

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil



Diseño de pavimentos portuarios de adoquines y su aplicación al Puerto San Vicente SVTI

Víctor Samuel Rivas González

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

MSc. Rafael Aránguiz M.

Profesor Informante

José Guzmán M.

Dirección de Obras Portuarias

Responsable Empresa

Eugenio Peirano J.

Concepción, Enero 2011

Dedicado a mis padres Octavio y Edita,
y a mis hermanos Robert y Rodrigo.

Agradecimientos

Quisiera agradecer primeramente a Dios por la oportunidad que me dio, la confianza y fortaleza para hacer posible este sueño, que en alguna etapa de mi vida se vio complicada.

Gracias por este obsequio.

Agradecer a mis padres (Octavio Rivas V. y Edita González V.) que siempre estuvieron presentes en el transcurso de la carrera, desde el principio hasta éstas instancias finales. Su apoyo incondicional y su tremendo esfuerzo fueron de gran fortaleza y confianza, lo que se refleja en la culminación de éste trabajo. También agradecer a mis hermanos (Robert R. y Rodrigo R.) que me brindaron su ayuda y demostraciones de cariño que fueron de gran motivación para llegar a éstas instancias.

Gracias también a mi tutor de empresa (Eugenio Peirano J.) quien me ayudó y apoyó en todo sentido para el desarrollo de éste proyecto al igual como lo hizo mi profesor guía (Rafael Aranguiz M.) y a todas aquellas personas; compañeros, amigos, familiares y conocidos que han mostrado gestos de confianza, lealtad y que han creído en mí.

Víctor Samuel Rivas González

Sumario

Este trabajo busca evaluar la metodología de diseño de pavimentos portuarios en el Puerto San Vicente (SVTI) y las implicancias de las cargas y condiciones del terreno que afectan en el diseño. Esto a raíz de los múltiples factores de influencia en el diseño y fallas que se han producido en la pavimentación con el sistema de adoquines en las distintas zonas del puerto, además se desea poder evaluar actualmente las condiciones que limitan el diseño.

La única investigación con la que se cuenta en nuestro país hasta el momento es el Manual de Pavimentos Portuarios del MOP (1999), el cual está enfocado principalmente a pavimentos de hormigón y asfalto, dando un tratamiento muy leve al sistema de pavimentación con adoquines.

Debido a esto, el objetivo del proyecto fue la investigación de los distintos métodos con los que cuenta un diseñador de pavimentos portuarios de adoquines. Para ello se realizó una investigación sobre las diferentes normas y recomendaciones que existen actualmente, estudiando las más utilizadas en el mundo (BPA y ROM) principalmente. Con ello se hizo una descripción de los puntos más relevantes y de interés para un posterior diseño en el puerto. Las variables de diseño, como; equipo utilizado, utilización del área a diseñar, mecánica del suelo, contenedor crítico y conducta del equipo, fueron estudiadas a través de información recopilada por el puerto y por un estudio visual del comportamiento y régimen de funcionamiento.

De la investigación y diseño se ha podido concluir la importancia de la variable de número de pasadas, la cual tiene directa relación con la vida útil del proyecto. Además se pudo extraer que el efecto dinámico de los vehículos que circulan sobre un pavimento, es de vital importancia en la consideración de un diseño de pavimentos portuarios, siendo el efecto más desfavorable el de frenado y la aceleración actuando en conjunto para el régimen de tránsito de la zona estudiada en el puerto.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERAL	1
1.2 ALCANCES Y OBJETIVOS	2
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 PAVIMENTOS RÍGIDOS	3
2.2 PAVIMENTOS FLEXIBLES	4
2.3 PAVIMENTOS DE ADOQUINES	4
2.3.1 <i>Ventajas del Pavimento de adoquines en puertos</i>	5
2.3.2 <i>Diseño de pavimentos de adoquines de Hormigón</i>	6
2.3.3 <i>Componentes de un adoquín (materiales)</i>	7
2.3.4 <i>Características de los adoquines</i>	8
2.3.5 <i>Clasificación de los adoquines</i>	8
2.3.6 <i>Transmisión de esfuerzos</i>	10
2.4 NORMAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS PORTUARIOS	11
2.4.1 <i>Manual de Diseño y Construcción (ICH)</i>	11
2.4.2 <i>Manual Británico de Diseño de Pavimentos Portuarios (BPA)</i>	16
2.4.3 <i>Recomendaciones de Obras Marítimas, España (ROM)</i>	36
2.4.4 <i>Caracterización de las cargas de diseño</i>	36
2.4.5 <i>Factores de dimensionamiento de los pavimentos portuarios</i>	41
2.4.6 <i>Vida útil</i>	42
2.4.7 <i>Descripción de dimensionamiento mediante catálogo</i>	48
2.4.8 <i>Análisis comparativo para el Puerto de Gaza-Israel</i>	55
3. APLICACIÓN AL PUERTO SAN VICENTE	57
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PUERTO SAN VICENTE	57
3.1.1 <i>Ubicación Geográfica</i>	58

3.1.2	<i>Capacidad</i>	58
3.1.3	<i>Equipos</i>	59
3.2	CONDICIONES GEOTÉCNICAS SEGÚN SU CBR	60
3.2.1	<i>Zona A (Sector Rompeolas)</i>	61
3.2.2	<i>Zona B (Sector Costanera)</i>	61
3.2.3	<i>Zona C (Sector Patio de Contenedores)</i>	62
3.2.4	<i>Zona D (Sector Patio de Contenedores)</i>	62
3.2.5	<i>Zona E (Sector Patio de Contenedores)</i>	63
3.3	DISEÑO DEL PAVIMENTO	64
3.3.1	<i>Condiciones de diseño</i>	65
3.3.2	<i>Cálculos</i>	69
3.3.3	<i>Resultados del diseño</i>	77
3.3.4	<i>Análisis de sensibilidad</i>	78
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
5.	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	86
A.	MECÁNICA DE SUELOS DEL PUERTO SAN VICENTE	86
A.1	ZONA A (SECTOR ROMPEOLAS)	86
A.2	ZONA B (SECTOR COSTANERA).....	86
A.2.1	<i>Clasificación del Suelo</i>	87
A.2.2	<i>Proctor Modificado</i>	88
A.2.3	<i>Capacidad de Soporte CBR</i>	88
A.3	ZONA C (SECTOR PATIO DE CONTENEDORES).....	89
A.3.1	<i>Estratigrafía</i>	89
A.3.2	<i>Clasificación del suelo</i>	89
A.3.3	<i>Proctor Modificado</i>	90
A.3.4	<i>Capacidad de Soporte CBR</i>	90
A.4	ZONA D (SECTOR PATIO DE CONTENEDORES).....	91
A.4.1	<i>Estratigrafía</i>	91
A.4.2	<i>Clasificación del suelo</i>	92
A.4.3	<i>Proctor Modificado</i>	93

A.4.4	Capacidad de Soporte CBR.....	93
A.5	ZONA E (SECTOR PATIO DE CONTENEDORES)	94
A.5.1	Estratigrafía.....	94
A.5.2	Clasificación del suelo.....	94
A.5.3	Proctor Modificado	95
A.5.4	Capacidad de Soporte CBR.....	95
B.	DISTRIBUCIÓN DE CARGA DEL PUERTO DE VALPARAÍSO.....	96
C.	DATOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	98
C.1	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL FRENADO	98
C.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL FRENADO + ACELERACIÓN	99
C.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA TRÁNSITO LIBRE	100

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución granulométrica del adoquín	7
Tabla 2. Factores de conversión de vehículos.....	12
Tabla 3. Mejoramiento capacidad de soporte.	12
Tabla 4. Clasificación del terreno según CBR.....	13
Tabla 5. Módulos de elasticidad y Poisson	16
Tabla 6. Proporción de contenedores de 40 ft y 20 ft (Puertos Británicos) ...	18
Tabla 7. Factores dinámicos	19
Tabla 8. Cargas de pavimento por apilamiento	20
Tabla 9. Factores de proximidad de ruedas.....	23
Tabla 10. Factores de conversión de materiales	31
Tabla 11. Espesores de coronación y subbase.	32
Tabla 12. Cargas y presiones de equipos.....	39
Tabla 13. Categorías de tráfico.....	51
Tabla 14. Espesores Puerto de Gaza en área multipropósito.....	55
Tabla 15. Espesores Puerto de Gaza en área de acceso.....	55
Tabla 16. Espesores Puerto de Gaza en área de almacenamiento.....	56
Tabla 17. Cargas que produce el equipo.	66
Tabla 18. Resultados de estructuración de pavimento	77
Tabla 19. Distribución granulométrica sector costanera	87
Tabla 20. Distribución granulométrica sector costanera muelle.....	89
Tabla 21. Distribución granulométrica patio contenedores reefer rack	92
Tabla 22. Distribución granulométrica patio contenedores	94
Tabla 23. Distribución de carga en el puerto de Valparaíso	96
Tabla 24. Análisis de sensibilidad para el efecto dinámico de frenado	98
Tabla 25. Análisis de sensibilidad para el efecto dinámico de frenado + aceleración.....	99
Tabla 26. Análisis de sensibilidad para el tránsito libre.....	100

Índice de figuras

Figura 1. Estructura típica de un pavimento de adoquines trabado.	6
Figura 2. Adoquín dentado Tipo A	8
Figura 3. Colocación de adoquines en aparejamiento espina de pescado	9
Figura 4. Adoquín dentado Tipo B	9
Figura 5. Espesores subbase eje simple.	14
Figura 6. Espesores subbase grúa Hyster 620	14
Figura 7. Daño en esquinas por efecto de apilamiento.....	21
Figura 8. Cargador Frontal.....	23
Figura 9. Grúa a Horcajada.	25
Figura 10. Cargador lateral	26
Figura 11. Pórtico de almacenamiento	27
Figura 12. Camión mas remolque.....	28
Figura 13. Grúa móvil.	29
Figura 14. Composición del pavimento.....	30
Figura 15. Ábaco de diseño de base para hormigón H10.....	33
Figura 16. Diagrama flujo resumido del Método BPA	34
Figura 17. Diagrama de flujo detallado Método BPA.	35
Figura 18. Foto aérea SVTI.	57
Figura 19. Plano SVTI sectores según condiciones geotécnicas.....	60
Figura 20. Reach Stacker KH11-0199	65
Figura 21. Esquema de dimensiones Reach Stacker.	66
Figura 22. Cargas de rueda del Reach Stacker para el frenado	70
Figura 23. Espesor de Base H10 para Frenado	71
Figura 24. Cargas de rueda del Reach Stacker para el frenado + aceleración	72
Figura 25. Espesor de Base H10 para frenado + aceleración	73
Figura 26. Cargas de rueda del Reach Stacker para el transito libre.....	74
Figura 27. Espesor de Base H10 para el transito libre.....	75

Figura 28. Espesor de Base H10 para el acopio de contenedores	76
Figura 29. Gráfico de espesores de Base Tratada H10 para distintos números de pasadas y condiciones de tránsito	78
Figura 30. Distribución de carga total de contenedores en el puerto de Valparaíso.....	97

1. INTRODUCCIÓN

1.1 General

Chile es un país con vocación exportadora, esto se ve reflejado en el porcentaje que ésta representa en el Producto Interno Bruto (PIB). El 96% de las exportaciones se hace a través de vía marítima [10], posicionando al sistema portuario en un lugar de privilegio, ya que, de este depende en gran medida el desarrollo de país. Los puertos se han visto en la necesidad de poseer infraestructuras flexibles, que respondan a los cambios que se presentan constantemente en la dinámica portuaria.

Por esta misma flexibilidad requerida en los puertos del mundo y de Chile, nacen nuevas formas de pavimentación. En 1883 arribó a Valparaíso el primer cargamento de adoquines artificiales que fueron empleados en la pavimentación de algunas calles de ese puerto [4]. Evidentemente, dichos adoquines estaban fabricados con cemento, producto cuya utilización comenzaba a difundirse a nivel mundial en esa época. Con esto surge la necesidad de poder investigar el comportamiento de los adoquines expuestos a cargas de tránsito y acopiamiento, por lo mismo, varios países líderes en investigación portuaria realizaron distintos desarrollos en la materia, entre los que se destacan las normas británicas a través de la British Ports Association BPA y las recomendaciones marítimas españolas ROM.

1.2 Alcances y Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Este trabajo busca evaluar la metodología de diseño de pavimentos portuarios en el Puerto San Vicente (SVTI) y las implicancias de las cargas y condiciones del terreno que afectan en el. Esto a raíz de reiteradas fallas que se han producido en la pavimentación con el sistema de adoquines en algunas zonas del puerto, además se desea poder evaluar actualmente las condiciones que limitan el diseño y así poder entregar una solución alternativa de pavimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar las distintas normas o recomendaciones que existen para el diseño de pavimentos de adoquines.
- Identificar cual de las normas o recomendaciones se ajustan mejor a la realidad de un puerto chileno, en este caso el puerto San Vicente.
- Estudiar e identificar las variables que determinan el diseño de pavimento de adoquines en el Puerto San Vicente.
- Analizar la importancia de los factores dinámicos en el diseño de pavimentos de adoquines en el Puerto San Vicente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Pavimentos rígidos

Los pavimentos típicamente rígidos, son los de concreto. Estos pavimentos difieren mucho de los de tipo flexible. Los pavimentos de concreto reciben la carga de los vehículos y la reparten a un área de la sub-rasante. La losa por su alta rigidez y alto módulo elástico, tiene un comportamiento de elemento estructural de viga.

Las leyes que rigen la transmisión de las presiones ejercidas por carga superficiales a través de suelos homogéneos, se ajustan bastante a las teorías de Boussinesq y de Froehlich [11]. La primera supone un módulo de deformación E constante en las capas que conforman la calzada y el terreno de fundación. El segundo admite la presencia de capas con módulos de elasticidad diferentes, especialmente en las capas superiores, donde este valor suele ser varias decenas de veces más elevado que en el terreno. En este caso, la repartición de presiones se efectúa a través de un área más extensa y los valores de las presiones son menores. Sin embargo ambas teorías suponen las capas formadas por materiales sin o con muy poca cohesión. Cuando aparecen una o varias capas que hacen perder esta homogeneidad, estas teorías ya no tienen aplicación.

Es lo que sucede con los pavimentos rígidos, donde la losa de concreto, por su capacidad de absorber esfuerzos de flexo-tracción, distribuye las presiones superficiales a un área mucho más extensa en las capas inferiores, siguiendo una ley de distribución totalmente distinta a las antes mencionadas.

2.2 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles se denominan a los que la estructura total del pavimento se deflecta o flexiona, un pavimento flexible se adapta a las cargas. Si bien algunas capas superficiales bituminosas, producen algún “efecto de losa”, este es muy pequeño, debido al bajo límite de fluencia de los materiales, que al fin fallan por tracción en sus fibras inferiores, aun bajo el efecto de cargas livianas, en particular si estas son estáticas y de acción prolongada. Pero se ha comprobado que son las cargas pesadas las que producen el deterioro de los pavimentos. Bajo la acción de estas cargas, el “efecto de losa” desaparece y el material bituminoso pasa a ser considerado como material homogéneo. Por este motivo, para los pavimentos flexibles se pueden aplicar las teorías clásicas de distribución de presiones de los suelos.

De ellas se deduce que el valor de las presiones en un punto dado dentro de un terreno homogéneo depende del espesor de la calzada encima de dicho punto y no de la calidad de las capas que componen el pavimento.

2.3 Pavimentos de adoquines

Los pavimentos de adoquines no pueden considerarse rígidos, pues si bien se producen momentos de flexión locales en la extensión de cada adoquín, estos se anulan en la junta con el adoquín vecino. Sin embargo, los adoquines no actúan independientemente. Existe una transmisión de esfuerzos a los adoquines vecinos por esfuerzo de corte. Este existiría en la medida que no supere en magnitud al esfuerzo de fricción generado entre las paredes de los adoquines por la arena fuertemente comprimida entre ellas. En un análisis efectuado por el profesor J. Knapton [12] concluyo que la distribución de presiones a través de distintos elementos que conforman el pavimento flexible, se distribuye en las diferentes capas que conforman a este. Por ende los pavimentos de adoquines no son considerados rígidos ni tampoco flexibles, pues poseen una mezcla de efectos de los dos.

El uso de adoquines de hormigón ha tenido un crecimiento explosivo en los últimos 20 años en el mundo y Chile no ha estado fuera de esta tendencia. Las claras ventajas que representa el uso de adoquines han favorecido su utilización en múltiples obras.

2.3.1 Ventajas del Pavimento de adoquines en puertos

Este tipo de pavimentos ofrece a los proyectistas ventajas estructurales, bajo costo y una alta versatilidad en las zonas de un puerto.

Estas características especiales que fundamentalmente se derivan de la naturaleza del pavimento, del sistema constructivo empleado y de la fabricación industrial de los adoquines, permiten explicar las diversas ventajas que presenta su utilización, entre estas se pueden mencionar:

- Una combinación de baja relación agua – cemento, baja absorción y alta compacidad, características que en general poseen los adoquines fabricados industrialmente, permiten que estos elementos resistan mejor que otros tipos de pavimentos la acción agresiva de combustibles y aceites; además, les confieren una gran durabilidad que sobrepasa la vida de diseño del pavimento. Esto permite reutilizarlos en un gran porcentaje al reconstruir un pavimento.
- Debido a la sencillez del proceso constructivo, no se requiere mano de obras especializada ni maquinaria especial, como se trabaja en pequeñas zonas a la vez cualquier área se puede reconstruir por etapas.
- Si el pavimento de adoquines se diseña y construye apropiadamente es capaz de soportar cargas muy altas, como las que existen en puertos o patios de instalaciones industriales, siendo esta la principal ventaja para la opción de pavimentos de adoquines.
- Por su rugosidad los pavimentos de adoquines tienen una mayor resistencia al deslizamiento que los pavimentos tradicionales.
- Los pavimentos de adoquines pueden ser entregados al tránsito inmediatamente después de su construcción.

2.3.2 Diseño de pavimentos de adoquines de Hormigón.

Estos pavimentos se diferencian de las demás formas de pavimentación con hormigón, fundamentalmente, por estar contruidos a base de unidades independientes de pequeño tamaño, que interactúan entre sí debido a la trabazón que se producen entre ellas.

La estructura típica de pavimento de adoquines en la que se muestra en la Figura 1 se puede distinguir los siguientes elementos:

- Capa de rodado compuesto por los adoquines.
- Cama de arena.
- Base compuesta por materiales escogidos de mejor calidad que el suelo de fundación.
- Restricción de borde: elementos de confinamiento en todos los bordes de área pavimentada.
- Subrasante.

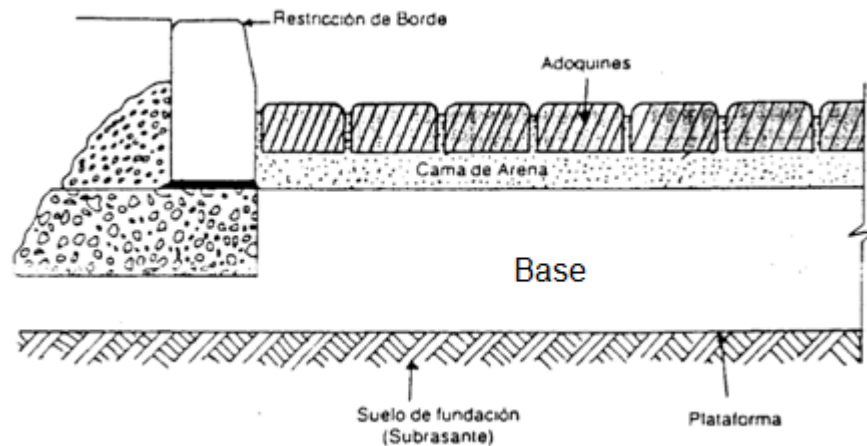


Figura 1. Estructura típica de un pavimento de adoquines trabado. [4]

2.3.3 Componentes de un adoquín (materiales)

Los adoquines (del árabe “*ad-dukkân*”, "piedra escuadrada") son piedras o bloques labrados y de forma rectangular que se utilizan en la construcción de pavimentos, los más comunes son hechos de hormigón. Los requisitos del hormigón para la fabricación de adoquines son las siguientes:

Cemento

El Cemento empleado en la fabricación de adoquines debe cumplir con las especificaciones contenidas en la norma NCh 148 para grados corrientes o alta resistencia.

