



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

**MÉTODO DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS
EN TERMINALES PORTUARIAS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ING. CIVIL – ANÁLISIS Y DISEÑO DE OBRAS PARA VÍAS
TERRESTRES

P R E S E N T A :

RAMÍREZ LÓPEZ MIGUEL

TUTOR:

ING. SOSA GARRIDO ROBERTO

AÑO 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	M.I. Moreno Pecero Gabriel
Secretario:	M.I. Deméneghi Colina Agustín
Vocal:	Ing. Sosa Garrido Roberto
1 ^{er} . Suplente	M.I. Martínez Mier Jaime Antonio
2 ^{do} . Suplente	M.I. Castilla Camacho Jorge Efrain

Lugar donde se realizó la tesis:

DISTRITO FEDERAL, MÉXICO.

TUTOR DE TESIS:

ING. ROBERTO SOSA GARRIDO

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por permitirme especializarme en una rama de la Ingeniería Civil, la Geotecnia.

A mi familia por el apoyo incondicional que siempre me han brindado. En especial a mi madre por todo el cariño y dedicación que me ha otorgado.

A mis amigos, compañeros y personas especiales que siempre han estado al pendiente de mis actividades. Gracias por la confianza depositada en mí.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido durante los estudios de maestría.

Con cariño

Miguel



Método de diseño para pavimentos en terminales portuarias

Contenido	Página
Introducción	
Capítulo I. Panorama actual de los puertos nacionales	1
I.1 Introducción	1
I.2 Sistema Portuario Nacional	1
I.3 Características del contenedor (TEU)	4
I.4 Almacenamiento de contenedores	5
Capítulo II. Factores implicados en el análisis y diseño del pavimento	7
II.1 Distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento	7
II.2 Propiedades elásticas de las capas estructurales del pavimento	8
II.3 Aplicación de cargas debido al tráfico de los equipos que operan.	11
II.4 Geología de la región.	15
Capítulo III. Estados límite de falla y de servicio	18
III.1 Falla estructural	18
III.2 Falla funcional	19
III.3 Teoría elástica de tres capas	21
III.4 Módulo de resiliencia	22
III.4.1 Dispositivos experimentales usuales	24
III.4.2 Módulo de rigidez elástica (M_R)	26
III.5 Factores que afectan la deformación permanente en suelos cohesivos	27
III.6 Factores que afectan la deformación permanente en suelos granulares	28
III.7 Factores que afectan la deformación en suelos estabilizados	30
III.8 Factores que afectan las deformaciones en el concreto asfáltico	30
III.9 Factores que afectan la fatiga del concreto hidráulico	31
III.10 Esfuerzos en pavimentos por efecto de las cargas	32
III.10.1 Factor de Equivalencia de carga	33
Capítulo IV. Método de diseño	36
IV.1 Variables de diseño	36
IV.1.1 Propiedades elásticas del suelo de cimentación	36
IV.1.2 Propiedades elásticas de la estructura del pavimento	37



Contenido	Página
IV.1.3 Equipo	38
IV.1.3.1 Grúa RTG	38
IV.1.3.2 Cargador Reach Stacker	39
IV.1.3.3 Camiones “Planas”	40
IV.1.3.4 Estibas de contenedores	31
IV.1.4 Vida de diseño	42
IV.1.5 Análisis de tránsito	42
IV.1.5.1 Grúa RTG	42
IV.1.5.2 Cargador Reach Stacker	42
IV.1.5.3 Camiones “Planas”	42
IV.2 Análisis de la estructura del pavimento con elemento finito	43
IV.3 Aspectos complementarios al diseño	52
IV.3.1 Concreto	52
IV.3.1.1 Materiales	53
IV.3.1.2 Colocación	54
IV.3.1.3 Juntas	54
IV.3.1.4 Acabado	56
IV.2.2 Adoquines	56
IV.2.2.1 Diseño	56
IV.2.2.2 Materiales	56
IV.2.2.3 Bordillo	57
IV.2.2.4 Colocación	58
IV.2.2.5 Juntas de expansión	59
IV.2.2.6 Acabado	59
IV.2.3 Asfalto	59
IV.4 Consideraciones de diseño en la estructura de pavimento con adoquín	60
IV.4 Análisis de resultados	62
IV.4.1 Equipo cargador Reach Stacker	62
IV.4.2 Equipo grúa RTG	62
IV.4.3 Equipo camiones articulados	63
IV.4.4 Contenedores	63
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	65
V.1 Conclusiones	65
V.2 Recomendaciones	67
Bibliografía	68
Anexos	



