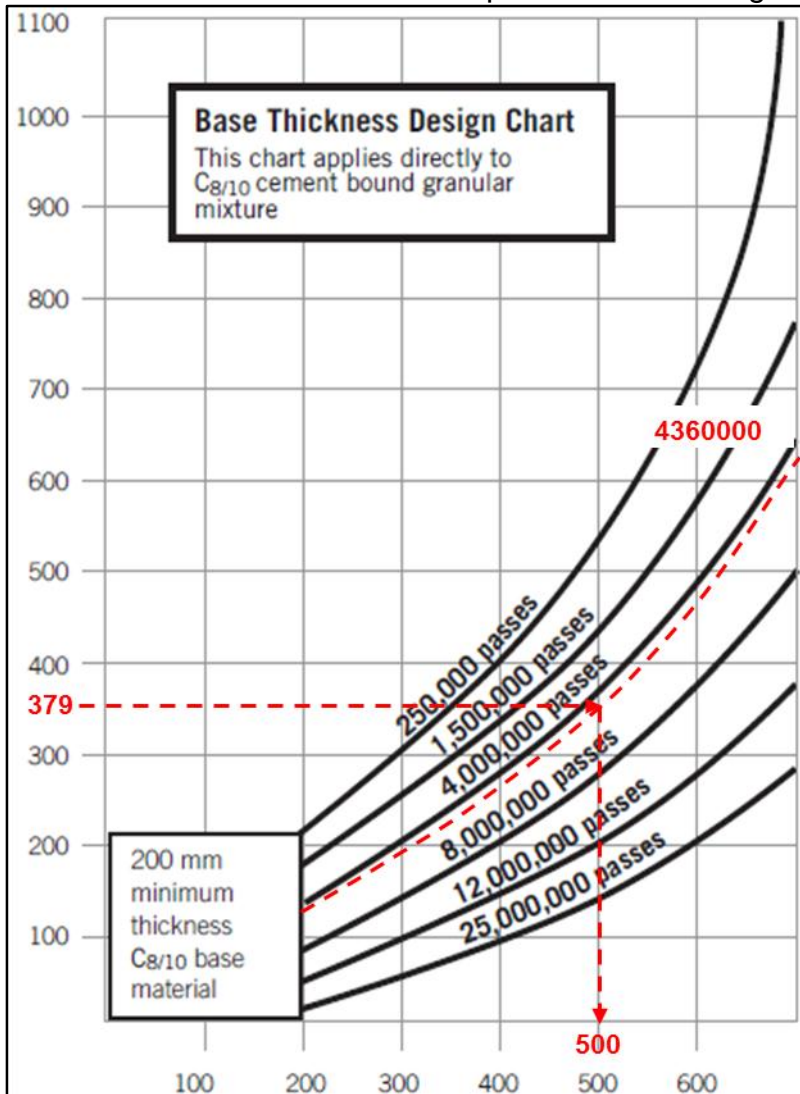
N°	Calculo	Valor
<b>Características del proyecto</b>		
1	CBR de la Subrasante	3.7%
2	Transito máximo	5700 Pasadas
3	Vida útil del pavimento	20 Años
<b>a) Características del equipo</b>		
1	Peso total del equipo	18330 kg
2	Capacidad de carga	15000 kg
3	Numero de ruedas del equipo	6 Und
4	Distancia entre ruedas	3100 mm
<b>b) Carga del equipo vacío por rueda</b>		3055.00 kg
<b>c) Carga critica</b>		15000 kg
<b>d) Carga por rueda estática</b>		152.09 KN

<b>N°</b>	<b>Calculo</b>	<b>Valor</b>
<b>e)</b>	<b>Profundidad efectiva de la carga</b>	2664 mm
1	Factor de proximidad por rueda	1.008
2	Carga total de una rueda	153.36 KN
<b>f)</b>	<b>Factores dinámicos</b>	
1	Frenado	±30%
2	Giros	±40%
3	Aceleración	±10%
4	Superficie irregular	0
5	Factores dinámicos totales	80%
6	Carga por rueda eje delantero con factores dinámicos	276.05 KN
7	Carga por rueda eje trasero con factores dinámicos	122.69 KN
<b>g)</b>	<b>Porcentaje del eje menos cargado</b>	0.05
1	Carga por pasada del equipo	1.05
<b>h)</b>	<b>N° de pasadas en el vida útil del diseño</b>	43598444
<b>i)</b>	<b>Espesor de Base estabilizada con Cemento Clase A (C8/10)</b>	500 mm

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos de carga por rueda y el número de pasadas para la vida útil de pavimento se ingresa a la carta de diseño como se muestra en la Figura 62, y se calculó el espesor de diseño de material tipo C8/10 equivalente a material de base estabilizada con cemento Clase A según artículo 505 de las especificaciones INVIAS-2013 e cual es de 500mm.

Figura 62. Cálculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de bodega con montacargas de 20 Ton



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 84.

Continuando con el proceso de diseño se convierte el espesor de material de base estabilizada con cemento a materiales acordes con las especificaciones de construcción de carreteras INVIAS-2013, este proceso se condensa en la Tabla 40 en donde se establecen estructuras de pavimento con 3 capas de rodadura diferentes esto con el fin de aprovechar las bondades que presenta la metodología y dándole herramientas al proyecto para que elija la solución que se acomode a las características esperadas.



Tabla 40. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos

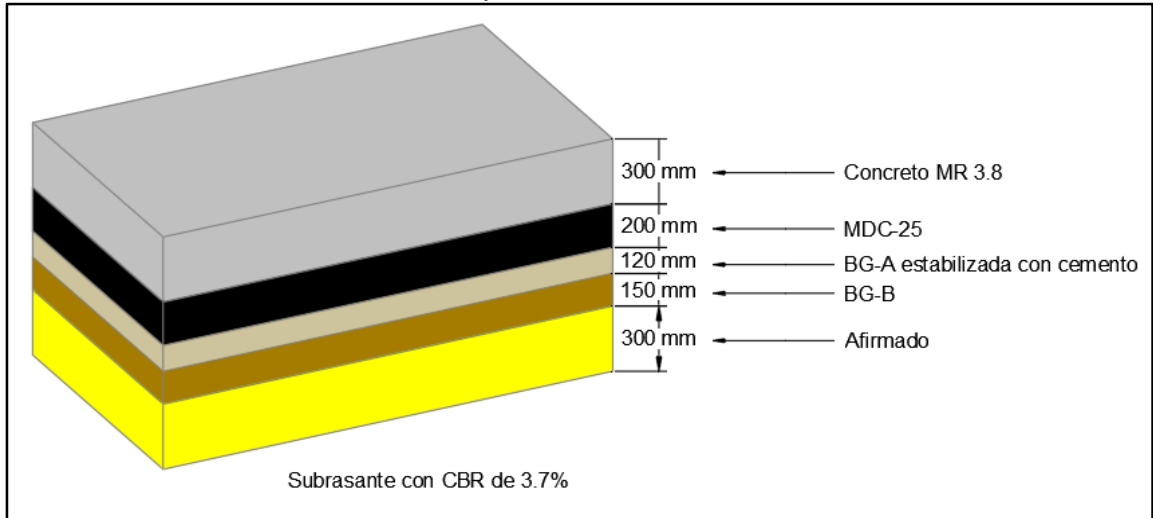
Material	Espesor a construir	Factor de Equivalencia de Materiales	Espesor de diseño
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Losa de concreto MR-3.8 MPa	300 mm	0.6	180 mm
Carpeta asfáltica MDC-25	200 mm	1	200 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	120 mm	1	120 mm
<b>Espesor final</b>	620 mm	<b>Total de diseño</b>	500 mm
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Carpeta asfáltica tipo MAM	280 mm	0.82	230 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	160 mm	1	160 mm
Base Granular BG-A	330 mm	3	110 mm
<b>Espesor final</b>	770 mm	<b>Total de diseño</b>	500 mm
<b>Adoquines en Concreto Hidráulico</b>			
Adoquines en concreto hidráulico	80 mm	1	80 mm
Base de arena	40 mm	0	0 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	300 mm	1	300 mm
Base Granular BG-A	360 mm	3	120 mm
<b>Espesor final</b>	780 mm	<b>Total de diseño</b>	500 mm

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del proceso de diseño se establecen 3 estructuras de pavimento con capas de rodadura diferentes, a estas estructuras se le suman las capas calculadas de cimentación del pavimento, esto a causa de que la capacidad de soporte de la subrasante no es suficiente para resistir las cargas que le impondrá el pavimento de tipo industrial.