Áridos

Los agregados finos y gruesos son compuestos de materiales naturales o triturados, que aparte de la graduación cumplen con los requisitos de la norma NCh 163.

Tamiz		% que pasa en peso	
NCh (mm)	ASTM	Fabricación en mesa vibradora	Fabricación con equipo neumático
20	3/4"	100	
12.5	1/2"	75 – 85	
10	3/8"	60 – 72	100
5	Nº 4	42 – 58	50 – 90
2,5	Nº 8	35 – 50	40 – 65
1,25	Nº 16	30 – 42	32 – 50
0,63	Nº 30	20 – 35	24 – 37
0,315	Nº 50	10 – 22	16 – 25
0,160	Nº 100	2 - 10	8 – 14

Tabla 1. Distribución granulométrica del adoquín. [4]

Los áridos son preferentemente de formas redondeadas o cúbicas. Granos de formas planas o alargadas no proporcionan buenas resistencias a la compresión. La banda granulométrica recomendada para el árido combinado se presenta en la Tabla 1.

Agua

El agua debe ser muy pura y cumplir con las condiciones especificadas en la norma NCh 1498, referente a agua de amasado para hormigones.

2.3.4 Características de los adoquines

La forma de los adoquines incide en el comportamiento global del pavimento; por ello se los ha agrupado en diferentes categorías, de acuerdo a la mayor o menor contribución que realicen a la capacidad resistente de la estructura.

2.3.5 Clasificación de los adoquines

Adoquines dentados Tipo A

Se entrelazan entre sí en los cuatro costados, capaces de ser aparejados en “espina de pescado” (ver Figura 3) y que, por su geometría plana, al unirse, resisten el desplazamiento relativo, tanto en sentido longitudinal como transversal.

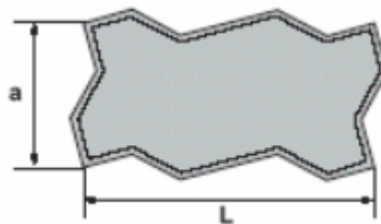


Figura 2. Adoquín dentado Tipo A, según las siguientes medidas a:8 cm y L:20 cm



Figura 3. Colocación de adoquines en aparejamiento espina de pescado. (Elaboración propia)

Adoquines dentados Tipo B

Estos se entrelazan en dos costados, que no pueden aparejarse en “espina de pescado” y que por su geometría plana, resisten desplazamientos relativos solo en las caras paralelas a los ejes longitudinales, dependiendo de su precisión dimensional y de la precisión de colocación para que traben en las otras caras.

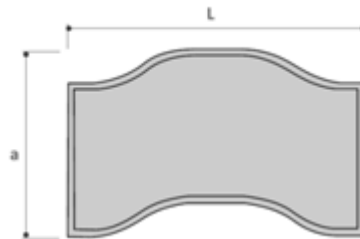


Figura 4. Adoquín dentado Tipo B, según las siguientes medidas a:11,7 cm y L:22,1 cm

2.3.6 Transmisión de esfuerzos

En los pavimentos de adoquines, la capacidad estructural de rodado está dada fundamentalmente por la transmisión de esfuerzos entre elementos vecinos.

Según los ensayos del profesor Knapton*, ha demostrado que por efecto de la transmisión de esfuerzos verticales entre adoquines, las presiones aplicadas sobre la superficie del pavimento pueden llegar a reducirse en un 40% a nivel de la base, haciendo evidente la capacidad estructural de esta capa.

El mecanismo que permite la transmisión de esfuerzo entre los adoquines se denomina “trabazón” y se define como la capacidad de estos elementos para resistir un desplazamiento relativo con respecto a sus vecinos.

Una buena trabazón le confiere a los adoquines la capacidad de transmitir las cargas superficiales aplicadas en áreas pequeñas, ampliándolas a áreas más extensas de la capa de la base manteniendo las presiones en la base o dentro de los límites admisibles.

La propiedad de distribución de cargas va mejorando con el uso, produciéndose progresivamente un estado de trabazón total llamado “hermeticidad”, la capa de rodadura va adquiriendo mayor rigidez y los adoquines dejan de constituir una mera capa de desgaste para transformarse en una capa estructural.

Una vez lograda esta “hermeticidad”, el pavimento adquiere una condición de equilibrio que no es afectada significativamente, ni por el volumen de tránsito, ni por la magnitud de las cargas de la rueda, dentro de un rango de 2,4 a 7 toneladas [4].

() John Knapton, profesor de ingeniería estructural de la Universidad de Newcastle, Inglaterra. Sus investigaciones en el año 1970 lo llevaron a publicar su primera edición hecha para la British Ports Association.*

2.4 Normas de diseño de pavimentos portuarios

En la actualidad existen varios países que poseen normas propias de diseño de pavimentos portuarios de las cuales las más utilizadas son las normas británicas (BPA), las recomendaciones de obras marítimas (ROM) de España y el método australiano de pavimentos. En Chile existen organismos públicos y privados que han publicado diferentes instructivos sobre la pavimentación con bloques de adoquín, recogiendo experiencias de los países más avanzados en el tema. De estas últimas se puede mencionar el Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos de Adoquines del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (ICH) y el Manual de Pavimentos Portuarios del MOP.

2.4.1 Manual de Diseño y Construcción (ICH)

Este manual es de carácter instructivo y de muy fácil asimilación. Utiliza un gran número de tablas y gráficos para el diseño del pavimento de adoquín, tomando como unidad de equivalencia las cargas de una **grúa horquilla Hyster 620** la cual es tomada como vehículo patrón.

Primeramente hace recomendaciones para el análisis de tránsito por las zonas a diseñar, clasificando éstas en pavimentos urbanos y pavimentos industriales.

2.4.1.1 Cargas Portuarias

Los pavimentos en áreas de almacenamiento en los puertos y también en algunas industrias están sometidos a cargas concentradas de gran magnitud, con pesos por eje superiores a las 14 toneladas.

La Tabla 2 muestra varios vehículos típicos en maniobras portuarias, para el cálculo de estos vehículos la grúa horquilla Hyster 620 se ha tomado como vehículo patrón.

Vehículo	Pasada equivalente Grúa Hyster 620
Grúa-horquilla Hyster 620	1,00
Grúa-Horquilla Caterpillar 988B	2,40
Carro de arrastre Shoremaster	0,03
Carro de arrastre Clark 512	0,43
Carro de arrastre Belotti B67b	0,71
Grúa de 80 ton	0,05
Grúa de 140 ton	0,21

Tabla 2. Factores de conversión de vehículos. [4]

2.4.1.2 Subrasante

La causa principal de fallas en los pavimentos de adoquines son las deformaciones originadas por las tensiones de corte que se producen al paso de los vehículos. Desde este punto de vista, la correcta determinación de la resistencia del terreno es casi más importante que el diseño mismo de los espesores de pavimento.

La capacidad resistente de los suelos se determina a través del ensayo Capacidad de Soporte California, CBR. Este ensayo se debe aplicar con la muestra completamente saturada, pues es la condición más desfavorable para el diseño. Si el nivel freático está comprendido dentro de los 60 cm bajo el nivel de la plataforma, es mejor mantener el valor de CBR saturado. Si dicho nivel está por debajo de los 60 cm, bajo la plataforma, el CBR de diseño se debe incrementar tal como se muestra en la Tabla 3.

CBR de diseño saturado	Mejoramiento en CBR de diseño
2% o menos	+ 1%
3 a 10 %	+ 2%
10% o mas	No se recomienda cambio

Tabla 3. Mejoramiento capacidad de soporte. [4]

La Tabla 4 muestra una clasificación general de acuerdo a la calidad del terreno.

Tipo de Terreno	Capacidad resistente CBR
Excelente	20 o más.
Bueno	10 a 19
Regular	6 a 9
Malo	3 a 5
Pésimo	<3

Tabla 4. Clasificación del terreno según CBR. [4]

2.4.1.3 Subbase

Al igual que con otros pavimentos la subbase (llamada base en otros manuales, la cual se le dice a la capa bajo la cama de arena) tiene por objeto absorber las presiones de recibe de las capas superficiales y transmitir uniformemente al terreno de fundación.

Subbases granulares

El espesor de la capa de subbase granular para el caso de pavimentos industriales se puede obtener de la Figura 5 y la Figura 6, para pavimentos normales y pavimentos portuarios. Para ello se deberá conocer el número de pasadas, la cual tiene directa relación con la vida útil del proyecto y la capacidad de soporte de la subbase, para así obtener finalmente el espesor adecuado.

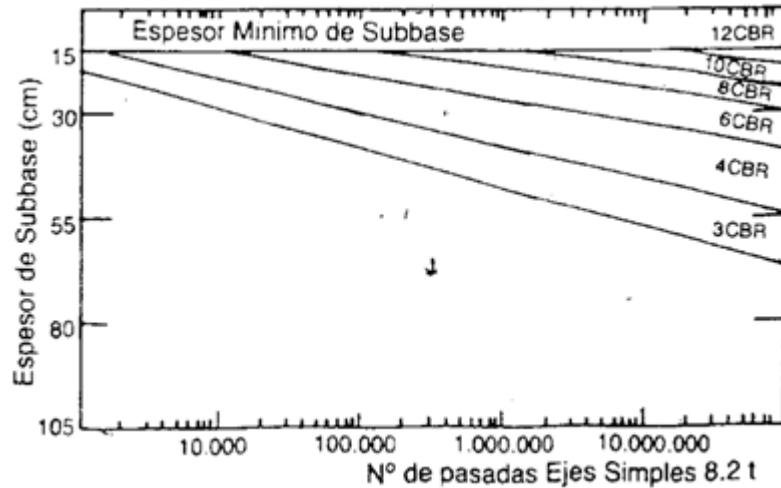


Figura 5. Espesores subbase eje simple. [4]

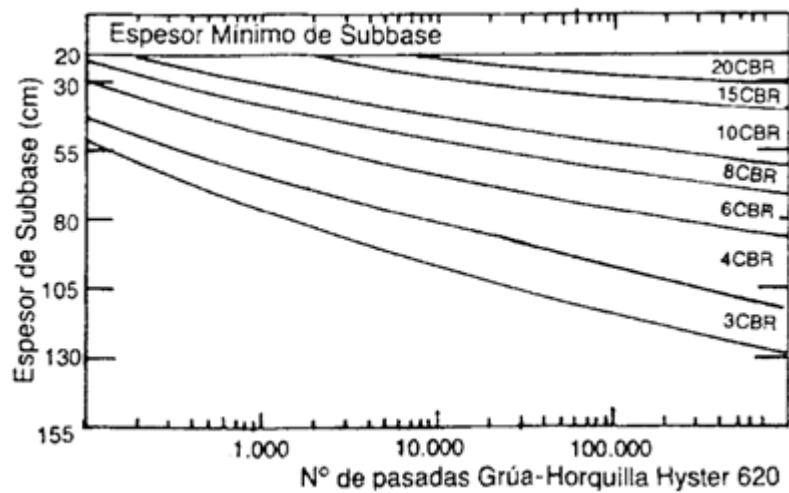


Figura 6. Espesores subbase grúa Hyster 620. [4]

Subbases tratadas con cemento

Los materiales de subbase pueden ser estabilizados con cemento para mejorar el comportamiento y reducir el espesor total del pavimento. Se recomienda su utilización en caso de presentarse cargas particularmente altas o cuando se desee rigidizar la estructura del pavimento, a fin de mantener regularidad superficial dentro de límites más estrictos.

El factor de conversión entre subbase granular y subbase tratada, así como las características del material tratado son idénticos a los indicados en la Tabla 2.

2.4.1.4 Base

La base es una capa intermedia que se sitúa sobre la subbase y bajo la carpeta de rodado y que en el caso de los pavimentos de adoquines consiste en una cama de arena de espesor constante de 30 mm una vez producida su compactación.

Se trata fundamentalmente de una capa nivelante, que ayude a la transmisión de repartición de esfuerzos verticales que provee el material para conseguir y mantener la adecuada trabazón entre los adoquines.

2.4.1.5 Superficie de Rodado

Tal como se mencionó al analizar el comportamiento de los pavimentos de adoquines, la forma y espesor de las unidades así como el aparejo que se utilice afecta la capacidad estructural del pavimento.

La resistencia de los adoquines dentro de los rangos usuales no tiene influencia en este aspecto y son considerados de durabilidad las que determinan su magnitud.

2.4.2 Manual Británico de Diseño de Pavimentos Portuarios (BPA)

Este manual ha sido desarrollado principalmente por el profesor John Knapton para la British Ports Association quien ha hecho años de estudios sobre pavimentos de hormigón, con mezclas bituminosas y bloques de hormigón (adoquines).

El método se basa en un modelo semi empírico, pues toma valores de tensiones admisibles utilizando el método de elementos finitos, pero también toma valores obtenidos de la experiencia que ha tenido el profesor Knapton y el trabajo de la AASHTO con su guía de diseño de pavimentos estructurales.

Las propiedades de los materiales que fueron utilizados para el diseño del modelo se presentan en la Tabla 5.

Capa	Modulo de elasticidad E(MPa)	Poisson
Superficie (pavimento y arena)	4000	0,15
Base tratada con cemento (10 Mpa)	35000	0,15
Sub-base granular	300	0,20
Corona granular*	150	0,25
Rasante	10·CBR	0,25

Tabla 5. Módulos de elasticidad y Poisson. [3]

(*) Corona granular: capa granular de bajo costo con una capacidad de soporte del suelo CBR mayor al 15% y una plasticidad máxima PL del 10%.

2.4.2.1 Evaluación de cargas

En este manual las cargas se convierten a “cargas únicas equivalentes”, las cuales determinan el espesor de la base a utilizar. Estas usualmente no son valores únicos que caractericen la situación operacional. Consecuente con esto, la información recogida sobre varias cargas deriva a un uso de una carga única equivalente para ser usada en ábacos que se presentan más adelante.

2.4.2.2 Valor de carga sobre una rueda

Los valores de cargas de rueda dependen del rango de los pesos de los contenedores que se manejen. Estos están definidos como cargas cuyo valor y número de repeticiones lleven al mayor daño en el pavimento. Un número menor de repeticiones de altas cargas es menos dañino que un número elevado de repeticiones de cargas pequeñas, por lo cual un diseño queda muy condicionado por el número de repeticiones que haga la carga en un mismo punto.

La Tabla 6 muestra las distribuciones de pesos de contenedores para los diferentes puertos del Reino Unido, proporcionales a contenedores de 20 pies y 40 pies, que muestra que el peso del contenedor más común es el de 21000 kg.

Para diferentes pesos de contenedores se calcula el efecto dañino causado por la maquinaria portacontenedores lo cual se muestra en la ecuación 1.

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

Donde D es el efecto dañino, W la carga específica sobre la rueda en kg, P la presión de la rueda en MPa y N el valor de porcentaje obtenido del peso del contenedor obtenido en la Tabla 6, que representa el peso crítico del contenedor en kg.

Peso contenedor (kg)	Proporción de contenedores de 40 pies a contenedores de 20 pies				
	100/0	60/40	50/50	40/60	0/100
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,00	0,18	0,23	0,28	0,46
3000	0,00	0,60	0,74	0,89	1,49
4000	0,18	1,29	1,57	1,84	2,95
5000	0,53	1,90	2,25	2,59	3,96
6000	0,98	2,17	2,46	2,76	3,94
7000	1,37	2,41	2,67	2,93	3,97
8000	2,60	3,05	3,16	3,27	3,72
9000	2,82	3,05	3,11	3,17	3,41
10000	3,30	3,44	3,48	3,52	3,66
11000	4,43	4,28	4,24	4,20	4,04
12000	5,73	5,24	5,12	4,99	4,50
13000	5,12	4,83	4,76	4,69	4,41
14000	5,85	5,38	5,26	5,14	4,67
15000	4,78	5,12	5,21	5,29	5,63
16000	5,22	5,58	5,67	5,76	6,13
17000	5,45	5,75	5,83	5,91	6,21
18000	5,55	5,91	6,00	6,10	6,46
19000	6,08	6,68	6,83	6,98	7,58
20000	7,67	8,28	8,43	8,58	9,19
21000	10,40	8,93	8,56	8,18	6,72
22000	9,95	7,60	7,02	6,43	4,08
23000	5,53	4,31	4,00	3,69	2,47
24000	2,75	1,75	1,50	1,25	0,24
25000	0,95	0,63	0,55	0,47	0,15
26000	0,67	0,40	0,33	0,27	0,00
27000	0,72	0,43	0,36	0,29	0,00
28000	0,53	0,32	0,27	0,21	0,00
29000	0,43	0,26	0,22	0,17	0,00
30000	0,28	0,17	0,14	0,11	0,00
31000	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00
32000	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00
33000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
34000	0,05	0,03	0,02	0,02	0,00

Tabla 6. Proporción de contenedores de 40 ft y 20 ft (Puertos Británicos). [3]

Para el cálculo de equivalencia de tránsito que posee las ruedas sucesoras a la rueda que toma la mayor carga, se calcula como muestra en la ecuación 2.

$$\text{Ec. (2)} \quad \text{Equiv. Rueda } N = \left(\frac{\text{Carga de rueda } N}{\text{Carga de rueda mayor}} \right)^{3.75}$$

2.4.2.3 Ruedas

El área de contacto bajo una rueda de un equipo portacontenedores es asumida como una presión circular equivalente a la presión de la rueda. Cuando las ruedas están muy infladas y con cargas muy altas la presión de contacto no es circular pero los efectos de este caso son despreciables.

2.4.2.4 Efectos dinámicos

Los efectos inducidos por cargas dinámicas se presentan por aceleración, frenado, en esquinas y por trabajo en superficies desniveladas, estos efectos son tomados en cuenta por el factor f_d . Donde una sección de pavimento es sujeta a estos efectos dinámicos, donde las cargas son ajustadas por factores que se presentan en la Tabla 7.

Condición	Tipo de equipo	f_d
Frenado	Reach Stacker	±30%
	Straddle Carrier	±50%
	Side Lift Truck	±20 %
	Tractor and Trailer	±10 %
Esquinas	Reach Stacker	±40%
	Straddle Carrier	±60%
	Side Lift Truck	±30 %
	Tractor and Trailer	±30 %
Aceleración	Reach Stacker	±10%
	Straddle Carrier	±10%
	Side Lift Truck	±10 %
	Tractor and Trailer	±10 %
Superficies desniveladas (efecto olas)	Reach Stacker	±20%
	Straddle Carrier	±20%
	Side Lift Truck	±20 %
	Tractor and Trailer	±20 %

Tabla 7. Factores dinámicos. [3]

Nota: Si dos o tres de estas condiciones son aplicadas simultáneamente, estos efectos se deben sumar, por ejemplo, si la carga estática de la rueda delantera fuese 20.000 kg y se consideren el efecto dinámico de frenado (30%) + aceleración (10%) para un equipo, se deben sumar los efectos como:

$$20.000 \text{ kg} + 20.000 \text{ kg} \cdot (30\%+10\%) = 28.000 \text{ kg}$$

2.4.2.5 Valores de cargas por apilamiento de contenedores

Usualmente los contenedores en zonas portuarias se apilan uno sobre el otro, para así reducir espacio superficial. Este apilamiento de contenedores está condicionado a variables propias del puerto en operación, estos son el viento, sismo y capacidad de la maquinaria disponible. La Tabla 8 muestra los valores y para un apilamiento máximo de 8 contenedores posicionados uno sobre el otro, la superficie de contacto en las esquinas de los contenedores son de 175 mm x 150 mm. Es poco probable que todos estos contenedores apilados estén cargados completamente, por lo cual se utilizan factores de reducción según el número de contenedores apilados y la distribución que estos tengan, estos datos han sido obtenidos a través de estadísticas disponibles [5].