Introducción

Las obras de ingeniería deben de realizarse de forma segura, económica y funcional, pero siempre cumpliendo con las finalidades para las cuales fueron proyectadas. Un pavimento debe de cumplir con las características antes citadas y para lograrlo se deben de considerar todas las variantes que se presentan en el diseño y construcción.

Actualmente, debido al crecimiento de la inversión privada en la actividad portuaria, se exige que la vida útil de los pavimentos sea de 25 años, esta condición ha llevado a la ingeniería a adoptar criterios de durabilidad en el diseño y construcción de los pavimentos.

El presente trabajo contiene los criterios para el diseño de pavimentos en terminales portuarias, ejemplifica un caso práctico de pavimento rígido y semi-flexible y también enuncia las recomendaciones básicas para diseño y construcción de los mismos.

En los capítulos siguientes de este trabajo se realizará un análisis de las cargas que actúan en las áreas de almacenamiento, algunas características de la geología que se presenta en los puertos y las consideraciones necesarias para que de esta manera se apliquen los criterios de diseño adecuados para el diseño del pavimento.

En el capítulo I se da a conocer el panorama general de los puertos nacionales y la tendencia de crecimiento que tienen éstos debido al tráfico de mercancía en general. Se define la magnitud de la carga que se transporta en contenedores (carga contenerizada) y las características de estos recipientes que sirven para el transporte.

Los factores que influyen en el análisis y diseño de los pavimentos se enumeran en el capítulo II. Análisis de cargas, equipos que operan en una terminal portuaria, materiales, carpeta de rodamiento y geología son los factores principales sobre los que se enfocará el desarrollo de este capítulo. Una breve mención de la problemática que se presenta en los puertos es aquella debida al origen geológico de los suelos sobre los que se desplantan las terminales portuarias.

En el capítulo III se planteará la revisión de los estados límite de falla y servicio de los pavimentos. La revisión por estado límite de falla se realizará comparando los esfuerzos generados por las cargas versus los esfuerzos máximos que puede soportar la estructura del pavimento sin llegar a la falla. El estado límite de servicio definirá los asentamientos máximos permisibles que se pueden presentar en la estructura sin afectar la correcta funcionalidad del pavimento, se propone una presión de contacto admisible para regular la magnitud del asentamiento, la geología del sitio presenta una variable muy importante que debe de ser estudiada a fondo para proponer un mejoramiento de suelo en caso de ser necesario.

Un diseño de pavimento se ejemplifica en el capítulo IV a manera de emplear los criterios que se proponen para el análisis; así mismo, se describe el procedimiento constructivo para pavimentos rígidos (concreto) y pavimento semi-flexible (adoquín).

En el capítulo V se presentan las conclusiones que se obtuvieron del presente trabajo, también se hacen las recomendaciones respectivas de diseño y construcción para menguar factores que puedan afectar la vida útil del pavimento proyectado.

Objetivo general

Determinar una metodología para el diseño de pavimentos portuarios, en especial, en áreas de almacenamiento y operación de carga contenerizada.