La primera estructura que se propone con el diseño de la estructura del pavimento para la zona de producción está compuesta por una capa de rodadura en concreto hidráulico con un Mr-3.8 MPa de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013 como se muestra en la Figura 63.

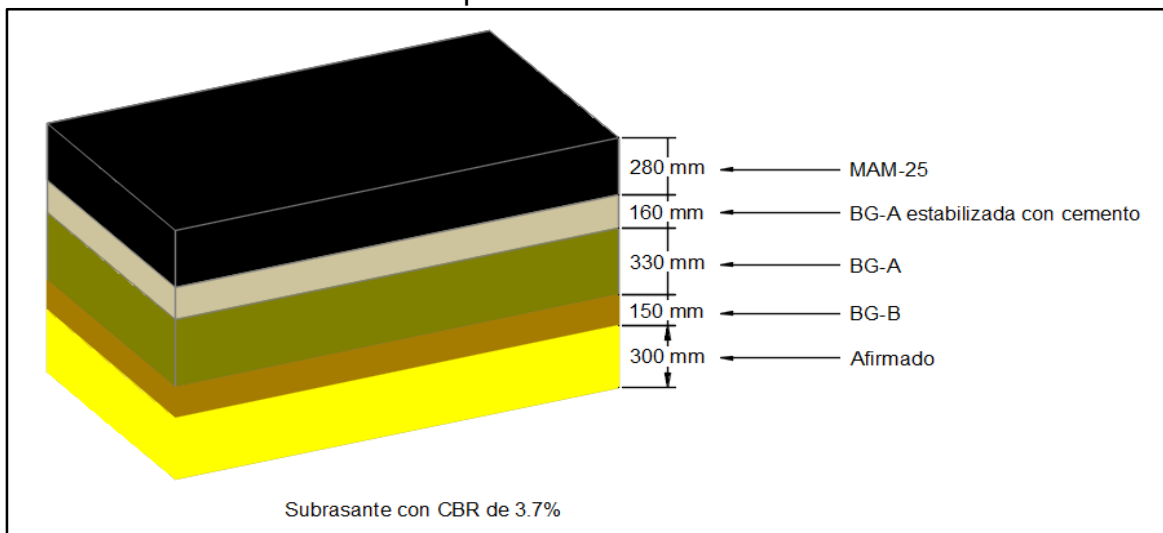
Figura 63. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto hidráulico en la zona de producción.



Fuente: Elaboración propia.

La segunda estructura de pavimento que es factible de usar en el diseño del pavimento industrial de la zona de producción, contempla una capa de rodadura en concreto asfáltico con una mezcla de alto módulo MAM-25 de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, en Figura 64 se presenta el paquete estructural completo del pavimento propuesto.

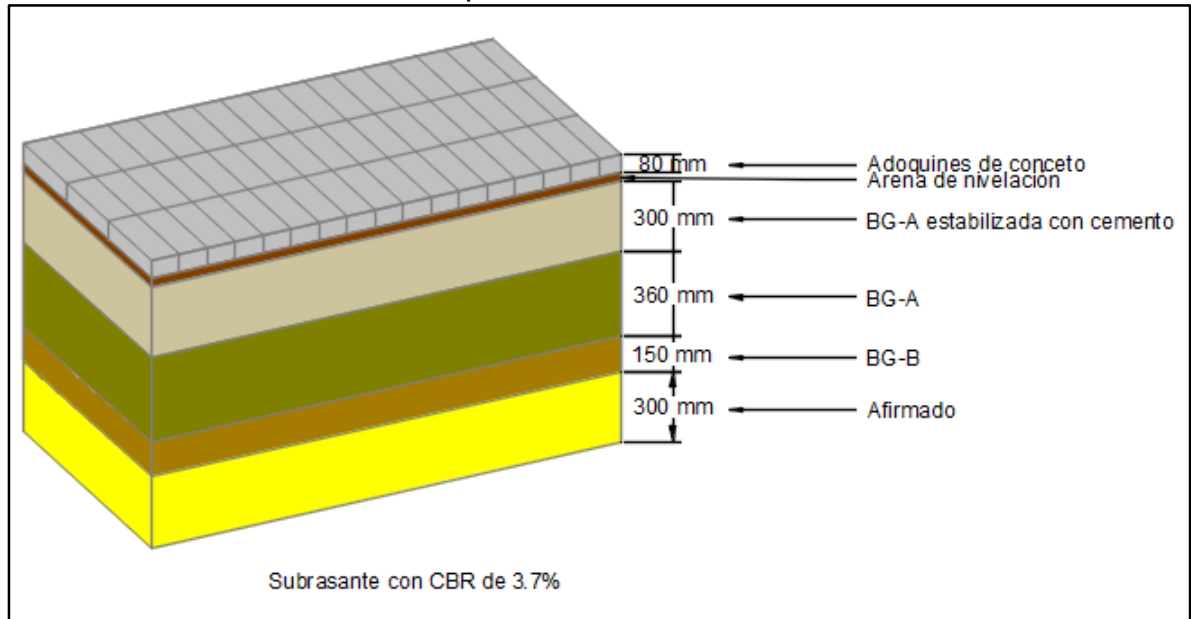
Figura 64. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción.



Fuente: Elaboración propia.

La tercera opción que se manejó para el diseño del pavimento industrial para la zona de producción, es la que permite que la capa de rodadura se plantee en adoquines en concreto hidráulico, en la Figura 65 se presentan la sección con las capas que componen la estructura del pavimento definida.

Figura 65. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción.



Fuente: Elaboración propia.

En resumen, los diseños de las estructuras de pavimento para el área industrial del lote 72 de la Zona Franca de Tocancipá requirieron de cálculo de cimentación, esto debido a que la capacidad de soporte está por debajo de 5% del CBR, para la zona de bodega se requirió una capa adicional de material de base estabilizada con cemento Clase A (C8/10) a la cimentación de 450 mm, y para la zona de producción una capa de 500 mm del mismo material, dichos espesores fueron transformados a materiales factibles de preparar bajo las especificaciones de construcción de carreteras INVIAS-2013 dejando propuestas 3 tipos de estructuras para cada zona en las cuales difieren las capas de rodadura, estas tres opciones permitirán al constructor tener puntos de comparación para definir la estructura con la que pavimentaran las diferentes zonas del proyecto.

## 6.2 DISEÑO DE PAVIMENTO PARA EL TERMINAL GRANELERO EL BOSCOAL DEL PUERTO AGUADULCE DE BUENAVENTURA.

El terminal granelero Boscoal está ubicado en el sur del puerto de Aguadulce en municipio de Buenaventura como se muestra en la Figura 66, este puerto es operado y administrado por la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.) el cual dentro de su necesidad de expansión requiere un nuevo espacio dedicado al movimiento y almacenaje de mercancías a granel, especialmente bobinas de acero que tienen un peso de 12 toneladas y las cuales se van a tener un máximo de dos filas de altura.

Figura 66. Ubicación terminal granelero Boscoal



Fuente: Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.)

La Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.) contrato a la empresa Geozam Laboratorio Y Consultoría S.A.S. para que le realizara 5 estudios de suelos en diferentes sectores del terminal granelero en las cuales el informe da como conclusión que se debe tomar un CBR de la subrasante de 13.5% esto debido a

que la superficie se consolidó con una capa de crudo de río de un espesor superior a 3 m.

En lo referente a los equipos de movilización de cargas, la Compas S.A. adquirió una flota de montacargas con capacidad de 18 y 25 toneladas con las características que se presentan en la Tabla 41, para la movilización de las bobinas de acero que se quieren almacenar en el terminal granelero Boscoal.