Altura de almacenamiento	Factor de reducción de peso	Cargas de pavimentos para cada distribución (kN)		
		Aislado	Filas*	Bloques**
1	0	81	162	323
2	10%	146	291	582
3	20%	194	388	776
4	30%	226	453	906
5	40%	243	485	970
6	40%	291	582	1164
7	40%	340	679	1358
8	40%	388	776	1552

Tabla 8. Cargas de pavimento por apilamiento. [5]

(*)Distribución en Filas: conjunto de contenedores colocados en filas, ya sea, de forma horizontal o vertical.

(**)Distribución en Bloques: conjunto de contenedores apilados en varias filas muy cercanas entre sí.

En la Figura 7 se muestra el efecto dañino que produce el apilamiento de contenedores en las esquinas



Figura 7. Daño en esquinas por efecto de apilamiento. [7]

2.4.2.6 Factores de proximidad de ruedas

La limitante activa en el diseño es la deformación por tracción horizontal en la fibra inferior de la base en el pavimento de adoquín. Si se considera solamente una rueda, la máxima deformación horizontal ocurre bajo el centro de la rueda y se reduce con la distancia desde ella. Si hay dos ruedas lo suficientemente juntas, la deformación bajo cada una de ellas se ve aumentada por una cierta cantidad debido al efecto de la otra.

Las cargas por rueda se modifican multiplicándolas por un factor de proximidad apropiado dado en la Tabla 9. Estos factores son obtenidos como se señala a continuación:

- Si la rueda próxima no fue considerada, las tensiones relevantes serían la tensión de tracción radial directamente debajo de la carga de rueda.
- Si hay una segunda rueda cerca, ésta genera tensiones tangenciales directamente debajo de la primera rueda. Esta tensión tangencial es sumada a la tensión radial contribuida a la primera rueda. El factor de proximidad es la relación entre la suma de estas tensiones y las tensiones de tracción resultantes de la primera rueda.

- Las ecuaciones 3 y 4 son para calcular la tensión radial y tangencial respectivamente:

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

$$\text{Ec. (4)} \quad \sigma_T = \frac{W}{2 \cdot \pi} \cdot [1 - 2 \cdot \nu] \cdot \left[\frac{z}{\alpha^{3/2}} - \frac{1}{\alpha + z \cdot \alpha^{1/2}} \right]$$

Donde σ_R es la tensión radial en Pa, σ_T es la tensión tangencial en Pa, W es la carga en kg, r es la distancia horizontal entre ruedas en m, z es la profundidad de la posición de tensiones a calcular en m, ν es el coeficiente de Poisson y por último $\alpha = r^2 + z^2$.

Cuando más de 2 ruedas están próximas, la tensión radial debajo de la rueda crítica puede ser incrementada tomando en cuenta la contribución de 2 o más tensiones tangenciales. La Tabla 9 muestra que el factor de proximidad depende del espaciamiento de las ruedas y de la Profundidad Efectiva del fondo de la base del pavimento. La Profundidad Efectiva puede ser calculada con la ecuación 5 y representa la profundidad de influencia que tiene sobre el terreno, medida en milímetros.

$$\text{Ec. (5)} \quad \text{Profundidad efectiva} = 300 \cdot \sqrt[3]{\frac{35000}{\text{CBR} \cdot 10}}$$

Donde el CBR = Razón de soporte California de la subbase.

Espaciamiento entre ruedas (mm)	Factor de proximidad para la profundidad efectiva para la base de:		
	1016 mm	2032 mm	3048 mm
300	1,82	1,95	1,98
600	1,47	1,82	1,91
910	1,19	1,65	1,82
1220	1,02	1,47	1,71
1830	1,00	1,19	1,47
2440	1,00	1,02	1,27
3660	1,00	1,00	1,02
4875	1,00	1,00	1,00

Tabla 9. Factores de proximidad de ruedas. [3]

2.4.2.7 *Calculo de cargas en equipos de manipulación*

Esta es un guía para calcular la fuerza que ejerce sobre la superficie de contacto para distintas maquinarias portuarias presentes en los puertos del mundo [7].

a. **Cargador frontal (front lift truck)**

Este es el vehículo más usado dentro de la actividad portuaria, un cargador frontal (ver Figura 8), equipo de circulación no restringida que se emplea para el traslado de mercancía general y de contenedores, con ruedas de neumáticos gemelas en el eje frontal y simple en el eje trasero, a veces dotado de pluma telescópica. En ocasiones la elevación de la carga se realiza mediante horquillas (cargador frontal de horquillas o front lift).

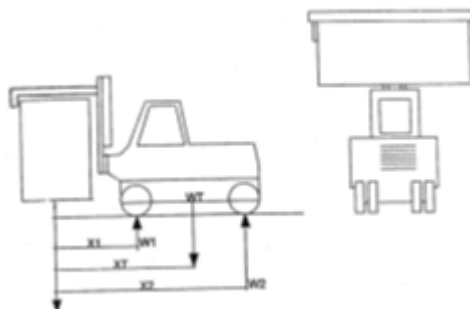


Figura 8. Cargador Frontal. [5]

La ecuación 6 y 7 expresan la fuerza que ejerce sobre la superficie en la rueda delantera y trasera de la maquina.

$$\text{Ec. (6)} \quad W_1 = F_d \cdot \frac{A_1 \cdot W_c + B_1}{2}$$

$$\text{Ec. (7)} \quad W_2 = F_d \cdot \frac{A_2 \cdot W_c + B_2}{2}$$

Donde W_1 es la carga en el eje frontal en kg, W_2 es la carga en el eje trasero en kg, W_c es el peso del contenedor en kg y F_d es el factor dinámico presente en la operación de la maquina.

$$\text{Ec. (8)} \quad A_1 = \frac{-X_2}{X_1 - X_2}$$

$$\text{Ec. (9)} \quad A_2 = \frac{-X_1}{X_1 - X_2}$$

$$\text{Ec. (10)} \quad B_1 = \frac{W_T \cdot (X_T - X_2)}{X_1 - X_2}$$

$$\text{Ec. (11)} \quad B_2 = \frac{W_T \cdot (X_T - X_1)}{X_2 - X_1}$$

X_1 , X_2 y W_T son mostrados en la Figura 8 y W_T es el Peso total.

b. Grúa a horcajadas (straddle carriers)

Equipo de circulación no restringida que se emplea para el traslado de mercancía general y de contenedores cuyas ruedas pueden tomar todas las direcciones, girando incluso totalmente alrededor del eje vertical (ver Figura 9).

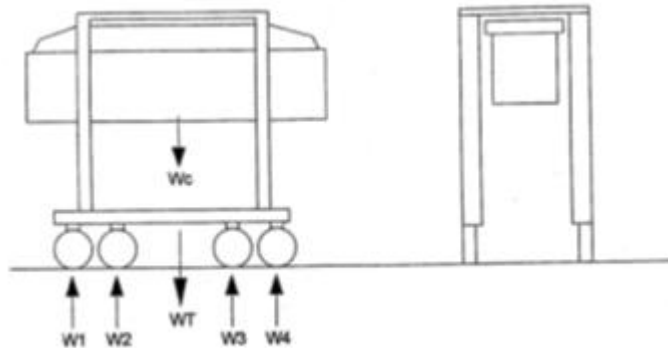


Figura 9. Grúa a Horcajada. [5]

La ecuación 12 expresa la fuerza ejercida que produce cada rueda de la grúa de horcajadas sobre la superficie de contacto.

$$\text{Ec. (12)} \quad W_i = F_d \cdot \left[U_i + \frac{W_c}{M} \right]$$

Donde W_i es la carga en cada rueda de apoyo para planta cargada U_i es la carga en cada rueda de apoyo descargada en kg, W_c es peso del contenedor en kg, M es el número de ruedas y F_d es el factor dinámico.

c. Cargador lateral (side loader lift trucks)

Equipo de circulación no restringida que se emplea para el traslado de contenedores y que en el momento de cargar o descargar se apoya sobre calzos estabilizadores., este tipo de maquinaria no es muy habitual en los puertos chilenos (Figura 10).

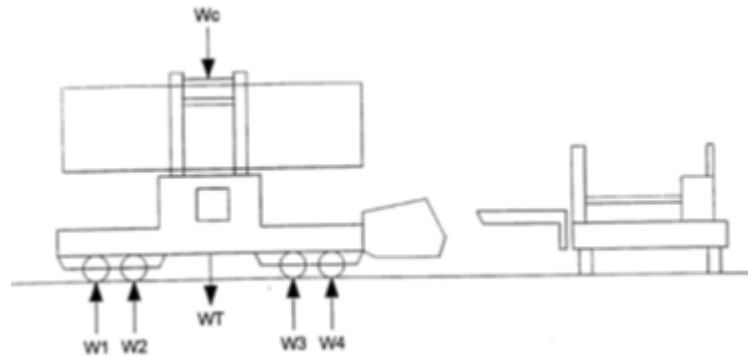


Figura 10. Cargador lateral. [5]

La carga en cada una de las ruedas se calcula mediante la ecuación 13.

$$\text{Ec. (13)} \quad W_i = F_d \cdot \left[U_i + \frac{W_c}{M} \right]$$

Donde W_i es la carga en cada rueda de apoyo cargada en kg, U_i es la carga en cada rueda de apoyo descargada en kg, W_c es el peso contenedor kg, M el numero de ruedas y F_d el factor dinámico.

d. Pórtico de almacenamiento (transtainers o yard gantry crane)

Equipo de movilidad restringida sobre rieles o neumáticos, dedicado a la manipulación de mercancía general y espaciamento de contenedores. (Ver Figura 11).

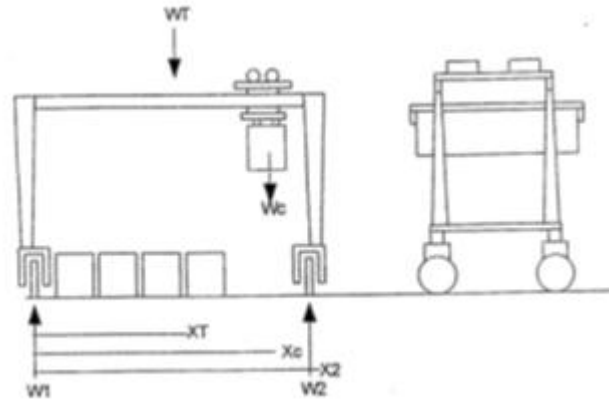


Figura 11. Pórtico de almacenamiento. [5]

La ecuación 14 y 15 expresan la fuerza que ejerce sobre la superficie en la rueda delantera y trasera del equipo.

$$\text{Ec. (14)} \quad W_1 = F_d \cdot \left[U_1 + \frac{W_C \cdot A_1}{M} \right]$$

$$\text{Ec. (15)} \quad W_2 = F_d \cdot \left[2 + \frac{W_C \cdot A_2}{M} \right]$$

Donde los factores A_1 y A_2 están presentados en las ecuaciones 16 y 17.

$$\text{Ec. (16)} \quad A_1 = 1 - \frac{X_C}{X_2}$$

$$\text{Ec. (17)} \quad A_2 = \frac{X_C}{X_2}$$

Donde W_1 es la carga en la rueda con carga en kg, W_2 es la carga en la rueda sin carga en kg, W_c es el peso del contenedor en kg, M el número de ruedas en el eje frontal (usualmente 2, 4 o 6), F_d el factor dinámico, U_1 el peso sin carga del pórtico de almacenamiento sobre la rueda del lado 1 en kg y U_2 el peso sin carga del pórtico de almacenamiento sobre la rueda del lado 2 en kg.

e. Camión más semirremolque (roll-trailers)

Vehículo de uso muy frecuente en la actividad portuaria, se opera en mayormente los accesos de un puerto, por lo cual es este tipo de vehículo el que condiciona el diseño de pavimento en los accesos de un terminal portuario (ver Figura 12).

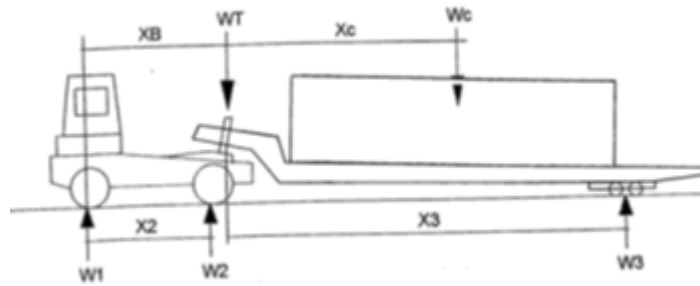


Figura 12. Camión mas remolque. [5]

Las ecuaciones 18,19 y 20 expresan la fuerza que ejerce sobre la superficie en la rueda delantera y trasera de la maquina.

$$\text{Ec. (18)} \quad W_1 = F_d \cdot \left[U_1 + \frac{W_c \cdot [1-A] \cdot [1-B]}{M_1} \right]$$

$$\text{Ec. (19)} \quad W_2 = F_d \cdot \left[U_2 + \frac{W_c \cdot [1-A] \cdot B}{M_2} \right]$$

$$\text{Ec. (20)} \quad W_3 = F_d \cdot \left[U_3 + \frac{W_c \cdot A}{M_3} \right]$$

$$\text{Ec. (21)} \quad A = \frac{X_c}{X_3}$$

$$\text{Ec. (22)} \quad B = \frac{X_b}{X_2}$$

Donde W_1 es la carga en las ruedas frontales en kg, W_2 es la carga en las ruedas traseras en kg, W_3 es el peso de la carrocería en kg, W_c es el peso del contenedor en kg, M_1 es el número de ruedas frontales, M_2 es el número de ruedas traseras, M_3 es el número de ruedas de la carrocería, F_d es el factor dinámico, U_1 es el peso sin carga del eje frontal del tracto camión en kg, U_2 es el peso sin carga del eje trasero del tracto camión en kg y U_3 es la carga en las ruedas de la carrocería en kg.

f. Grúa móvil (mobile cranes)

Grúa montada sobre neumáticos u orugas, capaz de desplazarse sin restricciones por toda una superficie (ver Figura 13).

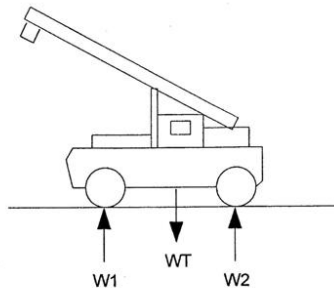


Figura 13. Grúa móvil. [5]

La fuerza que ejerce sobre cada rueda queda representada en la ecuación 23.

$$\text{Ec. (23)} \quad W_i = \frac{W_T}{M}$$

Donde W_T es el peso total de la Mobile Crane en kg y M el número total de ruedas.

2.4.2.8 Composición del pavimento

La composición del pavimento posee varias capas que se muestran en la pudiéndose dar el caso que no exista la capa de coronación si el CBR del terreno es mayor al 5%.

ADOQUINES (80 mm de espesor)
CAPA DE ARENA (30 mm de espesor)
CAPA DE BASE TRATADA (espesor calculado ver Figura 15)
CAPA DE SUB-BASE Espesor según Tabla 11
CAPA DE CORONACIÓN Espesor según Tabla 11

Figura 14. Composición del pavimento. [3]

Los bloques de adoquines son de 80 mm de espesor con un modulo de elasticidad de 4000 N/mm^2 y con un modulo de Poisson de 0,2.

La capa de Sub-Base debe estar hecha por un material de escoria o roca partida compuesta por 2 o más capas que posean un mínimo de capacidad de soporte CBR del 98% de la Densidad Máxima Compactada Seca (D.M.C.S).

La coronación es una capa granular la cual debe tener una capacidad de soporte CBR mayor al 15% del 95% de la D.M.C.S y un índice de plasticidad máximo del 10%.

El ábaco que se presentará en esta sección (ver Figura 15) está basado a una tensión de compresión de 10 MPa con una flexión de 2 MPa. El espesor de este material se puede extrapolar para materiales equivalentes, mediante factores de conversión presentados en la Tabla 10. Estos factores de conversión son obtenidos del manual de pavimentos de la AASHTO.

El material base se toma como una capa arenosa tratada con cemento (Base Tratada) capaz de resistir una tensión de compresión de 10 MPa a los 7 días y 28 días para un pavimento de hormigón.

Por ejemplo si tenemos una carga simple equivalente de 500 kN y un numero de pasadas de 250.000, ocupando el Abaco de la Figura 15, se obtiene un espesor 500 mm de base tratada con cemento. Si se deseara ocupar un material alternativo a la base con cemento, como por ejemplo un asfalto-base tratada de modulo de elasticidad de 2.414 MPa se debe multiplicaría los 500 mm de espesor obtenidos anteriormente por el factor de conversión de material, en esta caso un factor de 0,93, resultando una base de 465 mm de espesor de asfalto-base tratada.

Capa de Pavimento	Tensión de compresión (MPa)	Factor de conversión para una base tratada con cemento de 10Mpa
(i) Pavimento con calidad de hormigón	29	0,80
(ii) Pavimento con calidad de hormigón	38,6	0,70
(iii) asfalto-base tratada (Modulo=2414 MPa)	-	0,93
(iv) asfalto-base tratada (Modulo=1172 MPa)	-	1,40
(v) asfalto-base tratada (Modulo=621 MPa)	-	2,80
(vi) Base con cemento tratado (Modulo=7586 MPa)	10	1,00
(vii) Base con cemento tratado (Modulo=5655 MPa)	5,5	1,27
(viii) Base con cemento tratado (Modulo=4276 MPa)	2,9	1,75
(ix) Base con cemento tratado (Modulo=3241 MPa)	1	2,80
(x) Capa de sub-base granular (Modulo=145 MPa)	100% CBR	2,00
(xi) Capa de sub-base granular (Modulo=94 MPa)	22% CBR	2,80
(xii) Capa de sub-base granular (Modulo=83 MPa)	15% CBR	3,00
(xiii) Capa de sub-base granular (Modulo=48 MPa)	6% CBR	4,67

Tabla 10. Factores de conversión de materiales. [3]

2.4.2.9 Diseño por tabla y ábaco

Esta parte del manual considera la Tabla 11, la cual muestra los espesores de sub-base y coronación según corresponda la capacidad de soporte de la subrasante.

%CBR de Subrasante	Espesor de coronación (mm)	Espesor de sub-base (mm)
1	600	150
2	350	150
3	250	150
5 – 7	No requiere	225
10 – 30	No requiere	150

Tabla 11. Espesores de coronación y subbase. [3]

En la Figura 15 se muestra el ábaco con el cual se ingresa con un valor conocido del número de pasada que es capaz de resistir el pavimento, ubicando el número de pasadas en la curva correspondiente, si no coincide con los valores presentados en el ábaco se debe extrapolar. Luego de tener la curva se hace la intersección en el eje de las ordenadas considerando la carga simple equivalente, esta carga equivalente es el resultado del estudio de cargas visto en el punto 2.4.2.5 para cargas estáticas y en el punto 2.4.2.4 para cargas dinámicas, aplicando los factores correspondientes de corrección.