Objetivos particulares

- Mostrar la situación actual de los puertos nacionales y la importancia del desarrollo de la infraestructura portuaria.
- Describir la importancia de los patios de operación y almacenamiento de carga en las terminales portuarias.
- Enunciar y describir las variables que intervienen en el diseño del pavimento.
- Proporcionar gráficas de apoyo para determinar el espesor de las capas estructurales del pavimento.
- Presentar un análisis comparativo entre las estructuras de pavimentación de concreto y adoquín, tanto técnica como económica.

La finalidad del presente trabajo consiste en que sea de utilidad y guía para aquellas personas que estén interesadas en el diseño de pavimentos para terminales portuarias, además de obtener un diseño confiable, seguro y económico.

Capítulo I. Panorama actual de los puertos nacionales

I.1 Introducción

Por los puertos se transporta poco más de un tercio del total de la carga del país y la mayor parte del volumen de las exportaciones, a la vez que operan como plataformas de importantes industrias como son la química, petroquímica, energía eléctrica, metalúrgica, minería, cemento, pesca, turismo náutico y de cruceros, ensamblaje, actividades logísticas y de almacenamiento, entre otras.

En los últimos años, los puertos mexicanos han destacado por su elevado crecimiento de los volúmenes de mercancías manejadas, por la diversificación de sus actividades y como áreas de oportunidad para nuevas inversiones y generación de empleos en terminales, instalaciones y negocios portuarios, comerciales e industriales.

Hoy día, México cuenta con puertos que compiten por su eficiencia en la operación de contenedores con puertos líderes en el mundo y muestra avances importantes en la operación de otros tipos de carga.

La infraestructura portuaria existente en los puertos ha sido el resultado de importantes esfuerzos de inversión por parte del sector público y el sector privado. Ello ha hecho posible que el país cuente con una oferta suficiente para atender la demanda de servicios portuarios por parte de la industria exportadora, el comercio interno y, en general, por el aparato productivo nacional.

I.2 Sistema Portuario Nacional

El Sistema Portuario Nacional está conformado por 114 puertos y terminales habilitadas, 56 en el Pacífico y 58 en el Golfo de México y Caribe; 66 son para tráfico de altura y cabotaje y 48 únicamente de cabotaje. La capacidad instalada para el manejo de carga comercial no petrolera es de 187.3 millones de toneladas, dispone de 198.1 kilómetros de muelles, 149.3 kilómetros de obras de protección y 5.6 millones de metros cuadrados de áreas de almacenamiento.

En la siguiente figura se aprecia la ubicación de los distintos puertos marítimos.

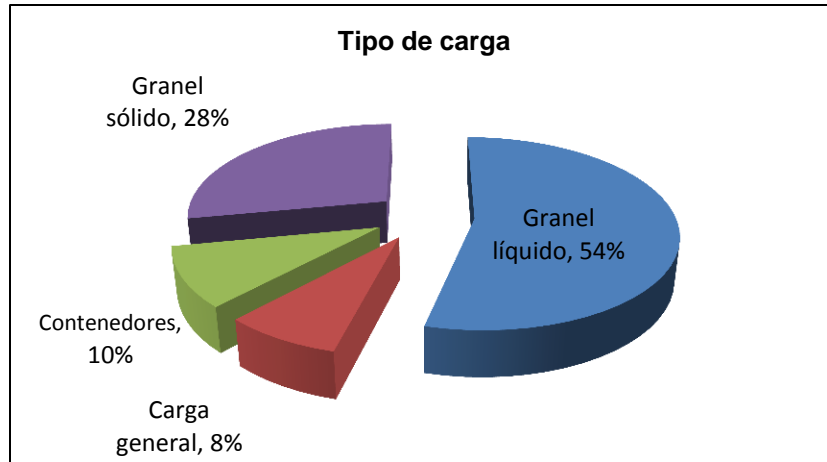
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS



Figura 1. Sistema Portuario Nacional

En conjunto, el Sistema Portuario Mexicano movió, durante el año 2010, más de 272 millones de toneladas de carga, de las que aproximadamente 198 millones fueron tráfico de altura y 74 millones correspondieron a cabotaje.