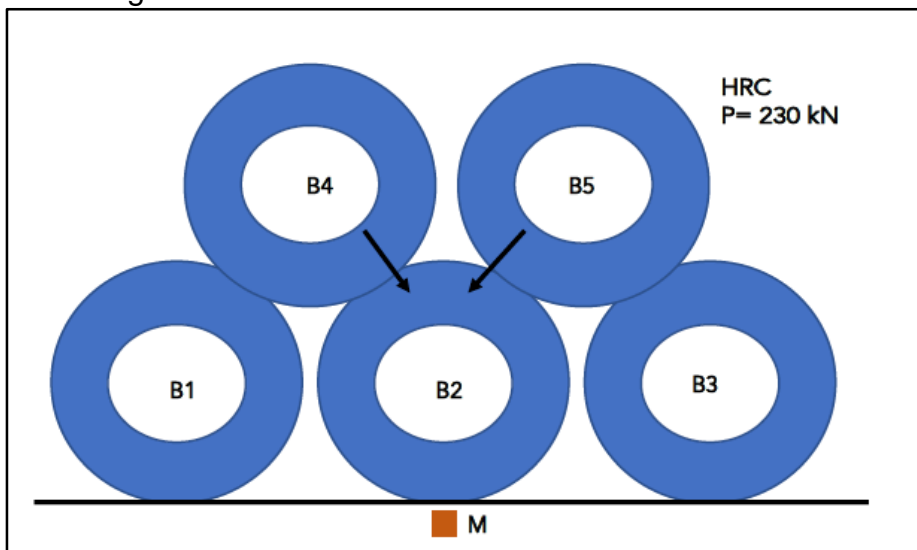
Tabla 41. Características de los equipos de diseño

Equipo	Capacidad de carga	Peso vacío	Numero de ruedas del equipo	Distancia entre ruedas
Kalmar DCG180-12LB	18000 kg	28500 kg	6 Und	3050 mm
Kalmar DCG250-12LB	25000 kg	32900 kg	6 Und	3050 mm

Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos de los equipos Kalmar.

Para la zona de almacenamiento de las bobinas de acero la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.) realizó un estudio de cargas de en el cual estableció que para dos filas de bobinas las cargas de contacto son de 230 kN, en la Figura 67 se muestra el análisis que se realizó a la carga estática impuesta por las bobinas de acero.

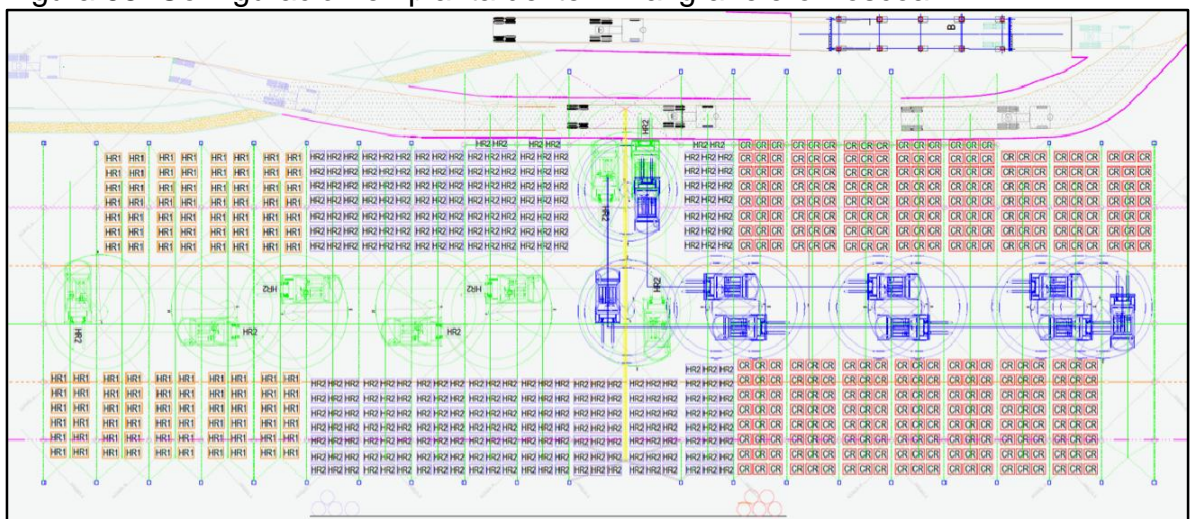
Figura 67. Análisis de cargas de las bobinas de acero que se almacenaran en el terminal granelero.



Fuente: Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.)

Para el proceso de diseño se tuvo en cuenta el diseño de circulación y almacenaje que se tiene propuesto para el terminal, en la Figura 68 se muestra la configuración plateada por la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.), por este motivo se desarrollan dos tipos de diseños para el terminal, la primera es un diseño por cargas estáticas correspondiente a la zona de almacenaje y la segunda es un diseño por cargas dinámicas para las zonas en donde se van a operar los montacargas que movilizaran las cargas dentro del terminal.

Figura 68. Configuración en planta del terminal granelero Boscoal



Fuente: Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.)

### 6.2.1 Diseño de pavimentos industriales del terminal granelero Boscoal.

Considerando la descripción del proyecto realizada previamente y que la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.) requiere un diseño de pavimentos para una vida útil de 25 años, se realizan dos diseños de pavimentos industriales, el primero para la zona de almacenaje de las bobinas de acero y el segundo para la zona de circulación de los montacargas que movilizaran las mercancías.

Iniciando con el diseño de la cimentación del pavimento, y teniendo en cuenta que el CBR de la subrasante es de 13.5%, la Tabla 32 indica que cuando el CBR de la subrasante es superior al 5% solo se debe aplicar una capa de 150 mm de espesor de material de base granular Tipo B (BG-B), es por esto que para el diseño del pavimento para el terminal granelero el Boscoal se tendrá como única capa de cimentación la capa de BG-B ya descrita.

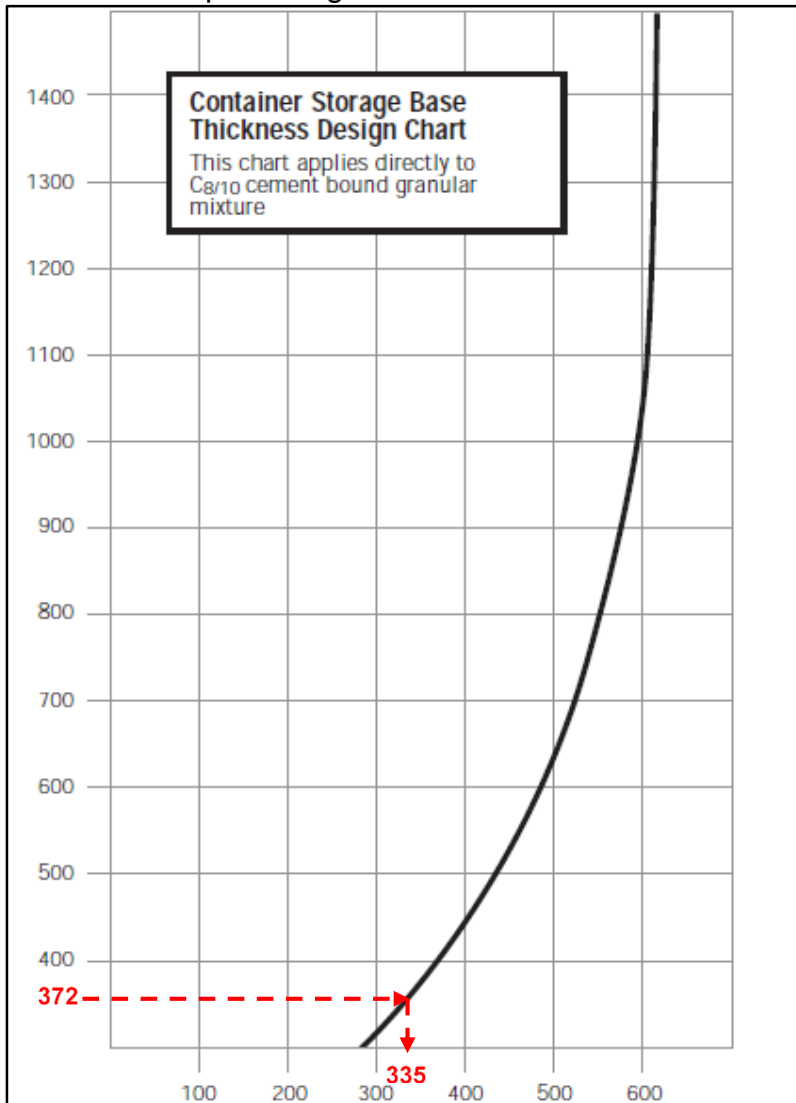
6.2.1.1 Diseño de pavimento industrial en la zona de almacenaje del terminal granelero Boscoal. Para el diseño de esta zona se aplica la metodología de diseño por cargas estáticas expuesta en el numeral 5.2.