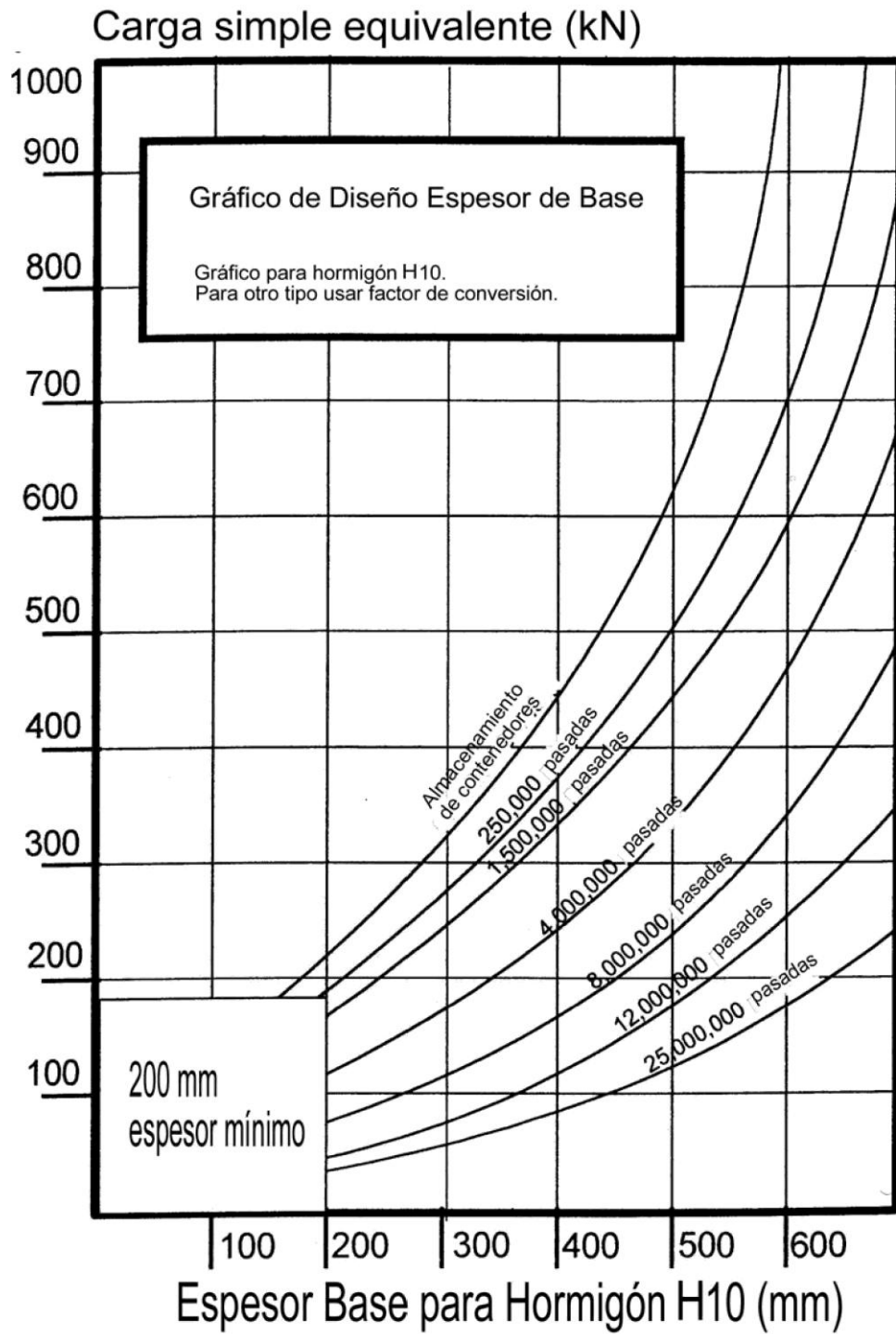


Figura 15. Ábaco de diseño de base para hormigón H10. [7]

Diagrama de flujo para el Método Británico de Diseño BPA.

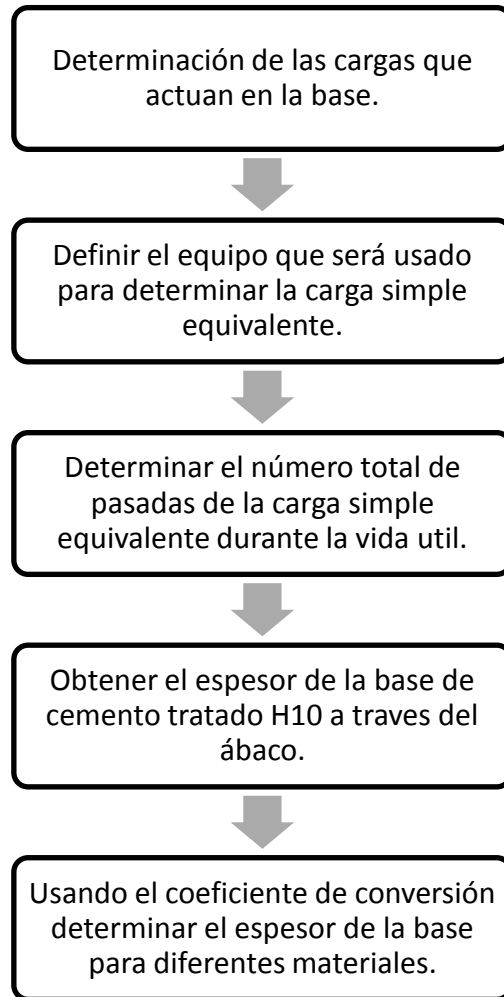


Figura 16. Diagrama flujo resumido del Método BPA. [1]

Diagrama de flujo detallado del Método BPA

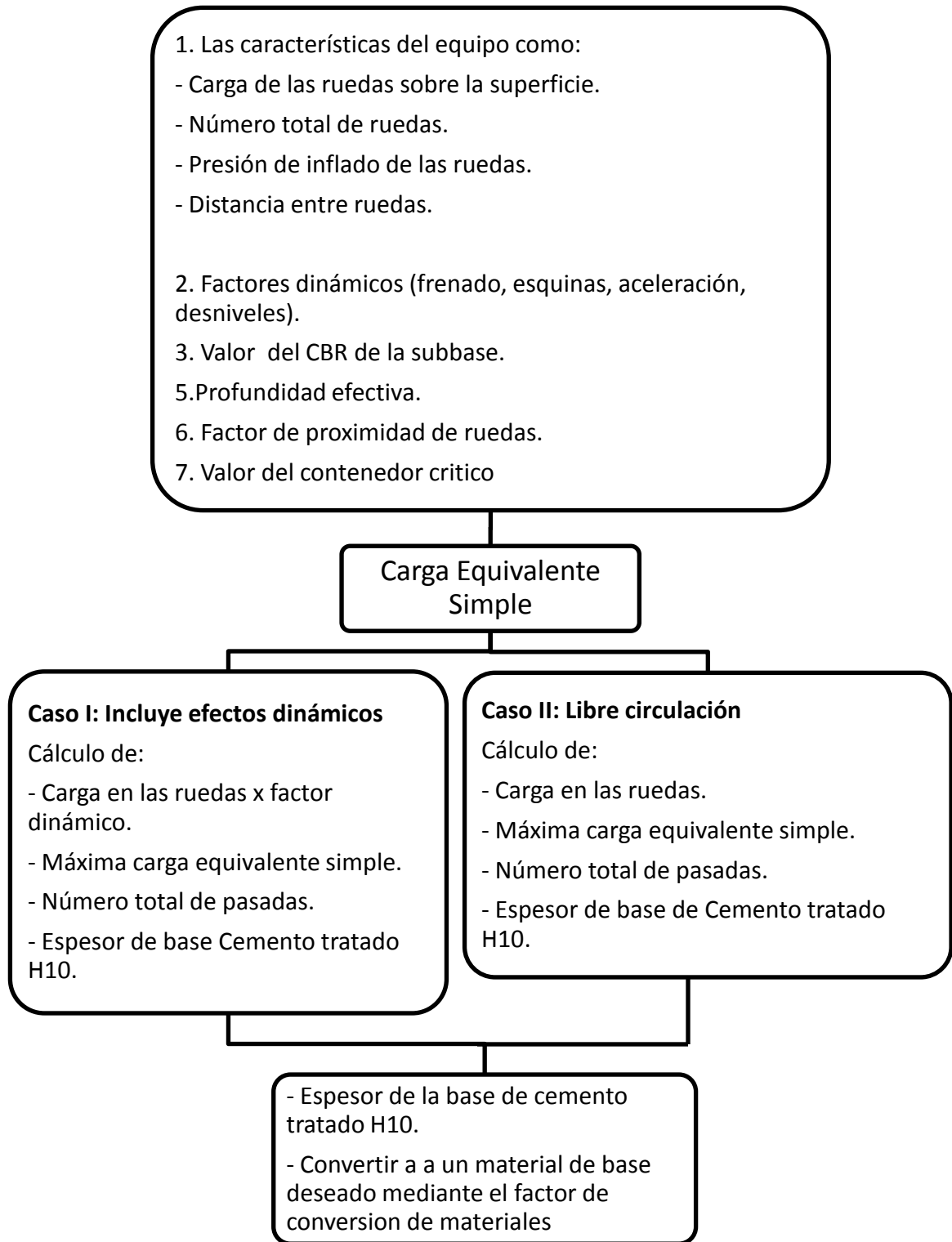


Figura 17. Diagrama de flujo detallado Método BPA. [1]

2.4.3 Recomendaciones de Obras Marítimas, España (ROM)

Como todas las normas referidas al diseño de pavimentación con adoquines se enfocan a distintos tipos de uso, ya sea, por su tráfico o finalidad, no es distinto para la norma española pues se sitúa en los usos más frecuentes de España, principalmente usos comerciales, con periodos de vida útil que van desde los 15 años hacia adelante, no dejando de lado situaciones especiales que sólo requieran 8 años de vida útil.

2.4.4 Caracterización de las cargas de diseño

2.4.4.1 Estudio de cargas

Estas se diferencian, por un lado en cargas que transmiten directamente al pavimento, ya sean cargas de almacenamiento y de estacionamiento y por otro lado las cargas que actúan por efecto de la maquinaria que se emplea en el transporte y manipulación del material a transportar o acopiar.

2.4.4.2 Cargas Estacionamiento o Almacenamiento

Son cargas de naturaleza variable, debida fundamentalmente al peso de mercancías, almacenadas o apiladas bien directamente sobre la superficie o en el interior de elementos auxiliares para su transporte y manipulación (contenedores, semirremolques, etc.), siendo su actuación y distribución constantes durante un cierto período de tiempo y con dirección vertical. Estas cargas se consideran, repartidas o concentradas; las cargas del tipo granel son cargas repartidas donde la altura máxima de estas es un variable a consideraren cambio, las cargas concentradas se considera del tipo contenedor, en donde se divide su el peso puntualmente en sus apoyos.

2.4.4.3 Cargas de Estacionamiento de Gráneles Sólidos

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

Se toma para cada material una presión expresada en la ecuación 24.

$$\text{Ec. (24)} \quad Q_{v1} = \gamma * H_a \quad \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$$

Donde γ es el peso específico aparente del material estacionado o almacenado en las condiciones ambientales más desfavorables en kN/m^3 y H_a es la altura máxima de almacenamiento o estacionamiento transitorio del material considerado en m.

2.4.4.4 Cargas de Almacenamiento de Mercancía General

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

Se tomará para cada mercancía mediante la ecuación 25.

$$\text{Ec. (25)} \quad Q_{v1} = \gamma * H_a \quad \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$$

Siendo Q_{v1} la carga por área elemental, y γ el peso específico aparente de la mercancía estacionada o almacenada en las condiciones ambientales más

desfavorables en kN/m^3 y H_a como la altura máxima de almacenamiento o estacionamiento transitorio de la mercancía considerada en m. La altura máxima depende fundamentalmente de la zona considerada y el uso de la misma como también la naturaleza y tipo de mercancía.

2.4.4.5 Cargas en zonas de almacenamiento de contenedores

Las cargas de los contenedores se transmiten al pavimento por elementos de apoyo de $0,178 \times 0,162 \text{ m}^2$ situados en las esquinas, los cuales sobresalen de su cara inferior $0,0125 \text{ m}$.

La unidad de medida en el transporte de los contenedores es el TEU (Transport Equivalent Unit) o contenedor equivalente de 20 pies de longitud. Los más habituales actualmente son los que tienen 20 pies (1 TEU) y 40 pies (2 TEU). Existen también contenedores de 10 pies (0,5 TEU) y de 30 pies (1,5 TEU) y están comenzando a utilizarse los de 50 pies (2,5 TEU). El TEU también se utiliza como unidad de medida del transporte de cajas móviles sobre semirremolques.

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

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

La probabilidad de que todos los contenedores estén totalmente cargados en altura es en principio relativamente pequeña y depende de los criterios específicos

de explotación de la instalación. Por esta razón, para la estimación de las cargas aplicadas se introduce el uso de coeficientes reductores de peso que varían según la altura de almacenamiento tal como lo plantea la norma de la BPA (ver punto 2.4.2.5).

2.4.4.6 Cargas de equipos de manipulación de contenedores

En la Tabla 12 se entrega un resumen de las características fundamentales de los distintos equipos de manipulación para los efectos de dimensionamiento de los pavimentos llamado p_v .

CARGAS Y PRESIONES DE LOS EQUIPOS DE MANIPULACIÓN EN LAS PEORES CONDICIONES DE TRABAJO		
Equipo de manipulación	Carga máxima en cada punto de apoyo (kN)	Máxima presión de contacto p_v (MPa)
Pórtico de almacenamiento	450	1,1
Carretilla pórtico	130	1,1
Cargador frontal de 5 t	30	0,8
Cargador frontal de 20 t	110	0,7
Cargador frontal de 40 t	220	0,6
Cargador lateral	230	0,6
Grúa automóvil de 10 t	150	0,4
Grúa automóvil de 30 t	400	0,9
Grúa automóvil de 50 t	550	1,3
Grúa automóvil de 70 t	750	1,8
Grúa automóvil de 140 t	1100	2,6
Tractor semirremolque de 40 t	35	2,2
Tractor semirremolque de 80 t	70	2,2

Tabla 12. Cargas y presiones de equipos. [2]

2.4.4.7 Dimensionamiento de pavimentos portuarios

En ocasiones el proyecto de pavimentos portuarios se lleva a cabo seleccionando de forma totalmente independiente de los equipos de manipulación y los propios pavimentos, de manera que aun siendo el objetivo general que éstos puedan resistir sin deterioros graves las acciones provocadas por los equipos seleccionados, puede ocurrir que dichos deterioros aparezcan tras haberse consumido una parte muy pequeña de la vida útil. En cambio, es recomendable considerar conjuntamente la selección de los equipos y del pavimento, lo cual debe hacerse sin embargo de forma que un cambio en dichos equipos, dentro de determinados márgenes razonables, no obligue necesariamente a un cambio de pavimento. Por tanto, el pavimento y los equipos deben considerarse como partes interrelacionadas de un mismo sistema de explotación.

La selección del sistema completo incluye los siguientes aspectos que deberán ser tenidos en cuenta por el proyectista:

- Equipos de manipulación que se quieren utilizar.
- Características generales de estos equipos.
- Cargas transmitidas por cada equipo en las condiciones de trabajo.
- Uso de cada uno de ellos durante la vida de proyecto.
- Posibles tipos de secciones estructurales.
- Adaptación del pavimento a las condiciones de trabajo.
- Características superficiales exigibles.
- Inversiones previstas.

Con este enfoque, lo que se obtiene son sistemas combinados de equipos de manipulación y pavimentos que han de analizarse en función de su costo económico global y de las disponibilidades existentes. Debe destacarse que esto precisa por parte del proyectista de unos conocimientos suficientes de ingeniería y de las características de la explotación portuaria. En suma, esta práctica requiere que se traten conjuntamente la elección del tipo de pavimento y los parámetros de explotación portuaria: equipos de manipulación, almacenamiento de las distintas mercancías, etc.

Los pavimentos se dimensionan para resistir una carga de cálculo que se aplica con una cierta intensidad de uso, por lo que es fundamental valorar ambos parámetros. Hay que señalar que la carga de cálculo de mayor magnitud no es necesariamente la que produce el mayor deterioro, sino aquella en que la combinación de magnitud e intensidad proporcionan una situación crítica; ésta es la que hay que considerar en el proceso.

2.4.5 Factores de dimensionamiento de los pavimentos portuarios

2.4.5.1 Uso de la superficie portuaria

El proyectista debe conocer los usos de la superficie para la que se va a proyectar el pavimento, ya que, según sean se utilizarán unos equipos de manipulación u otros y una forma de explotación específica. Si desconociese dicho uso, considerará la situación más desfavorable posible.

2.4.5.2 Equipos de manipulación

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

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

2.4.5.3 Características del relleno

El tipo de relleno que se ha utilizado, así como las características de los fondos sobre los que se apoya y de la coronación de dicho relleno, son fundamentales para elegir el pavimento y, en particular, para decidir sobre el eventual empleo de capas de base y/o subbase.

2.4.5.4 Características de los materiales disponibles

La posibilidad de elegir unos u otros materiales, atendiendo tanto a su disponibilidad como a su costo, conduce en última instancia a la solución estructural de proyecto.

2.4.6 Vida útil

Equivale al concepto de período de proyecto tal como se emplea en la Instrucción de secciones del pavimento de la Dirección General de Carreteras.

La vida útil del pavimento portuario va unida a la propia concepción del desarrollo de un puerto. Determina el número de operaciones que el pavimento ha de soportar sin que deba ser dejado fuera de servicio. La vida útil de un pavimento portuario definitivo se establece entre 15 y 25 años, al tratarse de una infraestructura que requiere un nivel de seguridad 1 (pequeño riesgo de pérdida de vidas humanas o deterioros ambientales en caso de rotura).

En este documento se ha adoptado como base de cálculo y con carácter general una vida útil de 25 años para los pavimentos definitivos, al considerarse que se trata de infraestructuras de carácter general. En los casos concretos en los que se pueda asignar al pavimento un carácter industrial específico, el proyectista podrá rebajar la vida útil a 15 años. Por su parte, para pavimentos provisionales se ha adoptado como base de cálculo y con carácter general una vida útil de 8 años. En los casos concretos en los que el proyectista pueda prever que en menos tiempo cambiará radicalmente el uso de la superficie o que se construirá el pavimento definitivo, podrá adoptar una vida útil de 3 años.

2.4.6.1 Bases del catálogo

Introducción

El objetivo fundamental del dimensionamiento de pavimentos portuarios es asegurar sus condiciones de servicio durante la vida útil, al aplicar un régimen determinado de cargas con una intensidad de uso también determinada.

Las peculiaridades del dimensionamiento de pavimentos portuarios recaen en primer lugar en la calidad de los rellenos y de los fondos marinos y además en las siguientes características del tráfico portuario:

- Las cargas por rueda que transmiten los equipos de manipulación y transporte de mercancías son muy elevadas.
- La gama de tipos y tamaños de equipos y por tanto de cargas transmitidas, separación de ruedas y presiones son muy variadas.
- Los esfuerzos adicionales debidos a impactos, giros, frenadas, irregularidades superficiales, etc., pueden ser importantes, aunque esto no condiciona tanto el dimensionamiento de la sección estructural como las características superficiales.
- Las zonas de circulación no están, en muchas ocasiones, delimitadas o canalizadas.
- Existe dificultad para conocer previamente la tipología del tráfico y su evolución.
- Las cargas transmitidas por el almacenamiento y apilamiento de mercancías son muy elevadas, al igual que las que transmiten algunos de los equipos con las que se manipulan.