En cuanto a la forma de presentación de la carga, según puede observarse en la gráfica a continuación, los graneles líquidos tienen una importancia fundamental, representando más del 50% de la carga movida por el sistema portuario. Por su parte, los graneles sólidos representan el 28% de la carga movida, los graneles líquidos el 54% y queda el resto para la carga general contenerizada y suelta.



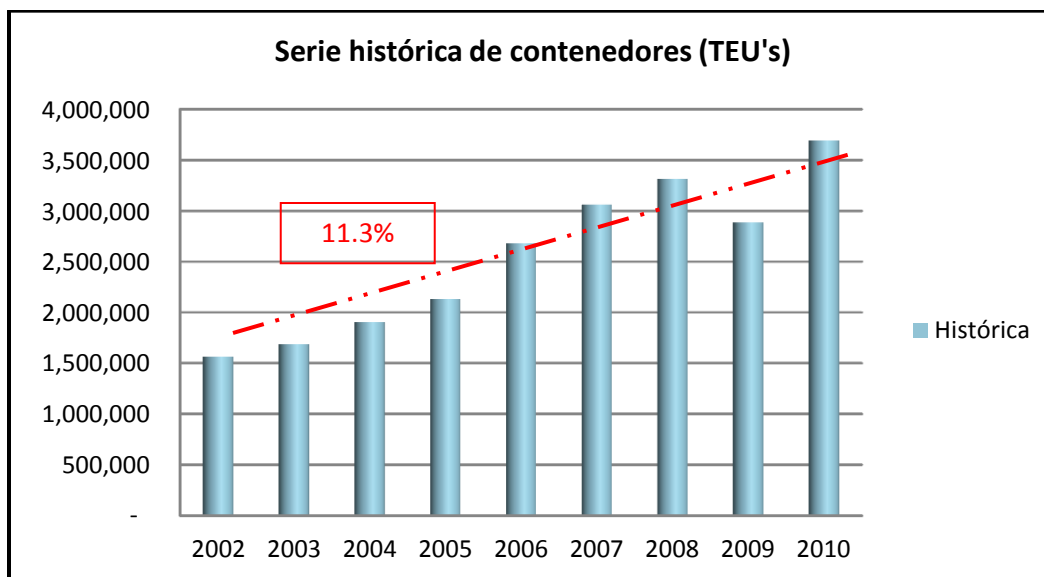
Gráfica 1. Tipo de carga movida en el SPN. Fuente: SCT.

La carga general contenerizada tiene algunas peculiaridades respecto al resto de formas de presentación de la mercancía, entre las que destaca principalmente la ausencia de tráfico de cabotaje.

Durante el año 2010 se movieron más de 29 millones de toneladas en contenedores, de las que 67% fueron movidas por los puertos del subsistema portuario pacífico.

Así mismo el tráfico de contenedores ha mantenido una alta tasa de crecimiento durante el periodo 2002-2010 en el que México ha pasado de mover 1,500,000 TEU's a más de 3,500,000 TEU's, lo que representa una tasa media de crecimiento anual de 11.3%.

Tabla 1. Evolución histórica del tráfico de mercancía contenerizada. Fuente: SCT.



Por último cabe señalar que en conjunto, el tráfico de contenedores está bastante equilibrado, representando la carga de importación un 53% y la exportación un 47%.

I.3 Características del contenedor (TEU)

Las siglas TEU (acrónimo del término en inglés Twenty-foot Equivalent Unit) representa la unidad de medida de capacidad del transporte marítimo en contenedores. Una TEU es la capacidad de carga de un contenedor normalizado de 20 pies de longitud.

Un contenedor es un recipiente de carga para el transporte aéreo, marítimo, terrestre y multimodal.