a) Para la caracterización de las cargas el terminal granelero plantea que sus espacios de almacenamiento van a ser usados con boninas que tienen un peso de 12 toneladas y que estas van a estar apiladas en un máximo de dos filas, como se referencio en el numeral 6.2 la carga producto del almacenaje es de 230 KN, es importante aclarar que este cálculo lo realizo la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.), esto con el fin de definir la carga especifica con la que se debe diseñar el pavimento en esta zona del terminal.

b) Para el caso de las cargas estáticas debido a que estas no están asociadas a contenedores, las cargas no requieren que sean afectadas por factores de reducción de cargas, esto debido a que las cargas procedentes de las bobinas de acero son las mismas indistintamente si el número de filas en los apilamientos es de una o dos, es por esto que para el diseño se toma la carga de 230 KN como parámetro inicial para el ingreso a la carta de diseño.

c) Ingresando a la carta de diseño con la carga establecida previamente se procede al cálculo del material tipo C8/10 equivalente a un material de base estabilizada con cemento Clase A, de este procedimiento como se muestra en la Figura 69, se establece que la capa de material producto del diseño es equivalente a 335 mm de base estabilizada con cemento Clase A.

Figura 69. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de almacenaje del terminal granelero Boscoal en el puerto Aguadulce.



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 83.

d) Con el espesor obtenido se procede a proponer diferentes estructuras de pavimento las cuales con el fin de utilizar las características de la metodología propuesta se plantean 3 diferentes tipos de paquetes estructurales del pavimento, cada una con una superficie de rodadura diferente, estos espesores y materiales tentativos se transforman a materiales factibles de preparar bajo las especificaciones generales de carreteras INVIAS-2013 por medio de la Tabla 31 de



factores de equivalencia de materiales, en la Tabla 42 se presentan las estructuras propuestas para cada capa de rodadura.

Tabla 42. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de almacenaje del terminal granelero el Boscoal.

Material	Espesor a construir	Factor de Equivalencia de Materiales	Espesor de diseño
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Losa de concreto MR-3.8	150 mm	0.6	90 mm
Carpeta asfáltica MDC-25	100 mm	1	100 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	150 mm	1	150 mm
<b>Espesor final</b>	400 mm	<b>Total de diseño</b>	340 mm
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Carpeta asfáltica tipo MAM	200 mm	0.82	164 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	100 mm	1	100 mm
Base Granular BG-A	220 mm	3	73 mm
<b>Espesor final</b>	520 mm	<b>Total de diseño</b>	337 mm
<b>Adoquines en Concreto Hidráulico</b>			
Adoquines en concreto hidráulico	80 mm	1	80 mm
Base de arena	40 mm	0	0 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	150 mm	1	150 mm
Base Granular BG-A	320 mm	3	107 mm
<b>Espesor final</b>	590 mm	<b>Total de diseño</b>	337 mm

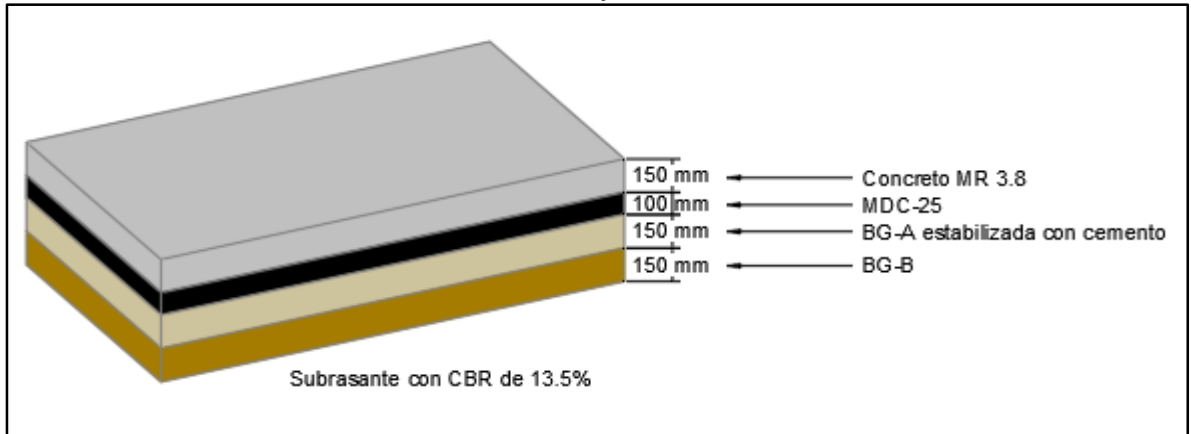
Fuente: Elaboración propia.

Es preciso señalar que a cada una de las estructuras calculadas en la Tabla 42 se le debe incorporar la capa de cimentación calculada previamente que corresponde a una base granular clase B (BG-B) de 150 mm.

De las estructuras de pavimento calculadas anteriormente en la Figura 70 se presenta el paquete estructural con capa de rodadura en concreto hidráulico con Mr-3.8 MPa según especificaciones generales de construcción de carreteras

INVIAS-2013, esta estructura representa la primera propuesta de pavimento del área de almacenaje de terminal granelero Boscoal.

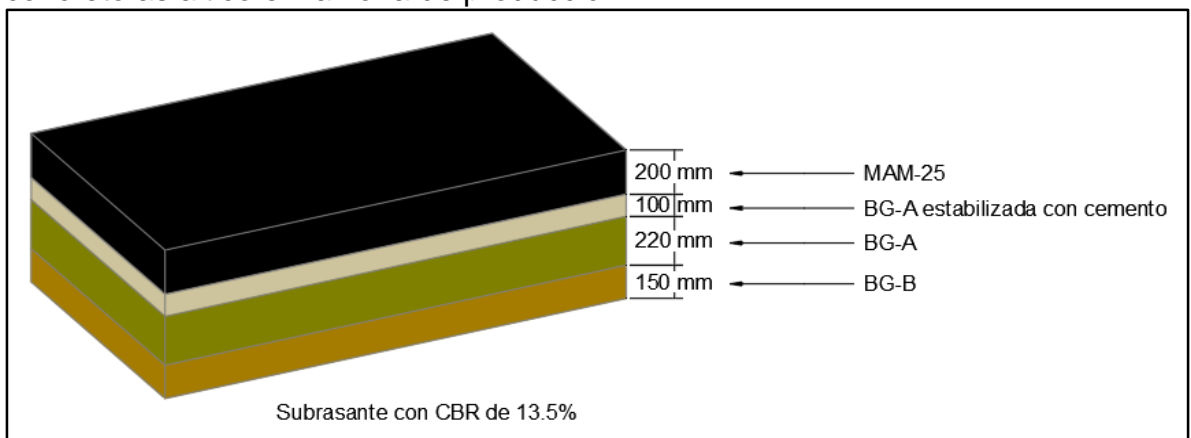
Figura 70. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de almacenaje del terminal.



Fuente: Elaboración propia.

La segunda propuesta de estructura del pavimento corresponde a una capa de rodadura en concreto asfáltico de con una mezcla de alto módulo MAM-25 de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, en la Figura 71 se presenta sección la segunda opción del pavimento.