Las cargas que se consideran en el dimensionamiento de pavimentos portuarios dependen del uso de las zonas de que se trate, puesto que estas zonas determinan el tipo de vehículos de manipulación y transporte de mercancías, así como la posibilidad de estacionamiento o almacenamiento de las mismas y por tanto las cargas que puedan presentarse y el número total de aplicaciones.

En consecuencia, el dimensionamiento de los pavimentos portuarios exige para cada proyecto la previsión de los equipos de manipulación y transporte de mercancías que afectarán a la obra proyectada (características, principales y cargas transmitidas por cada uno de ellos en cada condición de trabajo). Asimismo, se hará una previsión sobre la forma de almacenamiento y apilamiento de las distintas mercancías. Por último son necesarios estudios específicos para determinar la intensidad de uso durante la fase de proyecto analizada.

Modelos y parámetros de cálculo

En todos los casos, aunque no sea más que con carácter de tanteo previo, se ha utilizado un programa de computador basado en las hipótesis de Burmister para determinar los cálculos, tensiones, deformaciones y desplazamientos que se producen en los puntos críticos de la sección estructural. En el caso de los pavimentos de hormigón también se han hecho comprobaciones con la ayuda de nomogramas y fórmulas simplificadas basadas en las hipótesis de Westergaard.

Hipótesis de Burmister

En resumen estas hipótesis son las siguientes:

- El pavimento se representa geoméricamente como una estructura constituida por una serie de capas horizontales paralelas, indefinidas en planta y de espesor constante, apoyadas en un espacio semi indefinido de Boussinesq.
- Cada capa se comporta como un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo. Se caracteriza mecánicamente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson.
- Cada una de las cargas que actúan sobre el pavimento, por ejemplo las ruedas de un vehículo, se representa mediante una presión, en general vertical, distribuida uniformemente sobre un área circular.

- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre capas puede modelarse en condiciones de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales) o nula.

- Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos.

- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas.

- No se suelen considerar los esfuerzos cortantes que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento, debido a que salvo en casos excepcionales son prácticamente despreciables.

- Con estas hipótesis, las ecuaciones en derivadas parciales que resultan del planteamiento del problema se resuelven mediante transformadas. La respuesta de la estructura se obtiene entonces en forma de integrales definidas que se resuelven numéricamente. Para ello se utilizan los correspondientes programas de computador, de los que existen muchas versiones en el mercado.

Las limitaciones de los modelos desarrollados bajo estas hipótesis tienen su origen en las mismas y pueden resumirse de la siguiente forma:

- La sección del pavimento se representa con simetría de revolución, es decir, tanto las cargas como el propio pavimento se suponen simétricos alrededor de un eje. Los efectos de las cargas producidas por los neumáticos en las proximidades de grietas o de bordes no pueden por tanto analizarse utilizando estos métodos; tampoco puede analizarse directamente el efecto de cargas cuya huella de contacto no es circular, como ocurre con los contenedores o con los apoyos delanteros de los semirremolques. Aunque podrían utilizarse modelos tridimensionales, aplicando un método de elementos finitos, estos no son prácticos debido a la gran cantidad de tiempo de computador y de planteamiento y análisis de los resultados que requieren.

- Se desprecian las fuerzas de inercia que se desarrollan en cada elemento del pavimento debido a las cargas dinámicas. El no considerarlas puede no ser aceptable en el caso de vehículos circulando a baja velocidad y materiales granulares o mezclas bituminosas y en el de vehículos que en sus movimientos realizan giros muy bruscos.

— Todos los materiales utilizados en construcción de pavimentos son en mayor o menor medida anisótopos, heterogéneos, no lineales y no elásticos; algunas de sus propiedades dependen del tiempo y se ven afectadas por cambios ambientales, como la temperatura o la humedad. Por tanto, para calcular tensiones y deformaciones de forma más precisa sería necesario el empleo de teorías complejas no lineales. La aplicación de la teoría elástica ha demostrado ser de todos modos suficientemente válida en la práctica.

Hipótesis de Westergaard

Estas hipótesis, aplicables a los pavimentos de hormigón, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se supone que la losa es de espesor uniforme y que se comporta como un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo, caracterizado mecánicamente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson.
- La losa está en equilibrio bajo la acción de las cargas del tráfico, su peso propio, las reacciones de las losas contiguas y la del apoyo.
- La reacción del apoyo se considera en cada punto proporcional al desplazamiento vertical del mismo (macizo de Winkler) con una constante de proporcionalidad denominada módulo de reacción o de balasto.

Tanto en las fórmulas establecidas por Westergaard como en las modificaciones posteriores de las mismas un parámetro fundamental es el denominado radio de rigidez relativa, el cual viene dado por la ecuación 26.

$$\text{Ec. (26)} \quad I = \left[\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot K} \right]$$

Donde I el radio de rigidez relativa en m, E el módulo de elasticidad del hormigón en MPa, h el espesor de la losa en m, ν como el coeficiente de Poisson del hormigón y K el módulo de reacción del apoyo (MPa/m).

En el caso de una carga circular, las tensiones máximas en la losa para las distintas posiciones vienen dadas por ecuación 27.

$$\text{Ec. (27)} \quad \sigma_{\max} = \frac{Q}{h^2} \cdot f \cdot \left(\frac{l}{a}\right)$$

Donde Q es la magnitud de la carga circular en N y a es el radio de la carga en m.

Criterios de dimensionamiento

En el caso de materiales flexibles (mezclas bituminosas y capas granulares o explanadas) se ha utilizado como criterio analítico de referencia la ley de fatiga correspondiente. En el hormigón el criterio de referencia es que la tensión de tracción por flexión no supere las dos terceras partes de la resistencia característica a flexo tracción, habiéndose realizado también en algún caso (depósito de contenedores) comprobaciones de resistencia al punzonamiento. Finalmente, en ambos casos los resultados obtenidos en el cálculo analítico se han ajustado en función de la experiencia existente y de criterios empíricos.

Para el depósito de contenedores, las soluciones propuestas de pavimento de hormigón responden también a criterios empíricos, pero no satisfacen los requerimientos teóricos de los modelos de cálculo, por lo que existe la posibilidad de que se produzcan fisuraciones del pavimento. Sin embargo, dicha fisuración puede considerarse un deterioro admisible, compatible con la explotación, siempre que se trate de zonas exclusivas para el depósito de los contenedores, y dé su conformidad del cliente o la propiedad.

2.4.7 Descripción de dimensionamiento mediante catálogo

El procedimiento de dimensionamiento aquí propuesto se ajusta a la metodología que se indica a continuación.

2.4.7.1 Selección del uso de la superficie portuaria

Los usos considerados son: comercial, industrial, militar, pesquero y deportivo o de recreo.

2.4.7.2 Selección de la zona dentro del uso considerado

El proyectista ha de dimensionar un pavimento para una zona definida específicamente dentro del uso considerado. Por ejemplo, dentro del uso comercial se diferencian las zonas de operación, las de almacenamiento, las vías de comunicación y las zonas complementarias.

2.4.7.3 Distinción entre cargas de almacenamiento y cargas de manipulación

Una vez conocido el uso y la zona portuaria donde se va a proyectar el pavimento, se deben analizar separadamente las cargas de almacenamiento (gráneles sólidos, mercancía general, etc.) y las cargas de manipulación (debidas a los equipos de manipulación en las operaciones portuarias). Cuando la zona portuaria objeto de estudio requiera la consideración de los dos tipos de cargas anteriores, se realizará el estudio para ambos y se elegirá como determinante el que arroje la situación más desfavorable (categoría de tráfico más elevada); sin embargo, en los casos en los que exista una diferenciación física y permanente entre las superficies de depósito y las de circulación se analizarán ambas situaciones independientemente.

Para pavimentos provisionales, no se establecen, al menos en principio, diferencias entre los distintos usos y zonas, debiendo sólo considerarse la compatibilidad de las deformaciones esperadas con los requerimientos de la explotación.

2.4.7.4 Determinación de la carga de cálculo

El proyectista ha de clasificar la carga de cálculo en zonas de operación y almacenamiento.

a. Zonas de operación

Depende de los equipos previstos y por tanto de las cargas Q_v y presiones p_v que transmiten al pavimento en cada rueda (ver Tabla 12), en cada par de ruedas gemelas o en general en cada punto de apoyo:

BAJA: $Q_v < 120 \text{ kN}$ y $p_v < 1,1 \text{ MPa}$, simultáneamente.

MEDIA: $120 \text{ kN} \leq Q_v \leq 700 \text{ kN}$ o bien $1,1 \text{ MPa} \leq p_v \leq 1,5 \text{ MPa}$.

ALTA: $Q_v > 700 \text{ kN}$ y $p_v > 1,5 \text{ MPa}$, simultáneamente.

Independientemente de esta clasificación, el proyectista debe valorar la pertinencia de considerar una carga de cálculo ALTA, ya que un eventual fallo en los equipos de muelle o la necesidad de manipular una mercancía especial pueden obligar al empleo de grúas automóviles muy pesadas.

b. Zonas de almacenamiento

Salvo en terminales especializados y siempre que no se disponga de criterios específicos de proyecto o de explotación, se considerará **ALTA** por razones de operatividad de las superficies portuarias o previendo futuros cambios en la explotación, así como por tener en cuenta el impacto de las cargas y la adecuación del pavimento a la estructura del muelle.

2.4.7.5 Determinación de la intensidad de uso

De acuerdo con los criterios de explotación portuaria representativos de la intensidad de uso para que el proyectista pueda determinar en cada caso la combinación carga de cálculo-intensidad de uso según la superficie de que se trate y así poder definir la categoría de tráfico correspondiente. Estas se pueden clasificar en zonas de operación y almacenamiento.

a. Zonas de operación

REDUCIDA:	$I_1 < 300$ t/m
MEDIA:	$300 \leq I_1 \leq 3000$ t/m
ELEVADA:	$I_1 > 3000$ t/m

Donde I_1 queda definido por las mercancías y materiales manipulados por rodadura por unidad de longitud de atraque en el año medio de la vida útil.

A falta de datos más precisos, las mercancías manipuladas por rodadura se obtendrán aplicando a las mercancías totales (embarcadas más desembarcadas) un multiplicador con los siguientes valores, según el sistema principal de manipulación:

Rodadura	1,00
Elevación	0,30
Rodadura y elevación	0,70
Continuos	0,10

A los efectos de la determinación de este índice ha de considerarse que si la entrada y salida de la mercancía se realizan fundamentalmente por ferrocarril, se debe también considerar un coeficiente multiplicador de 0,10.

Si se carece de datos de proyecto o de explotación portuaria se considerará que toda la manipulación se lleva a cabo por rodadura.

b. Zonas de almacenamiento

REDUCIDA:	$I_2 < 0,2 \text{ TEU/m}^2$
MEDIA:	$0,2 \leq I_2 \leq 2 \text{ TEU/m}^2$
ELEVADA:	$I_2 > 2 \text{ TEU/m}^2$

Donde I_2 son los contenedores manipulados por unidad de superficie en la zona en el año medio de la vida útil.

2.4.7.6 Determinación de la categoría del tráfico

Con la clasificación de la intensidad de uso y de la carga de cálculo se define la categoría de tráfico para cada una de las distintas zonas estudiadas dentro del uso considerado. Se han establecido cuatro categorías de tráfico:

Tráfico muy pesado	A
Tráfico pesado	B
Tráfico medio	C
Tráfico ligero	D

CATEGORÍAS DE TRÁFICO (*)			
INTENSIDAD DE USO	CARGA DE CÁLCULO		
	BAJA	MEDIA	ALTA
REDUCIDA	D	C	B
MEDIA	D	B	A
ELEVADA	C	B	A

NOTA:
* Excepto para vías de acceso y zonas complementarias de circulación.

Tabla 13. Categorías de tráfico. [2]

2.4.7.7 Determinación de la categoría de la explanada

Teniendo en cuenta las características del relleno y de la coronación sobre los que se ha de construir el pavimento se elige la categoría de explanada a considerar en el dimensionamiento.

Se han considerado cuatro categorías de explanada atendiendo a su capacidad de soporte; ésta es consecuencia de las características del relleno y de la coronación:

Explanada deficiente	E0
Explanada aceptable	E1
Explanada buena	E2
Explanada muy buena	E3

Se debe tener en cuenta que la categoría E0 sólo es admisible para pavimentos provisionales.

2.4.7.8 Capas inferiores del pavimento

La colocación o no de capas inferiores de base y/o subbase se lleva a cabo en función de la categoría de la explanada que se haya obtenido. Así, se consideran las siguientes cuatro posibilidades:

Explanada E0: Sobre estas explanadas han de disponerse una capa de subbase de 0,40 m de suelo granular natural y otra capa de base de 0,25 m de suelo granular artificial.

Explanada E1: Sobre este tipo de explanada se debe extender una capa de subbase de 0,25 m de suelo granular natural y otra de base con un espesor de 0,25 m de suelo granular artificial.

Explanada E2: En esta situación debe extenderse una capa de base con un espesor de 0,25 m de suelo granular artificial.

Explanada E3: Sobre este tipo de explanada no se coloca ninguna capa de base ni de subbase, salvo que se indique lo contrario al definirse el pavimento en la correspondiente ficha del catálogo. De todas formas, para conseguir una adecuada regularidad superficial puede recurrirse a la extensión de un suelo granular artificial de 0,15 m de espesor como mínimo.

En todos los casos, si no se dispone de un suelo granular natural se sustituirán por suelo granular artificial, pudiéndose reducir el espesor de aquéllas hasta 0,05 m.

Cuando el pavimento se vaya a construir sobre otro provisional existente, habrá de evaluarse su estado y en particular su regularidad superficial. Si no se aprecian deformaciones notables se extenderá directamente el pavimento como si se tratase de una explanada E3. Salvo que este nuevo pavimento esté formado por adoquines o mezclas bituminosas, en cuyo caso deberá considerarse la eventual aportación estructural del pavimento existente.

En caso contrario, habrá que proceder a su regularización superficial previamente a la extensión del pavimento. En ese caso, si el pavimento existente está formado por capas granulares, por capas granulares y un riego con gravilla, o por capas granulares con una mezcla bituminosa de pequeño espesor y muy deteriorada, se escarificará la superficie y luego se regularizará extendiendo un suelo granular artificial con un espesor mínimo de 0,15 m. En los demás casos, se levantará el pavimento existente o se regularizará mediante la extensión de mezcla bituminosa en un espesor mínimo de 0,05 m.

2.4.7.9 Elección del tipo de pavimento

Con las categorías de explanada y de tráfico, se selecciona uno de los tipos de pavimentos recogidos en el catálogo para el uso y la zona considerados (ver punto 2.4.7.6). Esta selección debe apoyarse fundamentalmente en un análisis

económico global de las diversas opciones, considerando en cada caso tanto costos de construcción como de conservación.

Finalmente la ROM entrega modelos normalizados para las distintos tipos de usos que se les dé a las zonas a pavimentar.

2.4.7.10 Catálogo de secciones estructurales normalizadas

Se presentan sólo las secciones normalizadas para usos portuarios comerciales en operación o para fines de almacenamiento.

Zonas de operación y almacenamiento

ADOQUINES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN

Categoría de Trafico	Espesor adoquín
Transito tipo A	0,12 m ⁽¹⁾
Transito tipo B	0,10 m ⁽²⁾
Transito tipo C	0,10 m
Transito tipo D	0,08 m

Nota:

(1) En todos los casos los adoquines se apoyan en una capa de nivelación de arena de un espesor tras compactación de 0,03 m

(2) La capa de base estará constituida por una capa de alguna de las siguientes unidades de obra: hormigón pobre (0,15 m), hormigón H-175 (0,15 m) o suelo-cemento (0,20 m), incluso en el caso de explanada E3.

2.4.8 Análisis comparativo para el Puerto de Gaza-Israel

En el análisis realizado para el diseño del puerto de Gaza – Israel, hecho por la International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering a través de su publicación “An optimum pavement design for container terminal area” [1] demuestra como los resultados del diseño del puerto de Gaza para sus diferentes zonas realizadas a través de las recomendaciones españolas se alejan bastante de los resultados hechos por los métodos BPA y australiano, esto se puede ver en el siguiente cuadro de resultados para diferentes áreas del terminal de Gaza.

Área multipropósito

Norma	BPA	ROM	APSDS
Pavimento adoquín	80	100	80
Cama de arena	30	30	30
Base de cemento tratado	505	200	530
Sub-base granular	150		
Total (mm)	765	330	640

Tabla 14. Espesores Puerto de Gaza en área multipropósito. [1]

Área de estacionamiento y acceso

Norma	BPA	ROM	APSDS
Pavimento adoquín	80	100	80
Cama de arena	30	30	30
Base de cemento tratado	475	200	490
Sub-base granular	150		
Total (mm)	735	330	600

Tabla 15. Espesores Puerto de Gaza en área de estacionamiento y acceso. [1]

Área de almacenamiento de contenedores

Norma	BPA	ROM	APSDS
Pavimento adoquín	80	120	80
Cama de arena	30	30	30
Base de cemento tratado	560	200	550
Sub-base granular	150		
Total (mm)	820	350	660

Tabla 16. Espesores Puerto de Gaza en área de almacenamiento de contenedores. [1]

3. APLICACIÓN AL PUERTO SAN VICENTE

El presente diseño de pavimentos de adoquines corresponde a un sector característico del puerto, tal como lo es el sector C (ver A.3), en donde su uso constante por equipos portacontenedores y el acopio de estos, hacen un sector de constante movimiento. El diseño realizado consta del cálculo de las diferentes capas que componen un pavimento de adoquín, estas son; Base Tratada H10, Sub-base y coronamiento.

3.1 Descripción del Puerto San Vicente

San Vicente Terminal Internacional (ver Figura 18) inició sus operaciones el 1° de enero del año 2000 luego de adjudicarse la concesión del frente de atraque del Puerto de San Vicente, integrando así todas las etapas logísticas necesarias para los armadores, exportadores e importadores. Con ello se compromete a modernizar y obtener mejores resultados y llevar a cabo un plan de modernización y actualización según los requerimientos actuales de carga.



Figura 18. Foto aérea SVTI. [8]

3.1.1 Ubicación Geográfica

La Bahía de San Vicente está ubicada en la región del Biobío a 500 kilómetros al sur de Santiago a través de la carretera Panamericana. La región es el segundo polo de desarrollo de Chile, con actividades productivas tan diversas como la siderurgia, la industria de celulosa, la pesca y la explotación forestal.

Gracias a su ubicación geográfica y a una posición estratégica, San Vicente Terminal Internacional queda conectado con la red ferroviaria de Chile, con ingreso directo del ferrocarril al puerto. Esto, y el acceso inmediato a las carreteras longitudinales y transversales de Chile permiten una excelente distribución a todo el país y al resto de los países de Sudamérica.

3.1.2 Capacidad

El puerto de San Vicente posee un muelle marginal de 600,3 metros lineales con boyas a los extremos de sus sitios alcanzando los 683 metros de extensión que conforma la infraestructura de SVTI.

El frente de atraque cuenta con un calado máximo de 12,2 metros, el cual ha permitido recepcionar naves de hasta 295 metros de eslora con capacidad de 5000 TEUS aproximadamente.

SVTI cuenta con una superficie total de 207.000 m² destinados a acopio de contenedores, zona de aforo, zona inspección SAG y andenes de conexión para 450 contenedores refrigerados. El área de acopio tiene una capacidad estática de 26.000 TEUS y esta subdividida en áreas de stacking y depósito para contenedores vacíos que se consolidan en el terminal.