Existen diferentes tipos de contenedores:

- Dry Van: son los contenedores estándar. Cerrados herméticamente y sin refrigeración o ventilación.
- High Cube: contenedores estándar mayoritariamente de 40 pies de longitud. Su característica principal es su sobre altura (9.6 pies).
- Reefer: contenedores refrigerados de las mismas medidas que el anteriormente mencionado (40 pies) pero que cuentan con un sistema de conservación de frío o calor y termostato.
- Open Top: De las mismas medidas que los anteriores, pero abiertos por la parte de arriba. Puede sobresalir la mercancía pero, en ese caso, se pagan suplementos en función de cuánta carga haya dejado de cargarse por este exceso.
- Flat Rack: carecen también de paredes laterales e incluso, según casos, de paredes delanteras y posteriores. Se emplean para cargas atípicas y pagan suplementos de la misma manera que los open top.
- Open Side: su mayor característica es que es abierto en uno de sus lados, sus medidas son de 20' o 40'. Se utiliza para cargas de mayores dimensiones en longitud que no se pueden cargar por la puerta del contenedor.
- Tank o Contenedor cisterna: para transportes de líquidos a granel.
- Flexi-Tank: para transportes de líquidos a granel. Suponen una alternativa al contenedor cisterna. Un flexi-tank consiste en un contenedor estándar

(Dry Van), normalmente de 20 pies, en cuyo interior se fija un depósito flexible de polietileno de un solo uso denominado flexibag.

Existen diferentes medidas para contenedores variando en largo y alto:

- El ancho se fija en 8 pies (2,44 metros)
- El alto varía entre 8 pies y 6 pulgadas (2,59 m) ó 9 pies y 6 pulgadas (2,90 m).
- El largo varía entre 8 pies (2,44 metros); 10 pies (3,05 m); 20 pies (6,10 m); 40 pies (12,19 m); 45 pies (13,72 m); 48 pies (14,63 m) y 53 pies (16,15 m).

Lo más extendido a nivel mundial son los equipos de 20 y 40 pies, con un volumen interno aproximado de 32,6 m³ y 66,7 m³ respectivamente.

La carga máxima puede variar según la naviera y el tipo de contenedor. Los contenedores más normalizados internacionalmente de 20 pies tienen un peso bruto máximo de unas 29 t (es decir, la carga más la tara o peso del contenedor) y los de 40 pies de unas 32 t.

Tabla 2. Medidas (interiores) de los contenedores más utilizados tipo *Dry Van*

	20 pies, 20' x 8' x 8'6"	40 pies, 40' x 8' x 8'6"	40 pies High Cube, 40' x 8' x 9'6"
Tara	2,300 kg / 5,070 lb	3,750 kg / 8,265 lb	3,940 kg / 8,685 lb
Carga máxima	28,180 kg / 62,130 lb	28,750 kg / 63,385 lb	28,560 kg / 62,965 lb
Peso bruto	30,480 kg / 67,200 lb	32,500 kg / 71,650 lb	32,500 kg / 71,650 lb
Uso más frecuente	Carga seca normal: bolsas, palés, cajas, tambores, etc.	Carga seca normal: bolsas, palés, cajas, tambores, etc.	Especial para cargas voluminosas: tabaco, carbón.
Largo	5,898 mm / 19'4"	12,025 mm / 39'6"	12,032 mm / 39'6"
Ancho	2,352 mm / 7'9"	2,352 mm / 7'9"	2,352 mm / 7'9"
Altura	2,393 mm / 7'10"	2,393 mm / 7'10"	2,698 mm / 8'10"
Capacidad	32.6 m ³ / 1,172 ft ³	67.7 m ³ / 2,390 ft ³	76.4 m ³ / 2.700 ft ³

Fuente: Norma ISO 6346

1.4 Almacenamiento de contenedores

Los operadores portuarios, debido al crecimiento del transporte de carga contenerizada (11.3% anual), se han visto en la necesidad de ampliar sus instalaciones además de sus áreas de almacenamiento. Si el área de almacenamiento se encuentra saturada proceden a apilar un contenedor más

sobre la estiba de 5 contenedores, pero esta condición hace una operación ineficiente para la logística del puerto.