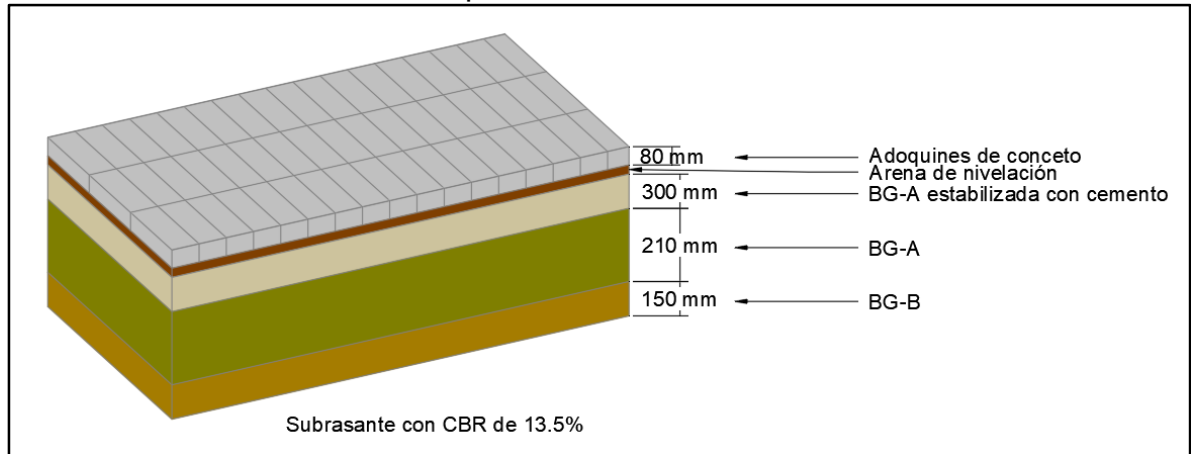
Figura 71. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción.



Fuente: Elaboración propia.

La tercera opción presenta una sección con capa de rodadura en adoquines de concreto hidráulico de acuerdo al artículo 510 de las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, en la Figura 72, se presenta la estructura propuesta.

Figura 72. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de producción.



Fuente: Elaboración propia.

Las soluciones finales que se plantean para la pavimentación de la zona de almacenaje del terminal granelero el Boscoal inicia teniendo en cuenta que debido que se tiene un CBR de la subrasante de 13.5% se debe disponer de una capa de base granular clase B (BG-B) de 150 mm, del proceso de diseño del espesor del pavimento se calculó una capa de 335 mm de material de base estabilizada con cemento clase A (C8/10), con estos dos espesores se procedió a transformar estos espesores de materiales a capas de materiales ajustados a las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, dejando tres alternativas propuestas para que el constructor dependiendo de las características finales que quiera para el proyecto decante por la que más se ajusta a sus necesidades.

6.2.1.2 Diseño de pavimento industrial en la zona de operación de los equipos de manipulación de mercancías del terminal granelero Boscoal. Para estas zonas la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.) adquirió dos tipos de quipos los cuales son dos montacargas Kalmar de 18 y 25 toneladas de capacidad las características principales de estos equipos están condensadas en la Tabla 41, para el diseño de la estructura del pavimento se usa la metodología propuesta en el numeral 5.3 para diseño con cargas dinámicas.

En primera medida en lo concerniente al tránsito o número de pasadas por un punto de los equipos, la Compañía de Puertos Asociados S.A. (Compas S.A.), expresan que mensualmente al puerto llegan dos barcos con bobinas de acero cada uno con 7500 toneladas las cuales se almacenaran y por cortos tiempos, estas cargas posteriormente son cargados a camiones 3 S2 los cuales movilizan las cargas a sus zonas de destino.

El total de carga que se debe mover tanto de almacenaje como de carga a camiones es de 30000 toneladas y cada equipo mueve a la vez una bobina de metal de 12 toneladas, por lo tanto:

$$\text{Movimientos totales de equipos (Tránsito)} = \frac{30000 \text{ Ton}}{12 \text{ Ton}} = 2500 \text{ x mes}$$

Del análisis anterior se determina que el número de movimientos o de aplicaciones de carga que se tendrán por parte de los equipos por mes lo cual es equivalente a 84 movimientos diarios, con estos datos postreramente se calcula la vida útil de pavimento para un periodo de 25 años.

El diseño de pavimentos industriales usando cargas dinámicas se realizó por medio de 11 de etapas propuestas en la metodología propuesta en el numeral 5.3, no obstante, como se advierte en la metodología en caso que el movimiento de mercancías se realice por más de un equipo se de proceder a realizar los respectivos cálculos hasta el cálculo del material de base estabilizada con cemento C8/10 y escoger el mayor de ellos para el cálculo final de la estructura de pavimento en la Tabla 43 se presentan el resumen de los cálculos para el montacargas de 18 toneladas.

Tabla 43. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de operación de los equipos del terminal granelero el Boscoal.

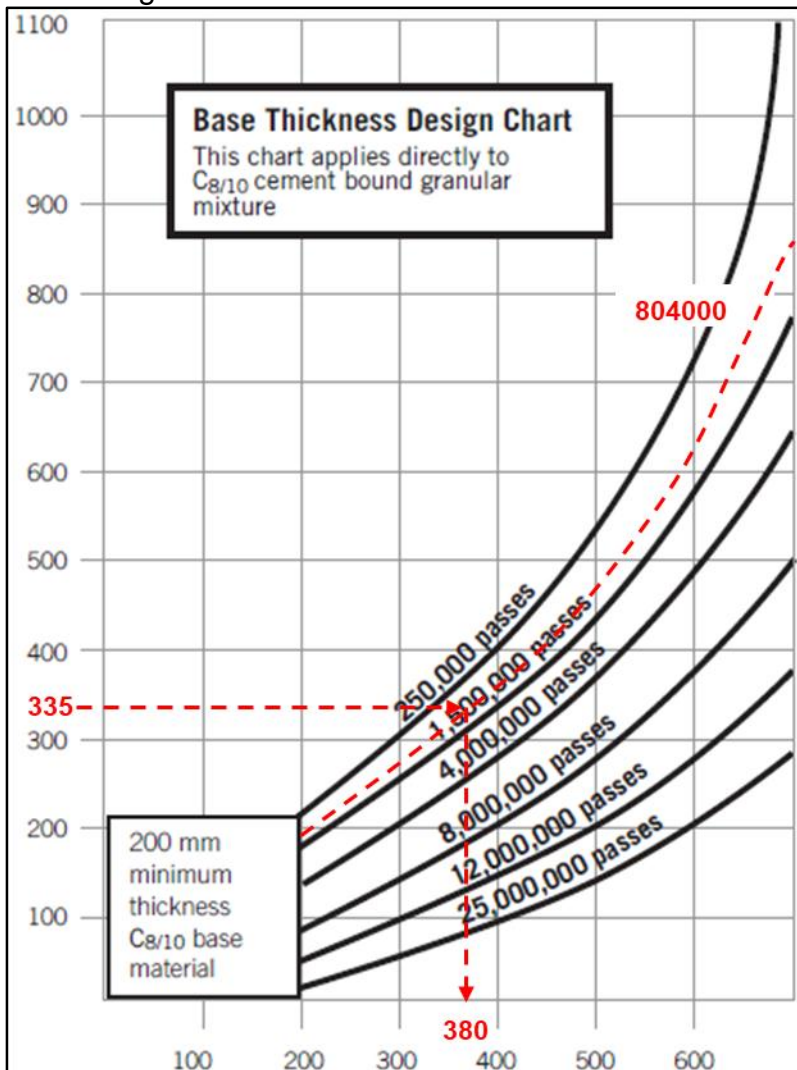
N°	Calculo	Valor
<b>Características del proyecto</b>		
1	CBR de la Subrasante	13.5%
2	Transito máximo	84 Pasadas
3	Vida útil del pavimento	25 Años
<b>a) Características del equipo</b>		

<b>N°</b>	<b>Calculo</b>	<b>Valor</b>
1	Peso total del equipo	28500 kg
2	Capacidad de carga	18000 kg
3	Numero de ruedas del equipo	6 Und
4	Distancia entre ruedas	3050 mm
<b>b)</b>	<b>Carga del equipo vacío por rueda</b>	4750.00 kg
<b>c)</b>	<b>Carga critica</b>	18000 kg
<b>d)</b>	<b>Carga por rueda estática</b>	184.28 KN
<b>e)</b>	<b>Profundidad efectiva de la carga</b>	1913 mm
1	Factor de proximidad por rueda	1.008
2	Carga total de una rueda	185.83 KN
<b>f)</b>	<b>Factores dinámicos</b>	
1	Frenado	±30%
2	Giros	±40%
3	Aceleración	±10%
4	Superficie irregular	0
5	Factores dinámicos totales	80%
6	Carga por rueda eje delantero con factores dinámicos	334.49 KN
7	Carga por rueda eje trasero con factores dinámicos	148.66 KN
<b>g)</b>	<b>Porcentaje del eje menos cargado</b>	0.05
1	Carga por pasada del equipo	1.05
<b>h)</b>	<b>N° de pasadas en el vida útil del diseño</b>	803129
<b>i)</b>	<b>Espesor de Base estabilizada con Cemento Clase A (C8/10)</b>	380 mm

Fuente: Elaboración propia.