3.1.3 Equipos

a. Grúas móviles

A mediados del año 2008 el Puerto San Vicente adquirió la séptima grúa móvil con capacidad de levante para 100 toneladas. Las grúas móviles son utilizadas principalmente para el embarque y descarga de contenedores con una productividad entre 22 a 25 contenedores / hora.

b. Grúas horquilla

El puerto San Vicente posee para las faenas de recepción, consolidación y despacho 65 grúas horquilla con sus respectivos aditamentos especiales para cada tipo de producto. Estas grúas tienen una capacidad de levante desde 4 toneladas hasta 16 toneladas.

c. Grúas portacontenedores

El Puerto San Vicente cuenta con 15 grúas portacontenedores llenos para las faenas de stacking y CFS, y 11 grúas portacontenedores vacíos para las faenas de depósito y maestranza.

d. Tracto camiones

El Puerto San Vicente cuenta con una flota de 48 tracto camiones para satisfacer el porteo de contenedores dentro del terminal para las faenas de stacking, depósito, CFS.

e. Equipos para gráneles

Para mantener una alta productividad en el embarque de carga a granel el terminal cuenta con 3 cintas trasportadoras. Para las descargas cuenta con palas y tolvas de descarga.

3.2 Condiciones Geotécnicas según su CBR

El puerto San Vicente puede ser dividido en sectores según sus condiciones geotécnicas, específicamente según el valor de la Capacidad de Soporte CBR que tenga el suelo. En la Figura 19 se muestran las zonas de depósito de contenedores y de alto tráfico de camiones y reach stacker.

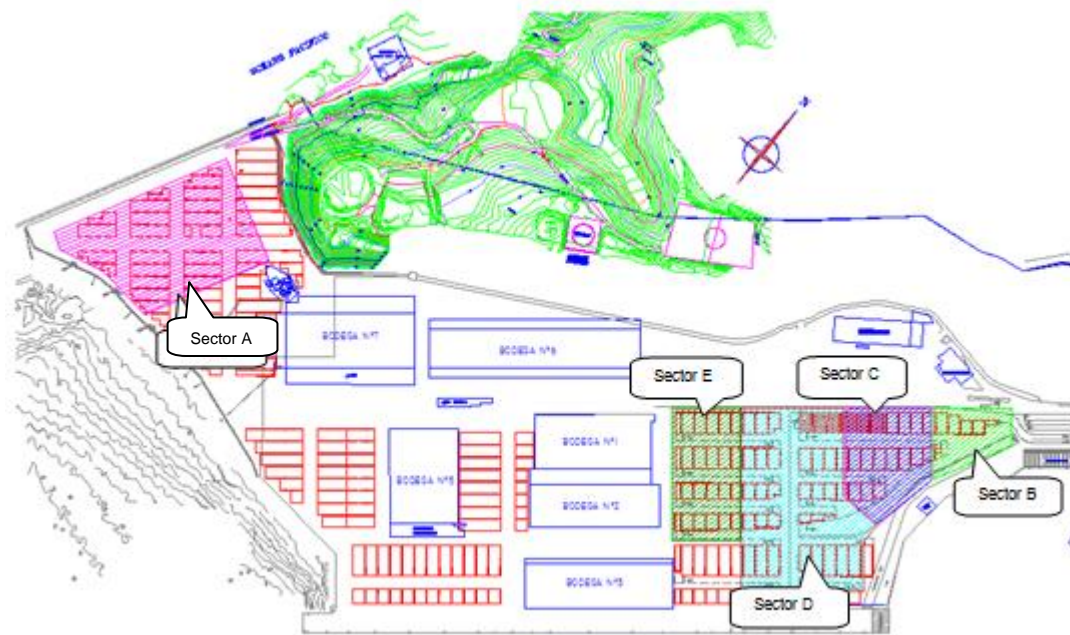


Figura 19. Plano SVTI y sectores según condiciones geotécnicas. (Elaboración propia)

Las zonas rojas en el plano son las de acopio de contenedores, ya sean consolidados o vacíos, las zonas entre los sectores rojos son de alto tráfico de equipos, todas las zonas tienen una flexibilidad y están sujetas a cambios por requerimientos del puerto, lo cual hace imposible su clasificación permanente según actividades que en ellas se realice.

Los sectores divididos por su condición geotécnica son las siguientes:

3.2.1 Zona A (Sector Rompeolas)

La explanada de pavimento en sector rompeolas del Puerto San Vicente fue construida el año 2002. La explanada de pavimento cubre aproximadamente 18.866 m² con una pendiente media del 1%.

Sobre esta explanada transitan camiones de alto tonelaje, grúas pesadas de diferentes modelos y además se acopian materiales y contenedores de diferentes pesos y dimensiones.

El suelo permanece saturado de agua por su cercanía al mar, posee una base estructural de media resistencia y muy susceptible al agua, con presencia de suelo compuesto por relleno no clasificado.

En esta zona se tiene un tránsito de cargas normales del puerto (cargas pesadas), la cual produce deformaciones de variadas magnitudes y en algunos puntos específicos el colapso del pavimento, la base estructural posee un **CBR medio del 70%**.

3.2.2 Zona B (Sector Costanera)

La explanada de pavimento en sector costanera fue repavimentada el año 2008, esta zona cubre aproximadamente 4538 m² con una pendiente media de 1%.

El suelo permanece saturado gran parte del año. Está sometido al tránsito de cargas normales del puerto (cargas pesadas), principalmente por camiones y maquinaria para el manejo de contenedores (Reach Stacker), la cual produce deformaciones de variadas magnitudes y en algunos puntos específicos el colapso del pavimento, posee una base estructural de media resistencia y muy susceptible al agua, en las capas inferiores se tiene presencia de arena media con limo y grava en estratos más abajo con un **CBR del 102%** para la cota de 0 a 2 metros. Para mayor detalle ver A.2.

3.2.3 Zona C (Sector Patio de Contenedores)

Explanada de pavimento en sector patio de contenedores, repavimentada el año 2009, esta zona cubre aproximadamente 8633 m², con una pendiente media del 1%.

El suelo permanece saturado en algunos periodos del año, está sometido a tensiones permanentes por el acopio de contenedores y al tránsito de cargas normales del puerto (cargas pesadas), principalmente camiones y maquinaria para el manejo de contenedores (Reach Stacker) la cual produce deformaciones de variadas magnitudes y en algunos puntos específicos el colapso del pavimento, en las capas del suelo se tiene una mezcla de arena con grava y fragmentos de roca con un **CBR del 10%** para las cotas de 0 a 2 m de profundidad, para mayor detalle ver A.3.

3.2.4 Zona D (Sector Patio de Contenedores)

Explanada de pavimento en sector patio de contenedores, repavimentada el año 2009, esta zona cubre aproximadamente 21600 m², con una pendiente media del 1%.

El suelo está sometido a tensiones permanentes por el acopio de contenedores y al tránsito de cargas normales del puerto (cargas pesadas), principalmente camiones y maquinaria para el manejo de contenedores (Reach Stacker) la cual produce deformaciones de variadas magnitudes y en algunos puntos específicos el colapso del pavimento, el suelo tiene presencia de una mezcla de arena y fragmentos de roca con un **CBR del 12%** para la cotas de 0 a 2 metros de profundidad, para mayor detalle ver A.4.

3.2.5 Zona E (Sector Patio de Contenedores)

Explanada de pavimento en sector patio de contenedores, repavimentada el año 2009, esta zona cubre aproximadamente 9322 m², con una pendiente media del 1%.

El suelo está sometido a tensiones permanentes por el acopio de contenedores y al tránsito de cargas normales del puerto (cargas pesadas), principalmente camiones y maquinaria para el manejo de contenedores (Reach Stacker) la cual produce deformaciones de variadas magnitudes y en algunos puntos específicos el colapso del pavimento, en las capas inferiores se tiene presencia de una mezcla de arena y fragmentos de roca con un **CBR del 49%** para la cota de 0 a 2 metros de profundidad, para mayor detalle ver A.5

3.3 Diseño del Pavimento

Para el diseño se utilizó la Norma Británica de Pavimentos BPA (British Ports Association) [3] , esto a consecuencia que las Recomendaciones de Obras Marítimas ROM [2] para pavimentos flexibles dentro de los cuales consideran los pavimentos de adoquines se basa en la Hipótesis de Burmister (ver punto 2.4.6.1) la cual desprecia las fuerzas de inercia que se desarrollan en cada elemento del pavimento debido a las cargas dinámicas, además la ROM toma variables de entradas muy “débiles” para el diseño, como la categoría del tráfico, calidad de la explanada y tipo de tráfico.

En un estudio hecho por Mazen Taha en su publicación “An Optimum Pavement Design for a Container Terminal Area” [1] demuestra lo alejado de los resultados del espesor de Base Tratada utilizando la ROM para el Puerto de Gaza-Israel con respecto al Método BPA y APSDS de Australia (ver punto 2.4.8).

Para el caso del Manual de Diseño y Construcción (ICH) [4], este posee deficiencias en la poca flexibilidad que posee para el diseño de cargas elevadas, como ocurre en el régimen de cargas de un puerto actualmente, además de despreciar los efectos dinámicos que se presentan en el tránsito de equipos en un puerto.

Las ventajas del método BPA recaen en la consideración de factores dinámicos de los equipos que transitan en el pavimento, utilizando un cierto castigo en el número de pasada que hace aumentar el espesor de la Base Tratada en el diseño. Además el método ha tenido años de calibraciones que se han publicado a través de las diferentes ediciones del Manual “Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers”.

Por todos estos puntos se optó por el modelo de diseño británico BPA el cual fue utilizado y se presenta a continuación.

3.3.1 Condiciones de diseño

El diseño de pavimento de adoquines se hizo para el **Sector C** del puerto San Vicente (ver punto 3.2.3) tomando en cuenta el tránsito que posee y los equipos que por ahí transitan, obteniendo un equipo crítico, el cual es el más desfavorable para las condiciones de carga, tanto por el peso como por los movimientos que realiza en su actividad normal. Además el diseño consideró las zonas de acopio de contenedores.

Para conocer las solicitaciones que tendrá el pavimento se necesitó obtener el contenedor crítico y este valor no obtener de estadísticas del Puerto San Vicente por lo que se optó por obtener el valor a través de una distribución de contenedores para el año 1996-1997 del Puerto de Valparaíso, la cual entrega a través del gráfico de la Figura 30 una distribución normal, obteniendo de esta distribución un contenedor crítico de 22000 kg de peso.

3.3.1.1 Solicitaciones

a. Vehículo

Para el análisis, se utilizó el vehículo más desfavorable que condiciona el diseño, este es el Reach Stacker KH11-0199 (ver Figura 20), el cual se muestra en actividades normales dentro del puerto San Vicente.



Figura 20. Reach Stacker KH11-0199. (Elaboración propia)

En la Figura 21 se muestran las dimensiones en detalle del Reach Stacker KH11-0199.

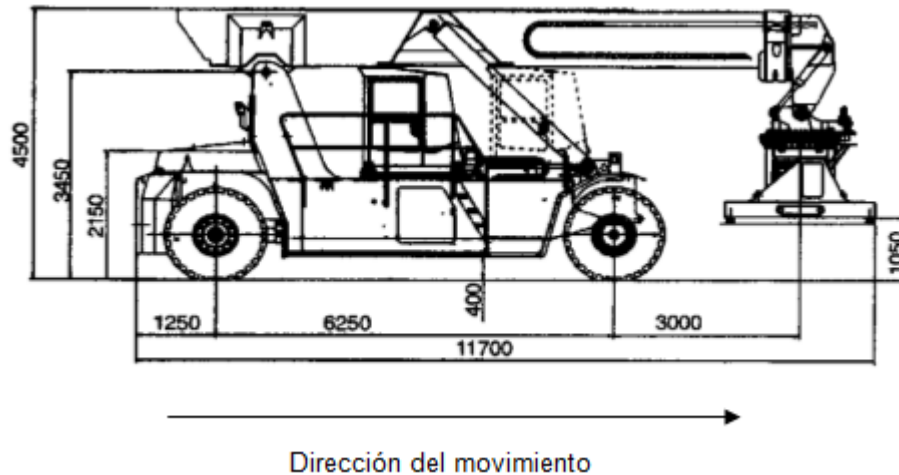


Figura 21. Esquema de dimensiones Reach Stacker. [9]

Características Reach Stacker	Valor	
Peso Reach Stacker no cargada	68,5 t	
Espaciamiento de ruedas	6,25 m	(en dirección del tránsito)
Número Total de ruedas	4	(las dos frontales dobles)
Peso Contenedor crítico	22 t	

Tabla 17. Cargas que produce el equipo. [3]

Para obtener el peso que se ejerce bajo cada rueda, se suma el peso del equipo sin carga más el peso del contenedor crítico, todo esto dividido por el número de ruedas. Por ende el peso en cada rueda es:

$$\text{Carga estática en cada rueda: } (68.500 \text{ kg} + 22.000 \text{ kg})/4 = \mathbf{22.625 \text{ kg}}$$

Factores dinámicos producidos por el equipo

Se asumió un comportamiento de tránsito normal que realiza el equipo en estudio "Reach Stacker KH11-0199" en sus actividades diarias, el que producen distintos factores dinámicos.

Los factores dinámicos fueron obtenidos de la Tabla 7 y sólo fueron considerados los efectos de frenado que equivale a un 30% de la carga singular equivalente y el efecto de aceleración que corresponde a un 10% de la carga singular equivalente

No se tomara efectos de esquinas, pues el paño a pavimentar es lo suficientemente grande para incluir este efecto, lo mismo ocurre con el efecto de desnivelación.

b. Contenedores

Se ha utilizado para el análisis una configuración de 6 contenedores en altura, soportada en 4 apoyos de superficie de contacto en las esquinas de los contenedores de 175 mm x 150 mm, donde no se utilizó el contenedor crítico.

3.3.1.2 Suelo

Se diseño la sección del pavimento de adoquines para la Zona C del Puerto San Vicente, donde el suelo de esta zona posee una Capacidad de Soporte CBR del 10%.

3.3.1.3 Vida útil del proyecto

La vida útil del proyecto se estimó para 20 años, con ello el valor de pasadas se obtuvo con datos recopilados en el Puerto San Vicente de manera informal, pues no existen estadísticas para cada una de las zonas, pese a este inconveniente se pudo obtener un valor estimado, considerando la cantidad de maquinaria disponible en un día promedio del año 2009, o sea, 8 Stacker que transportan 12 contenedores diarios los que van y vuelven en la operación del contenedor, con ello tenemos el siguiente número de pasadas para 20 años.

$$8 \text{ Stacker} \cdot 12 \text{ Contenedores} \cdot 2 \text{ (ida y vuelta)} \cdot 3 \text{ turnos} \cdot 365 \text{ días} \cdot 20 \text{ años} \\ = 4.204.800$$

Aproximándolo a **4.000.000 de pasadas** en 20 años, pues los turnos de noche no trabajan a máxima capacidad.

3.3.2 Cálculos

En esta sección se calculó los espesores de Base Tratada H10 para distintas situaciones (frenado, aceleración + frenado, tránsito libre, acopio de contenedores) y además se obtuvo los espesores de coronamiento y sub-base (ver punto 3.3.2.2).

3.3.2.1 *Calculo de profundidad efectiva*

Usando un CBR de 10% correspondiente a la Zona C, se obtuvo de la ecuación 5 una profundidad efectiva de 2114 mm

De la Tabla 9 se extrae el factor de proximidad, considerando un espaciamiento de ruedas de 6250 mm en dirección del eje x y la profundidad efectiva de 2114 mm. Como el espaciamiento entre las dos ruedas en dirección al movimiento del equipo sobrepasa los 4875 mm, el valor del factor de proximidad es 1, lo que quiere decir que no existe interacción entre las tensiones producidas bajo la rueda delantera y trasera.

3.3.2.2 *Espesores coronamiento y Sub-Base*

Los espesores de coronamiento y sub-base dependen de la capacidad de soporte que posea el suelo, en este caso la zona C el cual posee un CBR del 10%. De la Tabla 11 se obtuvo:

Esesor de coronación:	No necesita
Esesor de Sub-Base:	150 mm

3.3.2.3 Cálculo de espesor de Base Tratada H10

i. Espesor de Base H10 para solo frenado

Se tomó un factor dinámico del $\pm 30\%$ que corresponde al frenado.

Por lo tanto cada rueda se le aplica el factor dinámico correspondiente:

- Rueda delantera = $22.625 \text{ kg} \cdot 1,3 = 29.413 \text{ kg}$
- Rueda trasera = $22.625 \text{ kg} \cdot (1-0,3) = 15.838 \text{ kg}$

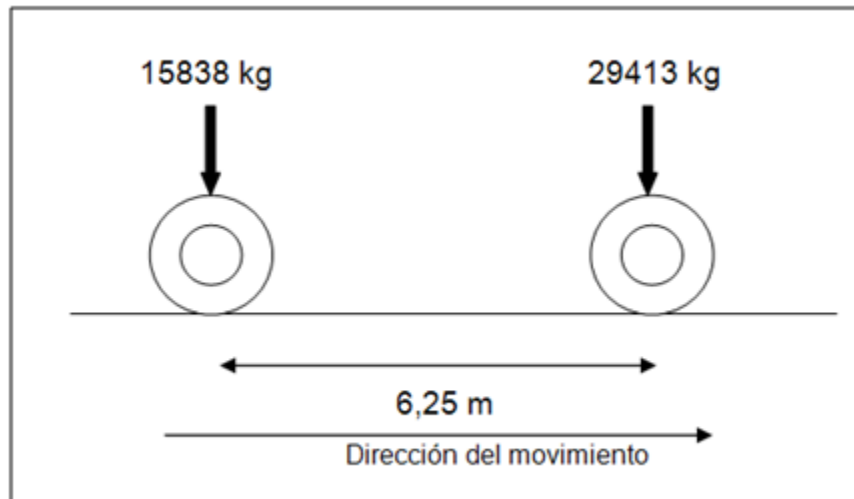


Figura 22. Cargas de rueda del Reach Stacker para el frenado

Así el efecto de deterioro que trasmite cada rueda es:

- La rueda delantera es equivalente a una pasada de la carga máxima de 29.413 kg.
- La segunda rueda es $(15.838/29.413)^{3,75} = 0,098$ pasadas de la carga crítica.

Esto quiere decir que cada vez que pase el Reach Stacker sobre un lugar, esta aplica el equivalente de $(1+0.098)=1,098$ repeticiones de carga de 29.413 kg.

El pavimento requiere ser diseñado para $1,098 \cdot 4.000.000=4.392.546$ de pasadas de una carga de 29.413 kg (288 kN) para 20 años.