El arreglo común de almacenamiento se realiza a través de estibas de 5 contenedores y en ocasiones de 5+1 contenedor.

En la figura 2 se muestra el arreglo típico para la estiba de contenedores.

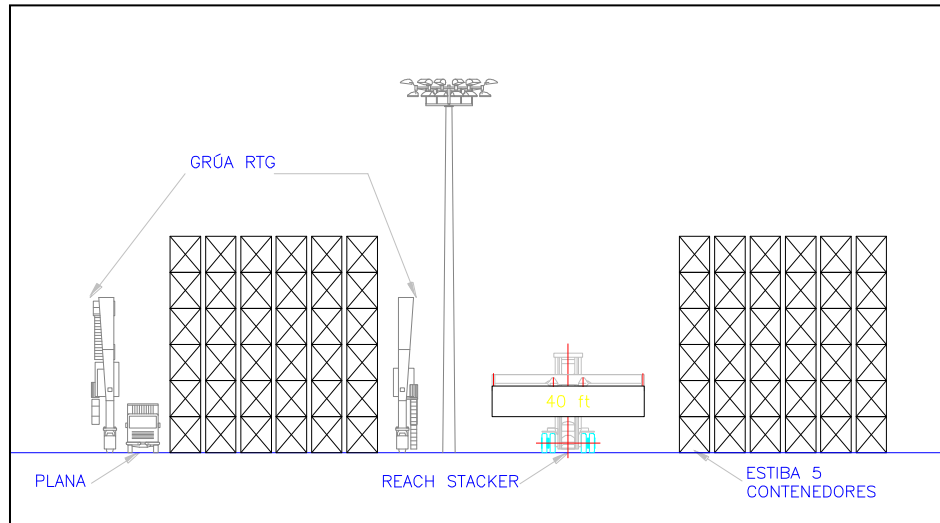


Figura 2. Estiba de contenedores

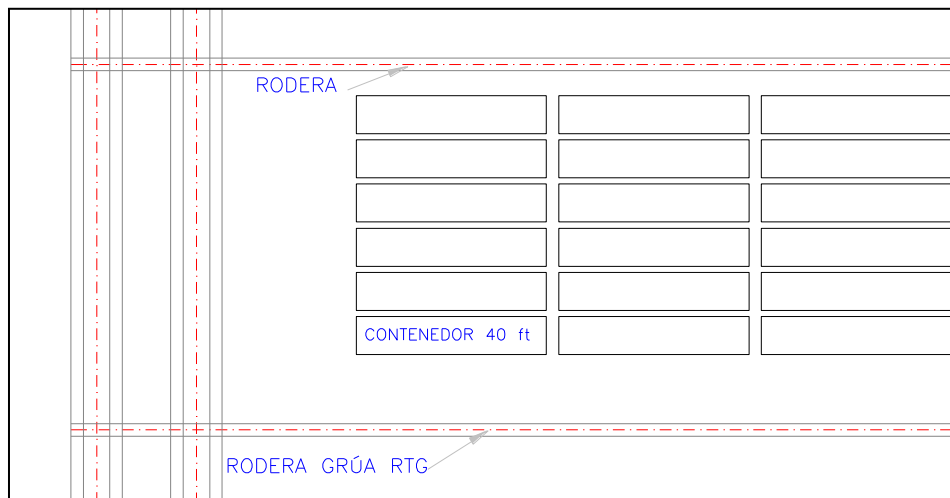


Figura 3. Vista en planta de la estiba de contenedores

El panorama del transporte de carga contenerizada es muy alentador en los puertos nacionales; de esta manera, las áreas de almacenamiento estarán en constante movimiento debido a la actividad del apilamiento de contenedores, movimientos de grúa RTG y tránsito local de los camiones (Planas).