Con los cálculos previamente realizados para el montacargas de 18 toneladas se ingresa a la carta de diseño para cargas dinámicas como se muestra en la Figura 73 de la cual se dedujo que se requiere 380 mm de espesor de material de base estabilizada con cemento (C8/10).

Figura 73. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de de operación de los equipos con montacargas de 18 Ton



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 84.

Como se había descrito previamente se debe realizar el cálculo del espesor de material de Base estabilizada con cemento para el montacargas de capacidad de 25 toneladas y con los dos espesores calculados se decantará mayor de los dos, en la Tabla 44 se resumen los cálculos realizados para el segundo equipo de diseño el cual se realizó mediante el procedimiento de diseño por cargas dinámicas y en el cual se tuvo en cuenta el mismo cálculo de vida útil realizado previamente.

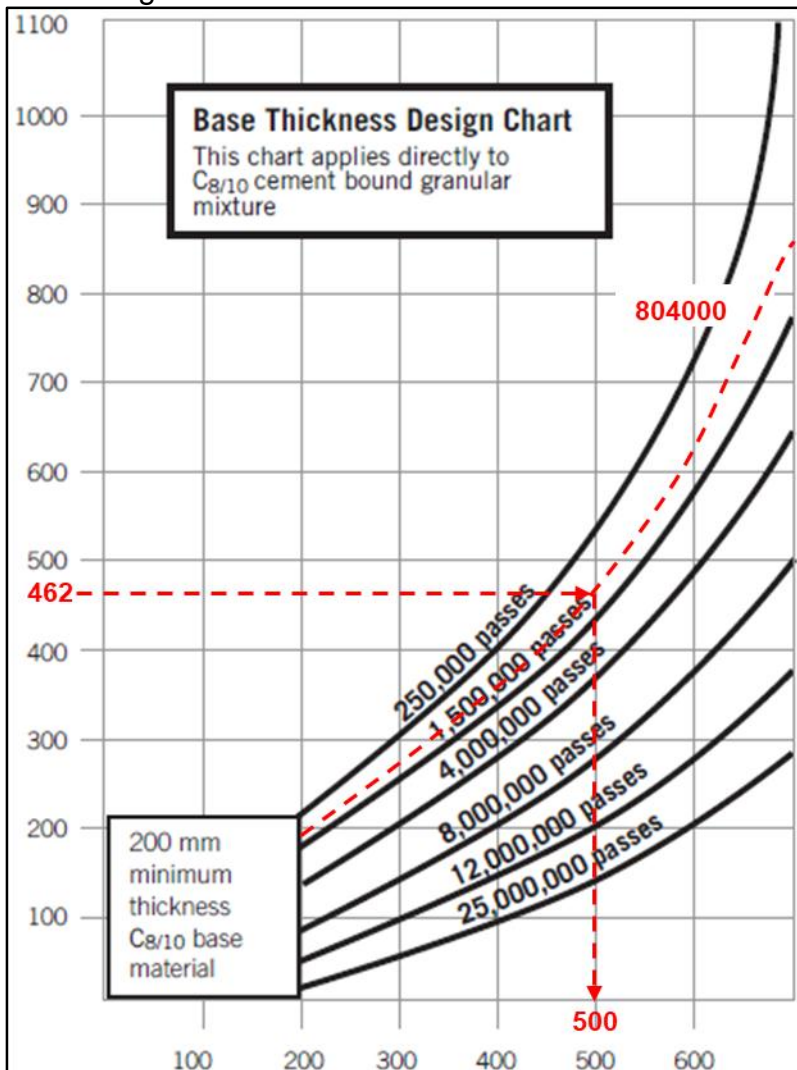
Tabla 44. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de operación de los equipos del terminal granelero el Boscoal.

N°	Calculo	Valor
<b>Características del proyecto</b>		
1	CBR de la Subrasante	13.5%
2	Transito máximo diario	84 Pasadas
3	Vida útil del pavimento	25 Años
<b>a) Características del equipo</b>		
1	Peso total del equipo	32900 kg
2	Capacidad de carga	25000 kg
3	Numero de ruedas del equipo	6 Und
4	Distancia entre ruedas	3050 mm
<b>b) Carga del equipo vacío por rueda</b>		5483.33 kg
<b>c) Carga critica</b>		25000 kg
<b>d) Carga por rueda estática</b>		254.13 KN
<b>e) Profundidad efectiva de la carga</b>		1913 mm
1	Factor de proximidad por rueda	1.008
2	Carga total de una rueda	256.26 KN
<b>f) Factores dinámicos</b>		
1	Frenado	±30%
2	Giros	±40%
3	Aceleración	±10%
4	Superficie irregular	0
5	Factores dinámicos totales	80%
6	Carga por rueda eje delantero con factores dinámicos	461.26 KN
7	Carga por rueda eje trasero con factores dinámicos	205.00 KN
<b>g) Porcentaje del eje menos cargado</b>		0.05
1	Carga por pasada del equipo	1.05
<b>h) N° de pasadas en el vida útil del diseño</b>		803129
<b>i) Espesor de Base estabilizada con Cemento Clase A (C8/10)</b>		500 mm

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores calculados de carga por rueda con factores dinámicos y la vida útil de pavimento contado en número de pasadas se ingresa a la carta de diseño y se calcula el espesor inicial de base estabilizada con cemento clase A (C8/10), en la Figura 74 se presenta el cálculo del espesor mencionado.

Figura 74. Calculo del espesor de material Tipo C8/10 equivalente a una base estabilizada con cemento Clase A para zona de de operación de los equipos con montacargas de 25 Ton



Fuente: Elaboración propia a partir de KNAPTON, John. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. p. 84

Como se puede evidenciar en los análisis anteriores el montacargas de 25 toneladas es el equipo que más requiere espesor de base estabilizada con cemento clase A, por lo tanto, el espesor de 500 mm es el que se transforma a capas de materiales acordes a las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013.



En la etapa de conversión de los espesores de los materiales por medio de los factores de equivalencia de materiales se generan 3 alternativas de estructura de pavimento, las cuales se diferencian entre otras cosas en la capa de rodadura proyectada, en la Tabla 45 se presentan las diferentes alternativas planteadas junto con los espesores de cada una de las capas que componen los paquetes estructurales de las alternativas.

Tabla 45. Calculo de los espesores de las capas de los pavimentos propuestos para la zona de operación de los equipos del terminal granelero el Boscoal.

Material	Espesor a construir	Factor de Equivalencia de Materiales	Espesor de diseño
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Losa de concreto MR-3.8	210 mm	0.58	122 mm
Carpeta asfáltica MDC-25	100 mm	1	100 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	280 mm	1	280 mm
<b>Espesor final</b>	590 mm	<b>Total de diseño</b>	502 mm
<b>Concreto Hidráulico</b>			
Carpeta asfáltica tipo MAM	150 mm	0.82	123 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	250 mm	1	250 mm
Base Granular BG-A	380 mm	3	127 mm
<b>Espesor final</b>	780 mm	<b>Total de diseño</b>	500 mm
<b>Adoquines en Concreto Hidráulico</b>			
Adoquines en concreto hidráulico	80 mm	1	80 mm
Base de arena	40 mm	0	0 mm
Base Granular Clase A (BG-A) estabilizada con cemento	260 mm	1	260 mm
Base Granular BG-A	480 mm	3	160 mm
<b>Espesor final</b>	860 mm	<b>Total de diseño</b>	500 mm