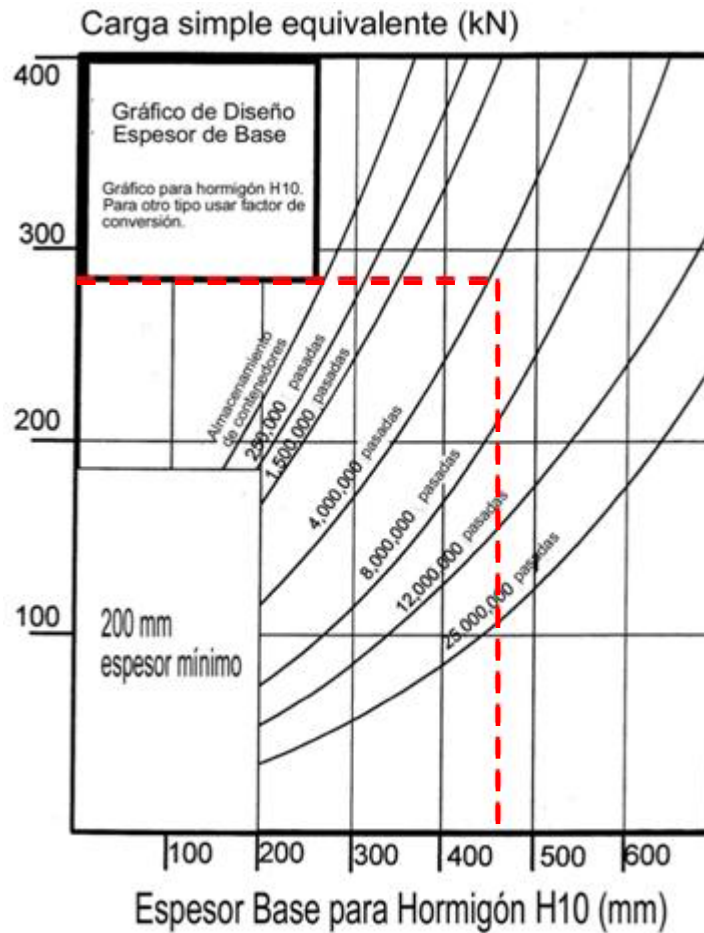


Figura 23. Espesor de Base H10 para Frenado

Con ello se obtuvo un espesor de 460 mm de Base Tratada H10 a través del ábaco de la Figura 15, tomando una carga de 288 kN y un número de repeticiones de 4.392.546, tal como muestra en la Figura 23.

ii. Espesor de Base H10 para frenado + aceleración

Se considera para el caso del efecto dinámico producido por la aceleración más el frenado. Cuando existe aceleración el factor dinámico es igual a 10% sumado al efecto de frenado que corresponde al 30%, estos factores son obtenidos de la Tabla 7.

Se necesita expresar los valores de las dos cargas, las cuales pasaran un cierto número equivalente de pasadas de la mayor carga de la rueda.

- Rueda delantera = $22.625 \text{ kg} \cdot 1,3 + 22.625 \text{ kg} \cdot 1,1 = 54.300 \text{ kg}$
- Rueda trasera = $22.625 \text{ kg} \cdot (1-0,3) + 22.625 \text{ kg} \cdot (1-0,1) = 36.200 \text{ kg}$

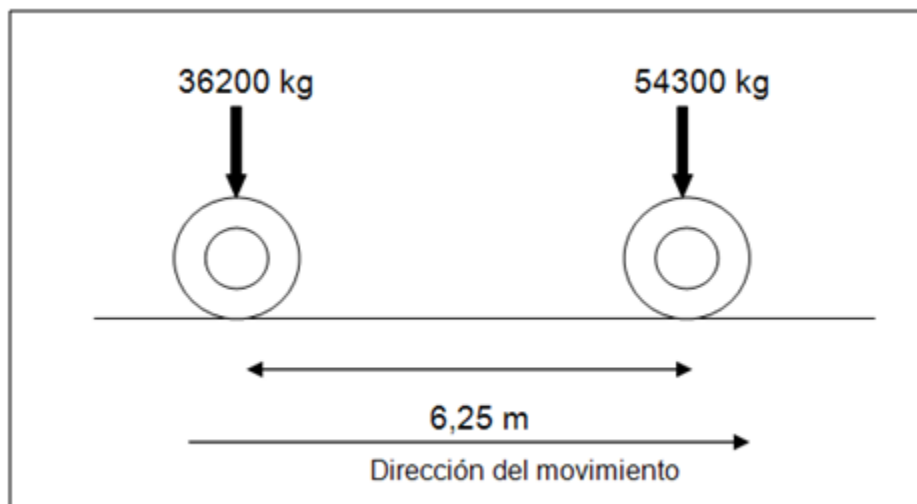


Figura 24. Cargas de rueda del Reach Stacker para el frenado + aceleración

Así el efecto de deterioro que trasmite cada rueda es:

- La rueda delantera es equivalente a una pasada de la carga máxima de 54.300 kg.

- La segunda rueda es $(36.200/54.300)^{3,75}=0,219$ de pasadas de la carga critica.

Entonces cada vez que pase el Reach Stacker sobre un lugar, esta aplica el equivalente de $(1+0,219)=1,219$ repeticiones de carga de 54.300 kg.

El pavimento requiere ser diseñado para $1,219 \cdot 4.000.000=4.874.415$ de pasadas de una carga de 54.300 kg (533 kN) para 20 años.

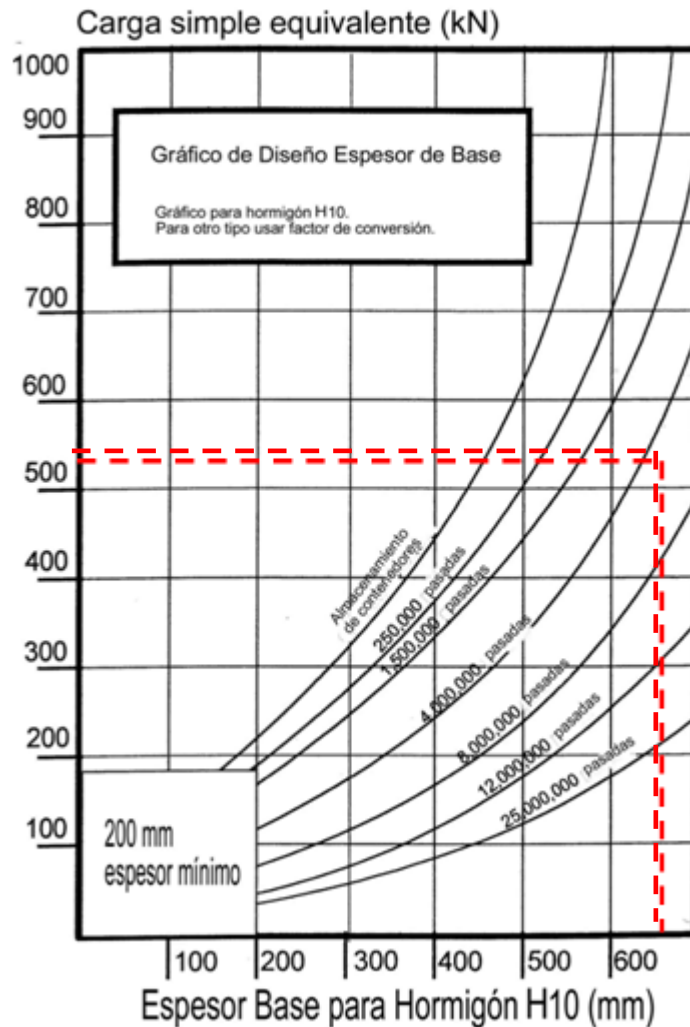


Figura 25. Espesor de Base H10 para frenado + aceleración

Con ello se obtuvo un espesor de 660 mm de Base Tratada H10 a través del ábaco de la Figura 15 tomando una carga de 533 kN y un número de repeticiones de 4.874.415, tal como muestra en la Figura 25.

iii. Espesor de Base H10 para Tránsito libre

El pavimento resiste 2 repeticiones de la carga de rueda de 22.625 kg (222 kN) para cada pasada del Reach Stacker, por lo que, en conclusión el pavimento debe ser diseñado para resistir $(4.000.000 \cdot 2 = 8.000.000)$ 8.000.000 de pasadas.

Se obtuvo el espesor de la base a través del ábaco de la Figura 15, tomando una carga de 222 kN y un número de repeticiones de 8.000.000.

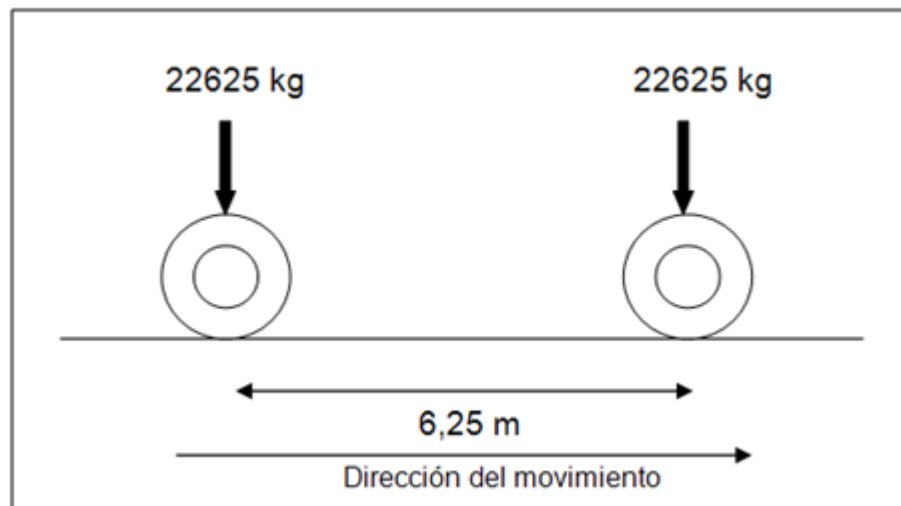


Figura 26. Cargas de rueda del Reach Stacker para el tránsito libre

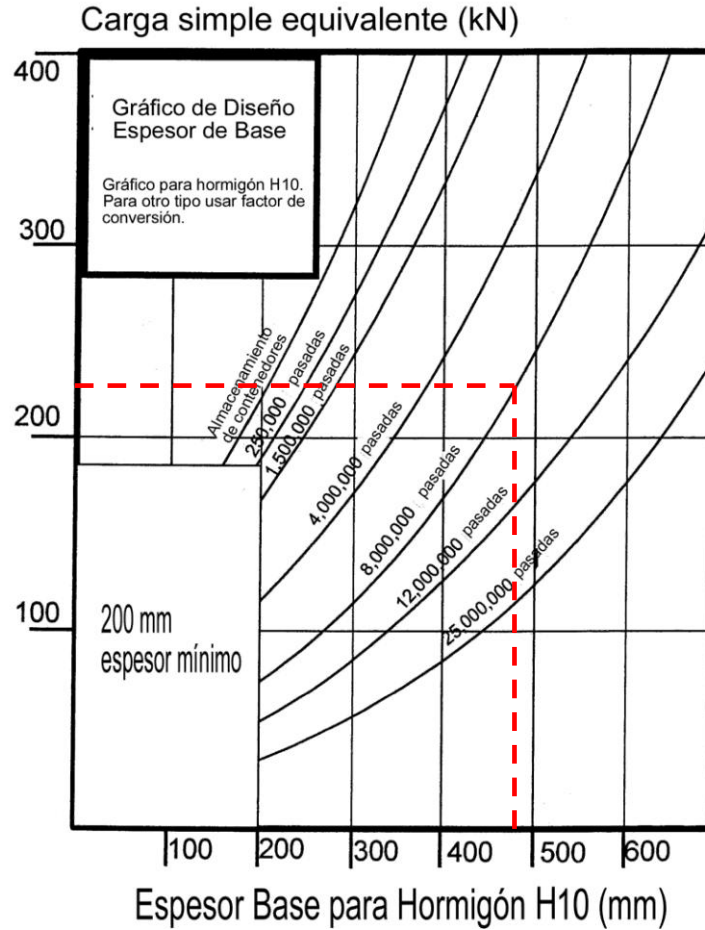


Figura 27. Espesor de Base H10 para el tránsito libre.

Con ello se obtuvo un espesor de 480 mm de Base Tratada H10 a través del ábaco de la Figura 15 tomando una carga de 222 kN y un número de repeticiones de 8.000.000, tal como muestra en la Figura 27.

iv. **Espesor de Base H10 para acopio de contenedores**

Este diseño está orientado exclusivamente para el almacenamiento de contenedores, en donde se presentan cargas estáticas producidas por el depósito de contenedores, no considerando los equipos que puedan operar en condiciones normales.

Se consideró un máximo de 6 contenedores almacenados en filas, esto según datos recopilados en el puerto San Vicente. Para obtener la carga que producen estos 6 contenedores se consultó en la Tabla 8, la cual entrega un valor de carga de 582 kN.

Finalmente el espesor de la Base Tratada H10 a través del ábaco de la Figura 15, tomando una carga de 582 kN.

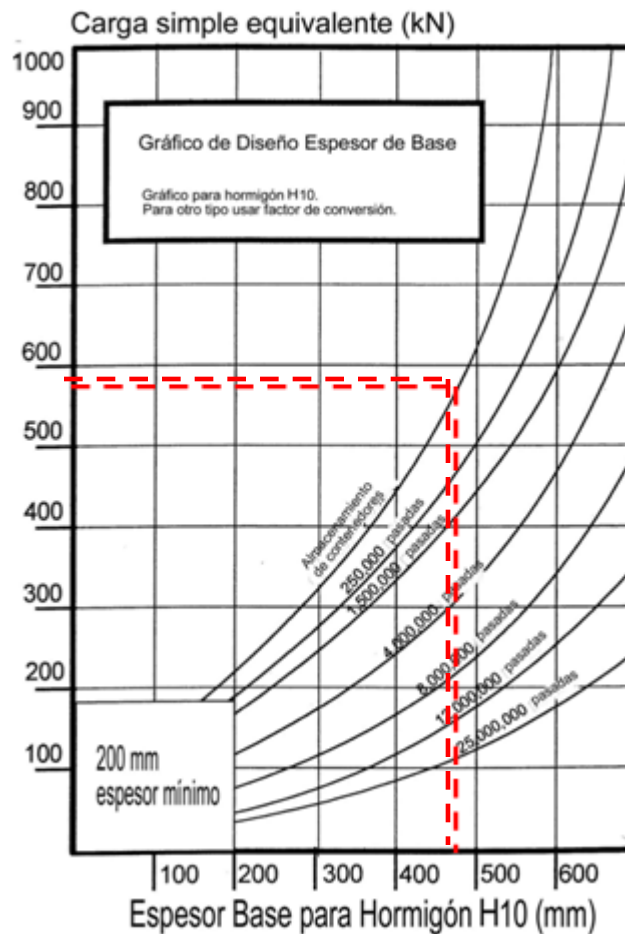


Figura 28. Espesor de Base H10 para el acopio de contenedores

Con ello se obtuvo un espesor de 480 mm de Base Tratada H10 a través del ábaco de la Figura 15 tomando una carga de 582 kN, tal como muestra en la Figura 28.

3.3.3 Resultados del diseño

La estructuración del pavimento para las distintas condiciones calculadas en el punto 3.3.2.3 tomando una superficie de adoquines Tipo A de 80 mm de espesor con una capa de arena de 30 milímetros con una Sub-Base de características descritas en el punto 2.4.2.8 son las siguientes:

Condición	Espesor Adoquín	Capa de Arena	Base Tratada H10	SubBase	Coronación	Subrasante (CBR)
Frenado	80 mm	30 mm	460 mm	150 mm	No necesita	10%
Frenado + Aceleración	80 mm	30 mm	660 mm	150 mm	No necesita	10%
Tránsito Libre	80 mm	30 mm	480 mm	150 mm	No necesita	10%
Almacenamiento de contenedores	80 mm	30 mm	480 mm	150 mm	No necesita	10%

Tabla 18. Resultados de estructuración de pavimento para diferentes condiciones.

En la Tabla 18 se muestran las diferentes capas que componen el pavimento de adoquines, siendo la base tratada la que se diferencia para las distintas condiciones, para la cual la condición de **frenado más aceleración** es la más desfavorable dando un espesor de Base Tratada con Cemento H10 con una capacidad de compresión de 10 MPa a los 7 días y una capacidad de flexión de 1,9 MPa más alto.

3.3.4 Análisis de sensibilidad

Como se observa en el diseño, el número de repeticiones que representa la vida útil del pavimento es una variable muy importante y de la cual no se obtuvo antecedentes estadísticos formales, por ello se realizó un análisis de sensibilidad, variando el número de repeticiones y manteniendo constante la carga que produce el equipo y el contenedor crítico para las distintas condiciones dinámicas que se presentan en la actividad normal del puerto, estos son; frenado, aceleración mas frenado y tránsito libre. (Las tablas de datos del gráfico de la Figura 29 se pueden revisar en el punto C del anexo adjunto)

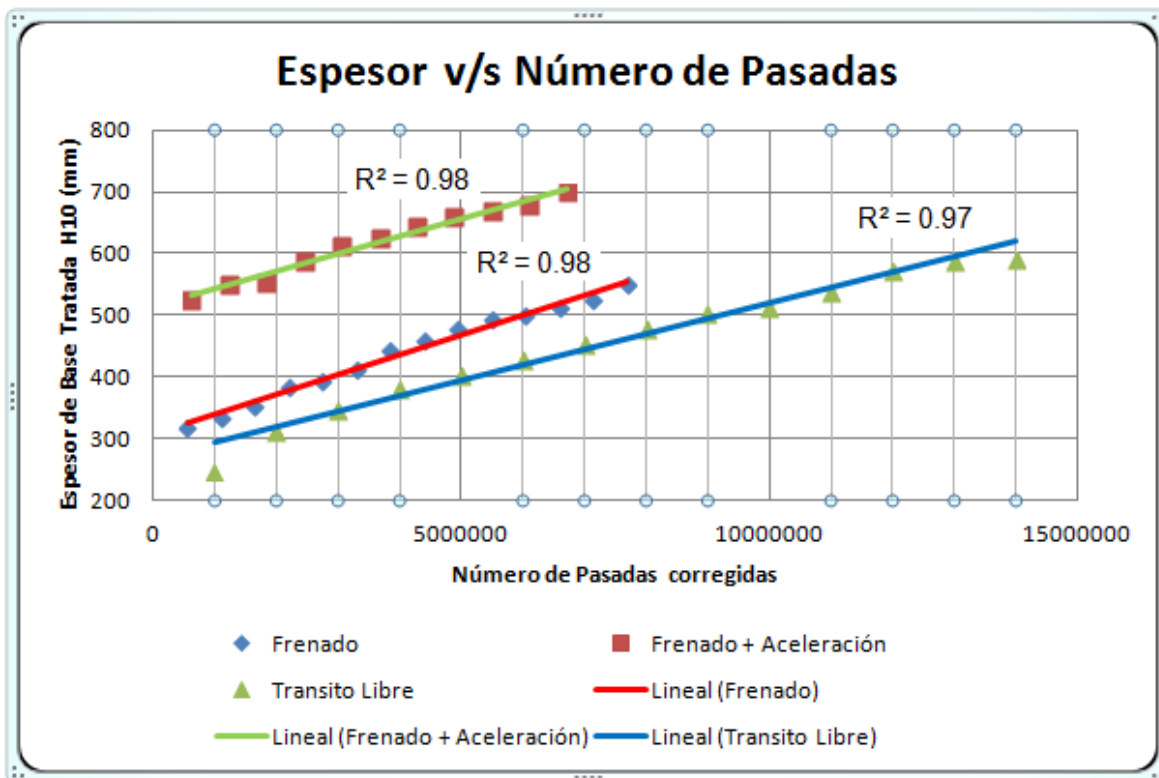


Figura 29. Gráfico de espesores de Base Tratada H10 para distintos números de pasadas y condiciones de tránsito

Como se puede observar en el gráfico de la Figura 29 la relación entre el número de repeticiones versus el espesor de la base tratada H10 es lineal, esto

quiere decir que el espesor del pavimento es directamente proporcional a la vida útil, esto sucede para todas las condiciones de tránsito que se tengan.

También se puede deducir que el diseño menos conservador y arriesgado es considerar un tránsito libre del Reach Stacker, despreciando con ello todos los efectos dinámicos que pueda presentar en este.