Capítulo II. Factores implicados en el análisis y diseño del pavimento

En la actualidad existen tres metodologías que se emplean en el diseño de un pavimento, éstas son:

- Métodos empíricos
- Métodos experimentales, y
- Métodos teóricos

En el presente trabajo se desarrolla una metodología de análisis del tipo teórico debido a la existencia de herramientas de análisis más confiables como lo es el Elemento Finito para la determinación de la distribución de esfuerzos y las deformaciones en el suelo. Los otros dos métodos emplean la observación y la experimentación para determinar las variables de diseño.

Las variables involucradas en el diseño de los pavimentos son tan variadas según el método a emplear. Para un diseño empleando metodología teórica se pueden enumerar las siguientes variables principales:

1. Distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento.
2. Propiedades elásticas de las capas estructurales del pavimento (carpeta, base, subbase y subrasante).
3. Aplicación de cargas debido al tráfico de los equipos que operan.

II.1 Distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento

Los métodos de diseño tradicionales emplean la teoría de Boussinesq, Westergaard y Burmister para la determinación de los esfuerzos actuantes a través de la masa del suelo en base a la profundidad de la estructura del pavimento. Actualmente el método de análisis por Elementos Finitos proporciona mayor precisión en dicha determinación de esfuerzos debido a que toma en consideración que el pavimento es un material no homogéneo (estratificado), de comportamiento esfuerzo-deformación no lineal y con condiciones de frontera complicadas. (Díaz-Rodríguez, 2009).

A continuación se enumeran, de manera general, los pasos a seguir para encontrar la solución a un problema del continuo usando el método de elementos finitos:

1. Discretización del continuo.- es el proceso mediante el cual el continuo es subdividido en un sistema equivalente de elementos finitos.
2. Selección del modelo de desplazamiento.
3. Obtención de la matriz de rigidez elemental.- se obtiene mediante el uso de un principio variacional para formular las ecuaciones del sistema que

relaciona las condiciones del elementos (propiedades) con la solución buscada.

4. Ensamble de las matrices elementales en la matriz global.- incluye el ensamble de la matriz global para el cuerpo entero a partir de las matrices elementales.
5. Solución de los desplazamientos incógnita.
6. Cálculo de los esfuerzos y deformaciones.

Una de las soluciones que se obtiene al aplicar el método de elementos finitos es la determinación de los esfuerzos y deformaciones que se presentan en una red de nodos que con anterioridad se definió en el programa de análisis (discretización del medio).

Existen a la venta variados programas de análisis. El software a emplear será "Plaxis" Versión 8 el cual es una paquetería basada en elementos finitos enfocada al análisis de la deformación en las estructuras del suelo.

II.2 Propiedades elásticas de las capas estructurales del pavimento

Para determinar la respuesta de un elemento sometido a la aplicación de carga es necesario conocer sus características elásticas, es decir, los parámetros elásticos con los que cuenta dicho material. La teoría de la elasticidad considera al suelo como un medio continuo, homogéneo e isótropo además de considerar una relación lineal o proporcional entre esfuerzos y deformaciones. (Timoshenko, 1933).

Para el empleo de la teoría de la elasticidad se involucran hipótesis simplificadoras, más sin embargo, las soluciones a las que se llega resultan de aproximación suficiente para la práctica profesional. (Díaz-Rodríguez, 2009).

La notación correspondiente para designar la tensión o compresión sobre un elemento es la letra σ y la T para la tensión tangencial. Para indicar la dirección del plano sobre el cuál actúa la tensión se pone un subíndice a la letra que expresa la tensión. La tensión tangencial se descompone en sus dos componentes paralelas a los ejes coordenados, en este caso se usan dos subíndices: el primero indica la dirección normal al plano en cuestión y el segundo, la dirección de la componente de la tensión en sí misma. En la figura 4 se observa esta notación.