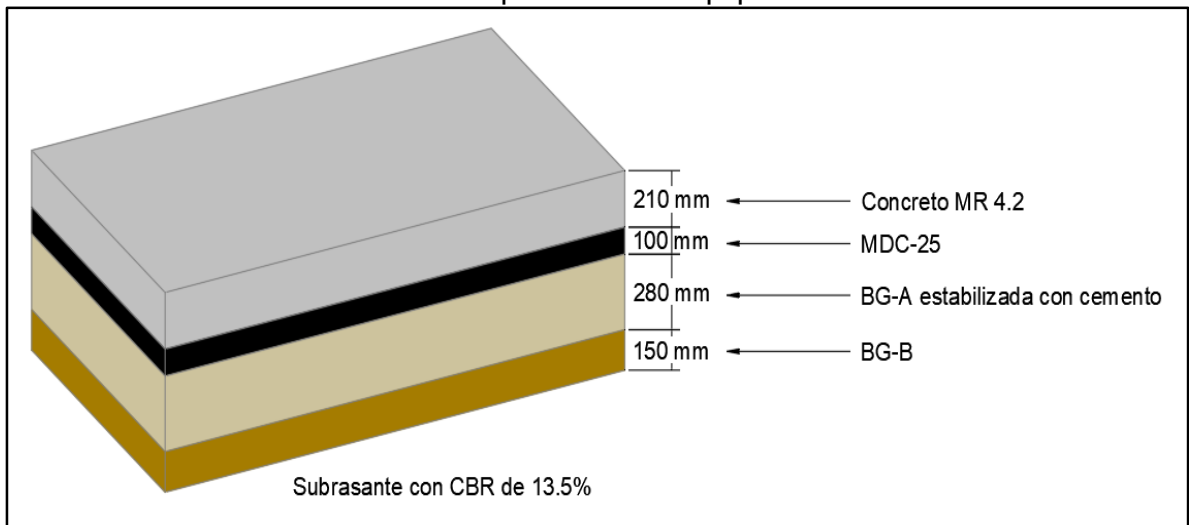
Fuente: Elaboración propia.

Las tres estructuras de pavimento calculadas en la Tabla 45, se les agrega la capa 150 mm de material de base clase B la cual fue calculada como capa de cimentación, indistintamente de la capa de rodadura que se proponga la estructura

en general debe estar cimentada con la capa descrita, por lo tanto, las secciones de pavimento que se proponen incluyen la capa de cimentación.

La estructura del pavimento con capa de rodadura en concreto hidráulico se presenta inicialmente con un diseño de 3 capas a las cuales se les agregó la capa de cimentación, en la Figura 75 se presentan la sección de pavimento con las capas asociadas a las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013.

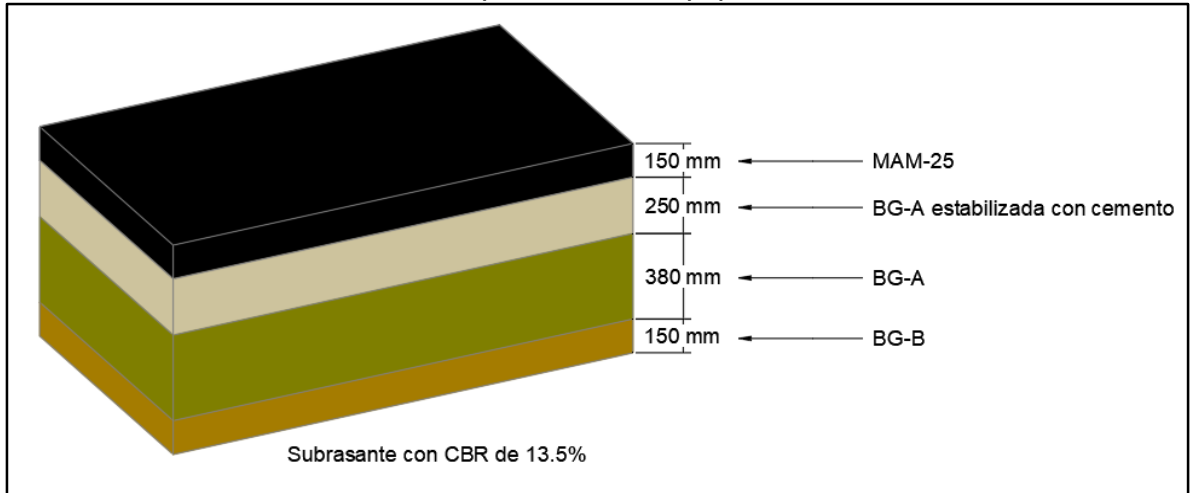
Figura 75. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto hidráulico en la zona de operación de equipos del terminal.



Fuente: Elaboración propia.

La segunda estructura de pavimento contando con la capa de cimentación está compuesta por 4 capas las cuales tienen un espesor total de 930 mm, las cuales estas transformadas a capas concordantes con las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, en la Figura 76 se presentan la sección del pavimento propuesta con capa de rodadura en concreto asfáltico de alta resistencia MAM-25.

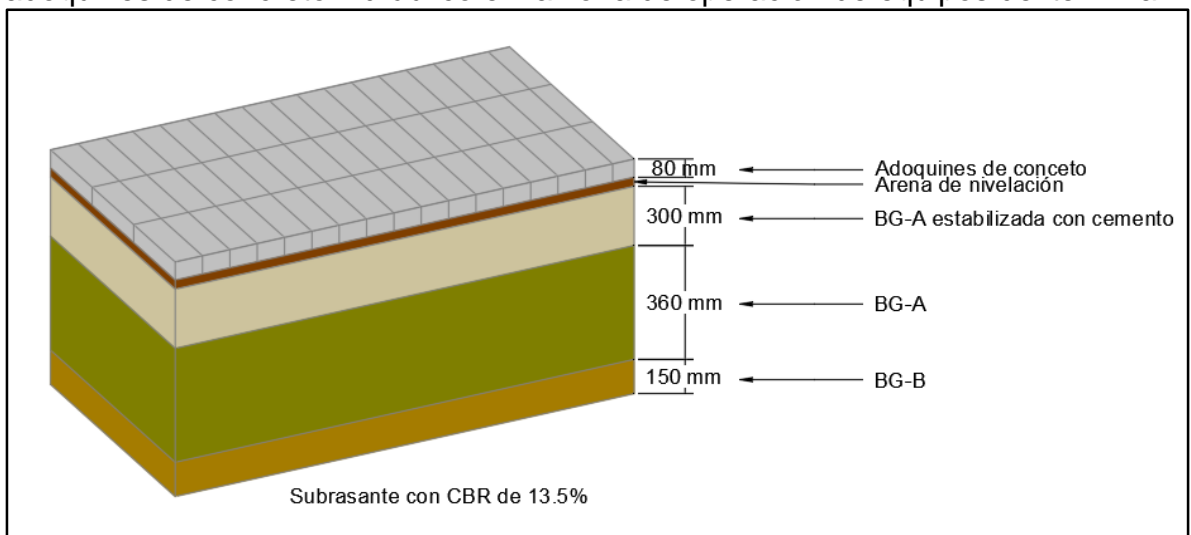
Figura 76. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en concreto asfáltico en la zona de operación de equipos del terminal.



Fuente: Elaboración propia

La última propuesta de estructura de pavimento es la sección ilustrada en la Figura 77, en la cual se establece una capa de rodadura en adoquines de concreto hidráulico, el espesor total del paquete estructural incluyendo la capa de cimentación es de 1010 mm, cada una de las capas fue transformada a materiales competentes según las especificaciones generales de conducción de carreteras INVIAS-2013

Figura 77. Sección propuesta para el pavimento industrial con capa de rodadura en adoquines de concreto hidráulico en la zona de operación de equipos del terminal.