La condición más conservadora, o sea la que da mayor espesor de Base Tratada H10, es considerar todas las condiciones dinámicas que se presentan en el equipo, esto es el frenado más la aceleración, arrojando un espesor de Base Tratada mayor a la condición de tránsito libre y la de frenado.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado final de este trabajo es posible establecer las siguientes conclusiones:

Respecto a los métodos de diseño

- Las recomendaciones marítimas españolas ROM, carecen de precisión para variables específicas de carga y mecánica de suelo, pues ocupa solo tablas referenciales sobre el estado de la explanada, régimen de tránsito y tipo de uso, por ende solo servirá para hacer aproximaciones de los resultados.
- Respecto al Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos de Adoquines del Instituto Chileno del Cemento y Hormigón, es un buen manual para cargas bajas y medianas, pero su tratamiento para cargas mayores, descritas en la sección de pavimentos industriales, carece de factores de equivalencia para maquinaria portuaria. Por todo lo señalado anteriormente, es un método bastante poco flexible y detallado para una realidad específica de régimen de cargas de alto tonelaje como se encuentran en un puerto.
- El diseño de pavimentos portuarios de adoquines a través del método semi-empírico de la British Ports Association (BPA), es el método que mejor se ajusta a las variables de diseño en un puerto con presencia de cargas de alto tonelaje, como las que existen en los puertos chilenos, esto porque recoge variables específicas de maquinaria, de las cuales se puede nombrar el factor de proximidad entre ruedas, efectos de profundidad y lo más importante, este método considera los efectos dinámicos que produce el tránsito de los equipos portuarios.

Respecto al diseño

- Se debe tener un conocimiento verdadero de la maquinaria que transita el pavimento a diseñar, al igual que su comportamiento dinámico, pues estas variables condicionan de sobre manera el diseño.
- La variable del número de pasadas es de vital importancia, pues con el se tendrá la vida útil del proyecto, este valor es de difícil obtención, pues requiere de un estudio estadístico por parte del puerto sobre la utilización de sus distintas zonas, esto fue lo más complicado de obtener en el estudio, lo cual se llegó a recurrir a estimaciones informales del régimen de tránsito.
- Las cargas portuarias en un diseño de pavimento de adoquines, no se pueden modelar como cargas estáticas en zonas donde existe maquinaria en movimiento, pues se ve que un modelo estático puede arrojar resultados menores a un modelo con consideraciones dinámicas.
- Para optar a materiales nuevos que no estén presentes en la Tabla 10, se debe hacer un estudio para poder encontrar el factor de conversión, todos los materiales pueden ser utilizados con su correspondiente factor de conversión.
- Como se puede ver en la Figura 29, la cual muestra el gráfico de espesor versus número de pasadas para un efecto dinámico de frenado, presenta una tendencia lineal, esto quiere decir que si el tiempo de vida útil aumenta, mayor debe ser el espesor, las dos variables son directamente proporcionales.
- Para un diseño que considere el efecto dinámico de frenado más aceleración solo se puede diseñar hasta un número de pasadas de 6.702.321, pues para un valor superior el ábaco de diseño de carga simple equivalente no es válido. Un valor mayor de 700 mm de espesor de Base Tratada H10 es una exageración y se debe estudiar de forma específica, mejorando el material de la base estructural, no obstante se puede ver que la relación entre espesor mas el efecto dinámico del frenado más

aceleración, tiene una tendencia lineal, tal como lo muestra el gráfico de la Figura 29.

- El diseño para un régimen de tránsito libre de un Reach Stacker, tiene un comportamiento lineal como muestra el gráfico en la Figura 29, pudiendo encontrar un espesor adecuado a cualquier número de pasadas.
- Para el diseño que ha tomado un vehículo crítico, en este caso la Reach Stacker (ver Figura 20), para condiciones de frenado, de frenado más aceleración y tránsito libre, se obtuvieron espesores de Base Tratada H10 de 460 mm, 660 mm y 480 mm, siendo el más desfavorable el caso de frenado más aceleración siendo esta opción la más recomendada.
- Como el diseño para el almacenamiento de 6 contenedores arroja un espesor de 480 mm de Base Tratada H10, o sea, menor al espesor de las condiciones dinámicas más desfavorable del equipo, no se recomienda utilizarlo, pues se puede arriesgar a que el pavimento falle por sobre carga debido a los constantes cambios en la distribución de las zonas del puerto.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Mazen Taha A. Tayef (2000), International Institute Infrastructural Hydraulic and Environmental Engineering, An Optimum Pavement Design for a Container Terminal Area.

[2] Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio ambiente de España, ROM 4.1-94 Proyecto y Construcción de Pavimentos Portuarios (1994).

[3] Jhon Knapton BSc CEng FICE FIStructE FIHT, David R. Smith, Second Edition (1997), Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers.

[4] Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (1991), Pavimentos de Adoquines Manual de Diseño y Construcción.

[5] Dirección de Obras Portuarias de Chile (1999), Manual de Diseño de Pavimentos para Puertos Chilenos.

[7] Jhon Knapton (2007), Heavy Duty Pavements, The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and other Industries.

[8] Memoria y Balance anual (2009), San Vicente Terminal Internacional.

[9] Operator`s Manual KH11-0199 (2005), Kalmar Global

[10] Revista de Marina (2003), El Transporte Marítimo en El Comercio Exterior de Chile.

[11] BOUSSINESQ Y FROEHLICH (1394), Tratado en la teoría de la elasticidad, 4ªedición Cambridge.

[12] J. KNAPTON (1976), The Design of Concrete Blocks Roads Cement and Concrete Association, Technical Report TRA 42.515 PP.6 Inglaterra

Anexos

ANEXOS

A. MECÁNICA DE SUELOS DEL PUERTO SAN VICENTE.

A.1 Zona A (Sector Rompeolas)

Valor promedio CBR: 70%

Índice de Plasticidad promedio: 7

A.2 Zona B (Sector Costanera)

a. Estratigrafía

Horizonte N°1 (0.00 m – 0.25 m):

Material estabilizado conformado por gravas de tamaño máximo de 1 pulgada, de cantos angulosos, color gris, humedad baja y compacidad alta.

Horizonte N°2 (0.25 m – 0.50 m):

Arena media, con limo, pobremente graduada, de color gris, humedad natural baja y compacidad alta (densa). Se observan gravas de cantos angulosos, de color gris y tamaño máximo 1 pulgada. De acuerdo a USCS, este suelo se clasifica como SP-SM.

Horizontes N°3 (0.50 m – 2.00 m):

Mezcla de arena y grava; la arena es de grano medio, con limo, pobremente graduada, color gris, humedad natural media y compacidad alta; las gravas corresponden a fragmentos de roca clasificada como filita, de colores grises y

azul, baja resistencia mecánica. De acuerdo a USCS, este suelo se clasifica como GP – GM.

No se observó presencia de agua subterránea

A.2.1 Clasificación del Suelo

TAMICES ASTM	Abertura (mm)	% que pasa
3"	80	100
2 ½"	63	93
2"	50	91
1 ½"	37,5	89
1"	25	80
¾"	19	72
3/8"	9,5	52
Nº 4	4,75	40
Nº10	2	34
Nº20	0,85	26
Nº40	0,425	17
Nº60	0,250	12
Nº200	0,075	6

Tabla 19. Distribución granulométrica sector costanera

Cotas Muestra (m): 0,5 - 2
Densidad partículas sólidas (Kg/dm³): 2,87
Clasificación AASHTO: A-1-a(0)
Clasificación USCS: GP-GM
Grava pobremente graduada con limo y arena

A.2.2 Proctor Modificado

Humedad óptima: 6%

DMCS (kg/dm³): 2,468

A.2.3 Capacidad de Soporte CBR

Cota muestra (m): 0,5 – 2

Capacidad de Soporte CBR: 102%

A.3 Zona C (Sector Patio de Contenedores)

A.3.1 Estratigrafía

Horizonte N°1 (0,00 m – 1,5 m):

Mezcla de arena, gravas y fragmentos de roca; la arena es de grano medio, con limo, pobremente graduada, de color café claro, humedad natural media y compacidad media; los fragmentos de roca, clasificada como filita, son de colores gris y azul y baja resistencia mecánica. De acuerdo a USCS, este suelo clasifica como GC.

A.3.2 Clasificación del suelo

TAMICES ASTM	Abertura (mm)	% que pasa
4"	100	-
3"	80	100
2 ½"	63	96
2"	50	88
1 ½"	37,5	83
1"	25	78
¾"	19	76
3/8"	9,5	68
Nº 4	4,75	60
Nº10	2	60
Nº40	0,85	57
Nº200	0,425	32
Sobre tamaño >80 mm (%)		0
Ret. Total >5.0 mm		40
Ret. Total <5.0 mm		60

Tabla 20. Distribución granulométrica sector costanera muelle

Cotas Muestra (m):	0 – 1,5
Limite líquido (%):	37
Limite plástico (%):	24
Índice de plasticidad:	13
Humedad Natural (%):	20.4
Clasificación (ASTM D 2487):	GC
Densidad partículas solidas (g/cm3):	2,47

A.3.3 Proctor Modificado

Humedad óptima:	12,1%
DMCS (kg/dm3):	1,895

A.3.4 Capacidad de Soporte CBR

Cota muestra (m):	0 – 2
Capacidad de Soporte CBR:	10%

A.4 Zona D (Sector Patio de Contenedores)

A.4.1 Estratigrafía

Horizonte N°1 (0,00 m – 0,3 m):

Arena fina, limosa, de color café claro amarillento, humedad natural baja y compacidad baja (suelta). Se observan gravas en forma dispersa.

Horizonte N°2 (0,3 m – 1,1 m):

Mezcla de arena y fragmentos de roca; la arena es de grano medio, con limo, pobremente graduada, de color gris, humedad natural media y compacidad media; los fragmentos de roca, clasificada como filita, son de colores gris y azul y baja resistencia mecánica. De acuerdo a USCS, este suelo clasifica como GC.

Horizonte N°3 (1,1 m – 1,5 m):

Mezcla de arena y fragmentos de roca; la arena es de grano medio, con limo, pobremente graduada, de color café claro, humedad natural media y compacidad baja; los fragmentos de roca, clasificada como filita, son de colores gris y azul y baja resistencia mecánica. De acuerdo a USCS, este suelo clasifica como GC.

A.4.2 Clasificación del suelo

TAMICES ASTM	Abertura (mm)	% que pasa
4"	100	100
3"	80	82
2 ½"	63	80
2"	50	73
1 ½"	37,5	67
1"	25	62
¾"	19	60
3/8"	9,5	55
Nº 4	4,75	46
Nº10	2	46
Nº40	0,85	43
Nº200	0,425	21
Sobre tamaño >80 mm (%)		18
Ret. Total >5.0 mm		54
Ret. Total <5.0 mm		46

Tabla 21. Distribución granulométrica patio contenedores reefer rack

Cotas Muestra (m):	0 – 1,5
Limite líquido (%):	36
Limite plástico (%):	24
Índice de plasticidad:	12
Humedad Natural (%):	17,3
Clasificación (ASTM D 2487):	GC
Densidad partículas solidas (g/cm ³):	2,33

A.4.3 Proctor Modificado

Humedad óptima: 11,8%

DMCS (kg/dm³): 1,91

A.4.4 Capacidad de Soporte CBR

Cota muestra (m): 0 – 2

Capacidad de Soporte CBR: 12%

A.5 Zona E (Sector Patio de Contenedores)

A.5.1 Estratigrafía

Horizonte N°1 (0,0 m – 1,5 m):

Mezcla de arena, gravas y fragmentos de roca; la arena es de grano medio, con limo, pobremente graduada, de color gris, humedad natural media y compacidad muy baja; los fragmentos de roca, clasificada como filita, son de colores gris y azul y baja resistencia mecánica. De acuerdo a USCS, este suelo clasifica como SM.

A.5.2 Clasificación del suelo

TAMICES ASTM	Abertura (mm)	% que pasa
4"	100	100
3"	80	95
2 ½"	63	91
2"	50	88
1 ½"	37,5	84
1"	25	80
¾"	19	76
3/8"	9,5	70
Nº 4	4,75	66
Nº10	2	64
Nº40	0,85	62
Nº200	0,425	20
Sobre tamaño >80 mm (%)		5
Ret. Total >5.0 mm		34
Ret. Total <5.0 mm		66

Tabla 22. Distribución granulométrica patio contenedores

Cotas Muestra (m):	0 – 1,5
Limite líquido (%):	-
Limite plástico (%):	-
Índice de plasticidad:	NP
Humedad Natural (%):	20,6
Clasificación (ASTM D 2487):	SM
Densidad partículas solidas (g/cm ³):	2,51

A.5.3 Proctor Modificado

Humedad óptima:	13%
DMCS (kg/dm ³):	1,884

A.5.4 Capacidad de Soporte CBR

Cota muestra (m):	0 – 2
Capacidad de Soporte CBR:	49%

B. DISTRIBUCIÓN DE CARGA DEL PUERTO DE VALPARAÍSO

De los antecedentes obtenidos del Manual de Diseño de Pavimentos para Puertos Chilenos acerca del catastro de contenedores en el puerto de Valparaíso entre el 25/05/96 y el 02/04/97, se obtuvieron los porcentajes de contenedores para diferentes rangos de carga presentados en la Tabla 23.

Rango (ton)	Media (ton)	N° Contenedores	%	Rango (ton)	Media (ton)	N° Contenedores	%
500-1499	1	45	0,14	22500-23499	23	2063	6,34
1500-2499	2	4147	12,75	23500-24499	24	1351	4,15
2500-3499	3	2543	7,82	24500-25499	25	968	2,98
3500-4499	4	4603	14,16	25500-26499	26	747	2,30
4500-5499	5	599	1,84	26500-27499	27	506	1,56
5500-6499	6	229	0,70	27500-28499	28	399	1,23
6500-7499	7	119	0,37	28500-29499	29	324	1,00
7500-8499	8	126	0,39	29500-30499	30	237	0,73
8500-9499	9	118	0,36	30500-31499	31	35	0,11
9500-10499	10	172	0,53	31500-32499	32	4	0,01
10500-11499	11	146	0,45	32500-33499	33	18	0,06
11500-12499	12	242	0,74	33500-34499	34	0	0,00
12500-13499	13	256	0,79	34500-35499	35	0	0,00
13500-14499	14	373	1,15	35500-36499	36	0	0,00
14500-15499	15	376	1,16	36500-37499	37	0	0,00
15500-16499	16	629	1,93	37500-38499	38	0	0,00
16500-17499	17	956	2,94	38500-39499	39	0	0,00
17500-18499	18	1272	3,91	39500-40499	40	1	0,00
18500-19499	19	2365	7,27	40500-41499	41	0	0,00
19500-20499	20	1961	6,03	41500-42499	42	0	0,00
20500-21499	21	1959	6,02	42500-43499	43	16	0,05
21500-22499	22	2613	8,04				100

Tabla 23. Distribución de carga total de contenedores en el puerto de Valparaíso 1996 – 1997. [5]

De los datos de la Tabla 23 se obtuvo una distribución normal presentada en el gráfico de la Figura 30.

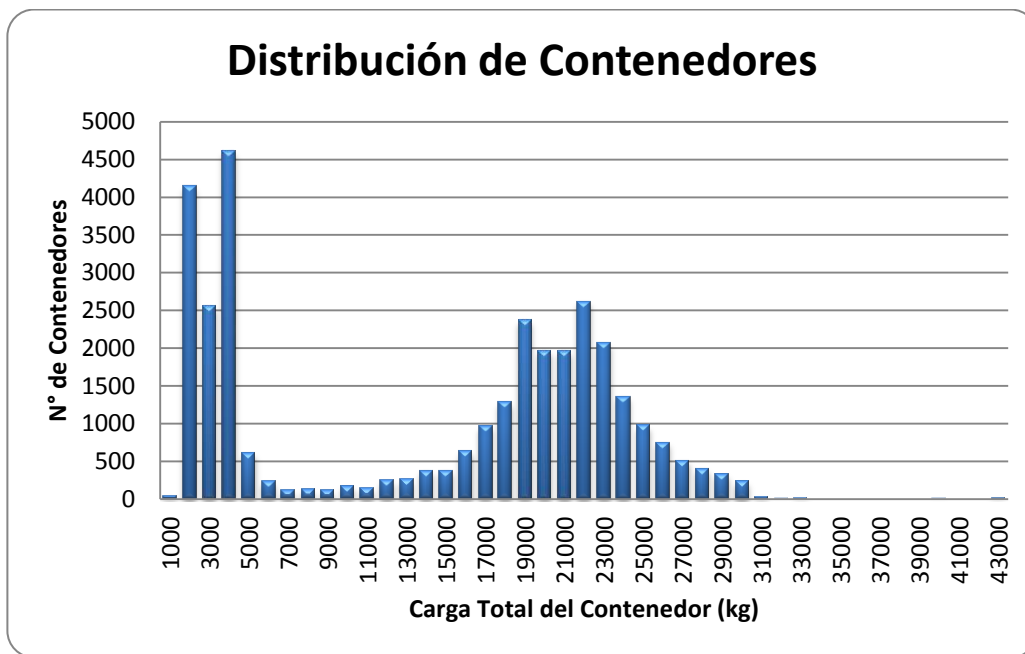


Figura 30. Distribución de carga total de contenedores en el puerto de Valparaíso. [5]

C. DATOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

C.1 Análisis de sensibilidad para el frenado

Datos para el diseño del espesor de Base Tratada H10 para una fuerza equivalente de 288 kN.

Tipo de transito: Frenado		
Fuerza equivalente kN: 288		
N° de pasadas	N° de pasadas (corregido)	Espesor H10
500.000	549.068	320
1.000.000	1.098.136	335
1.500.000	1.647.205	355
2.000.000	2.196.273	385
2.500.000	2.745.341	395
3.000.000	3.294.409	415
3.500.000	3.843.477	445
4.000.000	4.392.546	460
4.500.000	4.941.614	480
5.000.000	5.490.682	495
5.500.000	6.039.750	500
6.000.000	6.588.818	515
6.500.000	7.137.887	525
7.000.000	7.686.955	550

Tabla 24. Análisis de sensibilidad para el efecto dinámico de frenado

C.2 Análisis de sensibilidad para el frenado + aceleración

Datos para el diseño del espesor de Base Tratada H10 para una fuerza equivalente de 533 kN.

Tipo de tránsito: Frenado + aceleración		
Fuerza equivalente kN: 533		
N° de pasadas	N° de pasadas (corregido)	Espesor H10
500.000	609.302	525
1.000.000	1.218.604	550
1.500.000	1.827.906	555
2.000.000	2.437.208	590
2.500.000	3.046.510	615
3.000.000	3.655.812	625
3.500.000	4.265.113	645
4.000.000	4.874.415	655
4.500.000	5.483.717	670
5.000.000	6.093.019	680
5.500.000	6.702.321	700

Tabla 25. Análisis de sensibilidad para el efecto dinámico de frenado + aceleración

C.3 Análisis de sensibilidad para tránsito libre

Datos para el diseño del espesor de Base Tratada H10 para un tránsito libre del Reach Stacker.

Tipo de tránsito:		Transito libre	
Fuerza equivalente kN:		222	
N° de pasadas	N° de pasadas (corregido)	Espesor H10	
500.000	1.000.000	250	
1.000.000	2.000.000	315	
1.500.000	3.000.000	350	
2.000.000	4.000.000	385	
2.500.000	5.000.000	407	
3.000.000	6.000.000	430	
3.500.000	7.000.000	455	
4.000.000	8.000.000	480	
4.500.000	9.000.000	505	
5.000.000	10.000.000	515	
5.500.000	11.000.000	540	
6.000.000	12.000.000	575	
6.500.000	13.000.000	590	
7.000.000	14.000.000	592	

Tabla 26. Análisis de sensibilidad para el tránsito libre