Fuente: Elaboración propia

## 7 CONCLUSIONES

- Principalmente en el presente trabajo se estableció una metodología para diseño de pavimentos y áreas industriales basada en los estudios de la British Ports Association (BPA), dentro del proceso de escogencia se analizaron la guía de diseño de pavimentos industriales de la PCA y la guía chilena de pisos industriales, en los cuales se pudo establecer que tienen bases teóricas muy fuertes, sin embargo, estas dos metodologías se limitan a diseños de pavimentos rígidos, por este motivo se estableció la metodología de la BPA como la más indicada para el ámbito colombiano ya que permite la utilización de capas de rodadura en concreto rígido, asfáltico, en adoquines de concreto hidráulico y diseño de rehabilitaciones, lo que permite al diseñador de un proyecto tener varias opciones para seleccionar la estructura que más se acomode a cada proyecto en particular.
- Se establecieron de manera teórica los materiales que pueden ser usados para los pavimentos de tipo industrial bajo las condiciones de las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013, este proceso constituyó que de 44 materiales que tiene disponible la BPA se pase a disponer de 14 diferentes tipos de materiales que pueden ser preparados las especificaciones colombianas, en este sentido los materiales que singuen disponibles luego del análisis son: dos tipos de capas de bases estabilizadas con cemento, tres tipos de concreto para pavimentos, cuatro clases de concretos asfálticos, tres mezclas de materiales granulares y adoquines en concreto hidráulico, los cuales comprenden la tabla de factores de equivalencia de materiales aplicada a Colombia .
- En el desarrollo del informe se establecen 4 procedimientos técnicos para la formulación y diseño de proyectos a nivel de diseño de estructuras de pavimentos para puertos y áreas industriales, en este sentido la guía plantea el desarrollo de diseños de fundaciones del pavimento, diseños por cargas estáticas y dinámicas, y por último diseño de sobrecapas y rehabilitaciones de pavimentos industriales, estos procedimientos pretenden dotar de herramientas técnicas a los diseñadores para que junto con el buenas prácticas de ingeniería generen diseños de pavimentos apropiados para puertos y áreas industriales .
- Se realizó la transferencia de tecnología de los manuales The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries.4 Edición, manual de pavimentos industriales de la Portland Cement Association (PCA) y el Manual de Diseño de Pisos Industriales del Instituto de Cemento y Hormigón de Chile (ICH), las metodologías estudiadas por la guía pese a establecer el manual de la BPA

como la metodología seleccionada, se establecen los criterios de diseño tanto de la guía de la PCA como del ICH, para que en el caso que un diseñador requiera un diseño en pavimento rígido con las características que estos manuales presentan tenga los criterios técnicos de diseño para poderlo desarrollar.

- Dentro de proceso de caracterización de equipos fue posible identificar el número y características de los equipos de las 4 principales zonas portuarias del país, en el océano pacifico el puerto de Buenaventura con un total de 372 equipos de 24 diferentes características, es el puerto con más movimiento de carga del país, y de los puertos localizados sobre el océano Atlántico los más importantes son, el puerto de Cartagena con 123 equipos de movilización de cargas y cuenta con 22 diferentes tipologías de equipos, Barranquilla con 114 equipos de 20 diferentes características y Santa Marta que cuenta con un total de 77 equipos de 21 diferentes características.
- De la variedad de equipos presentes en los puertos colombianos se establecieron las dimensiones y cargas de cada uno de las tipologías de equipos de movimiento de mercancías, estas dimensiones y características están enfocadas a las particularidades que se tiene en cuenta para el diseño de pavimentos de tipo industrial, esta categorización permite que los diseñadores conozcan de primera mano los equipos que movilizan la carga en los principales puertos del país, con lo cual tienen un texto para una futura proyección de diseños de pavimentos industriales en esta zonas.
- Debido a que los puertos del país están generando grandes inversiones para la modernización de su infraestructura y equipos, se debe tener en cuenta que la Superintendencia de Puertos y Transporte genera anualmente un catálogo con los equipos con los que cuentan los principales puertos del país
- La metodología se implementó en 2 proyectos diferentes, el primero en el lote 72 de la zona franca de Tocancipá en la cual se diseñaron dos diferentes zonas con pavimento industrial, la primera para una zona de bodega y la segunda para el sector de producción, en esta se tuvieron que realizar diseño de cimentaciones y a su vez con el fin de aprovechar las ventajas de la metodología planteada se propusieron 3 diferentes tipos de estructuras con 3 capas de rodadura diferente las cuales tienen espesores totales de entre 1370 mm y 1340 mm, los diseños más robustos fueron gobernados por el equipo que más peso moviliza.
- En segunda instancia se diseñó el pavimento industrial del terminal granelero el Boscoal localizado en el puerto de aguadulce del municipio de Buenaventura,

para estos se realizaron los diseños de los pavimentos industriales para una zona de almacenaje de bobinas metálicas y un sector de circulación de los equipos con los que se mueve la carga, en este puerto se realizaron diseño tanto por cargas estáticas como dinámicas y se evidencio que los espesores de diseño más altos comprenden a los que transitan los equipos con espesores superiores hasta de un 33%.

- Finalmente, el presente informe proporciona los elementos técnicos apropiados para que un diseñador de pavimentos pueda formular, evaluar y diseñar pavimentos de tipo industrial, sin embargo, a criterio del profesional se deben establecer las características suficientes de cada proyecto en particular las cuales permitan la correcta utilización de la metodología.

## 8 RECOMENDACIONES.

- Dentro de un proceso de mejoramiento de la metodología es vital realizar una comparación de materiales a nivel de ensayos de laboratorio que permitan establecer criterios específicos de comparación, y de esta manera encontrar factores de equivalencia de materiales con un nivel de exactitud superior al encontrado de forma teórica.
- En referencia a los equipos que mueven las cargas en los puertos y las áreas industriales se encontró que las zonas francas y las sociedades portuarias establecen algunas restricciones para la consulta al público en general de cuáles son los equipos con los que cuentan, sin embargo, la Superintendencia de Puertos y Transporte tiene un catálogo medianamente actualizado de los equipos con los que cuentan los puertos en Colombia, es por esto que las instituciones educativas deben fortalecer las relaciones con este tipo de empresas y sociedades para el desarrollo de nuevas tecnologías estén acompañadas de implantaciones, lo cual permita establecer mejoramientos de las metodologías.
- Los acompañamientos académicos deben fortalecerle en gran medida, ya que la implementación de la metodología generó algunos inconvenientes, debido a que principalmente las empresas en donde se propuso la implementación solicitaban a cambio contraprestaciones como estudios de suelos detallados o diseños adicionales y demás que el tesista no podía solventar, es por esto que establecer relaciones académicas con el sector de movimiento de mercancías en el país permitirá que nuevos estudiantes desarrollen tecnologías que a largo plazo beneficiaron al sector.
- La metodología generada mediante al presente informe debe ser usada junto con la respectiva precaución que el especialista en diseño de pavimentos considere, esto debido a que los análisis acá realizados fueron realizados a nivel teórico y en la práctica algunas características de materiales pueden cambiar, es por esto que se le sugiere al diseñador que realice las comprobaciones prácticas que considere necesarias para llevar a buen término el diseño de un pavimento industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

BRAVO DAVID ALEJANDRO. Metodología para el Control de Calidad en la Construcción de Naves Industriales. 2011. 108 p.

COMISIÓN TÉCNICA DE LA PRESIDENCIA DE LOS PUERTOS DEL ESTADO, Recomendaciones para obras marítimas (ROM) Versión 4.1. 1994. 245 p.

COSTA RÚA CARLES. Los puertos en el transporte marítimo. Grupo de ingeniería de la organización y logística industrial. 2006. 21 p.

DUARTE, LAURA Y ROJAS, DIEGO. Evaluación y diseño de los pavimentos para un terminal marítimo. 2010. 109 p

EUROCODE 7: Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing. 2004. 199 p

HIGUERA CARLOS HERNANDO. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Principios fundamentales, el tránsito, factores climáticos y geotecnia vial, 2011. 284 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. 2007. 900 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. 2013. 1725 p.

KNAPTON JOHN. Heavy Duty Pavements. The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries. 2007. 89 p

MELETUOU, MARIOS Y KNAPTON JOHN. Monografías de la UCTAD sobre gestión de puertos. 1987. 37 p

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Concrete Industrial Ground Floors. A guide to design and construction. 2016. 104 p

RIVERA LOPEZ GERARDO ANTONIO. Concreto Simple 2010. 153 p

SALSILLI RICARDO. Manual de diseño de pisos industriales. 2013. 86 p



## Anexo A. Metodologías de diseño empleadas

Anexo B. diagramas de flujo de metodologías estudiadas

## Anexo C. Comparaciones de materiales

## Anexo D. Cálculos de los diseños realizados