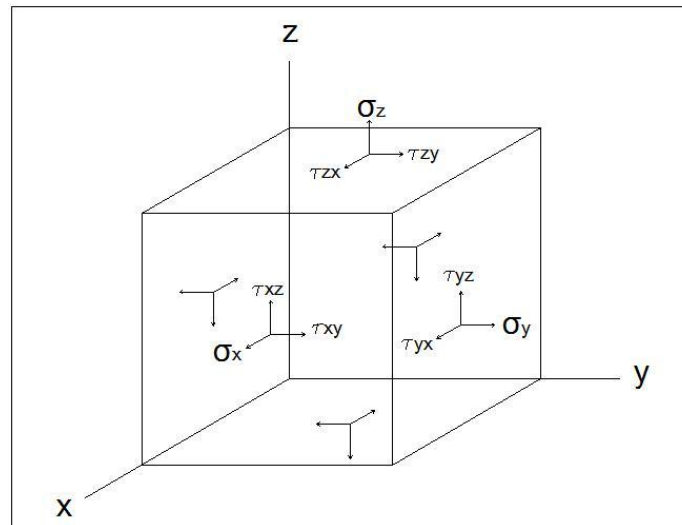


Figura 4. Elemento cúbico

Con base en lo representado en la figura anterior se conocen tres tensiones normales que actúan sobre las caras del cubo, σ_x , σ_y y σ_z , y seis esfuerzos tangenciales τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} , y τ_{zy} .

Las componentes de deformación se denotan con las letras u , v y w paralelas a los ejes x , y , z . se representa mediante la letra ϵ la deformación longitudinal y mediante la letra γ , la deformación tangencial.

$$\epsilon_x = \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y}$$

Las seis componentes $\epsilon_x \dots \gamma_{yz}$, reciben el nombre de componentes de deformación.

La relación entre las componentes de la tensión y la deformación se conoce con el nombre de Ley de Hooke. La magnitud de la deformación longitudinal está definida por la ecuación:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

donde E es el módulo de elasticidad longitudinal. La dilatación del elemento en la dirección x viene acompañada de las contracciones laterales.

$$\epsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E}$$

$$\epsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E}$$

en las cuales ν es una constante llamada coeficiente de Poisson, (Timoshenko, 1933). Para muchos materiales el coeficiente de Poisson puede igualarse a 0.25,

sin embrago, existen valores típicos del coeficiente de Poisson que varían desde 0.1 hasta 0.45 dependiendo de la naturaleza del suelo.

La tabla 3 lista valores típicos de módulo E equivalente (E_{eq}) y de la relación de Poisson (ν) para varios suelos. El uso de la tabla requiere criterio y experiencia por lo que su uso deberá limitarse para realizar estimaciones. (Díaz-Rodríguez, 2009).

Tabla 3. Parámetros elásticos de varios suelos

TIPO DE SUELOS	E (Kg/cm ²)	ν
Arcilla blanda	21 – 53	0.3 – 0.5
Arcilla media	51 – 105	0.3 – 0.5
Arcilla rígida	105 – 246	0.1 – 0.3
Limo arenoso	105 – 176	0.2 – 0.4
Arena suelta	105 - 246	0.2 – 0.4
Arena semi-densa	175 – 281	0.25 – 0.40
Arena densa	352 – 563	0.30 – 0.45
Arena y grava (suelta)	490 – 1468	0.15 – 0.30
Arena y grava (densa)	980 - 1960	0.20- 0.35

Los ensayos de laboratorio también proporcionan las constantes elásticas de E y ν , el método consiste en someter un espécimen de suelo a un estado de esfuerzos efectivos y realizar ciclos de carga y descarga aumentando gradualmente el nivel de esfuerzos en cada ciclo. En una gráfica adjunta se dibuja el esfuerzo desviador alcanzado y la deformación recuperable que presentó el suelo.

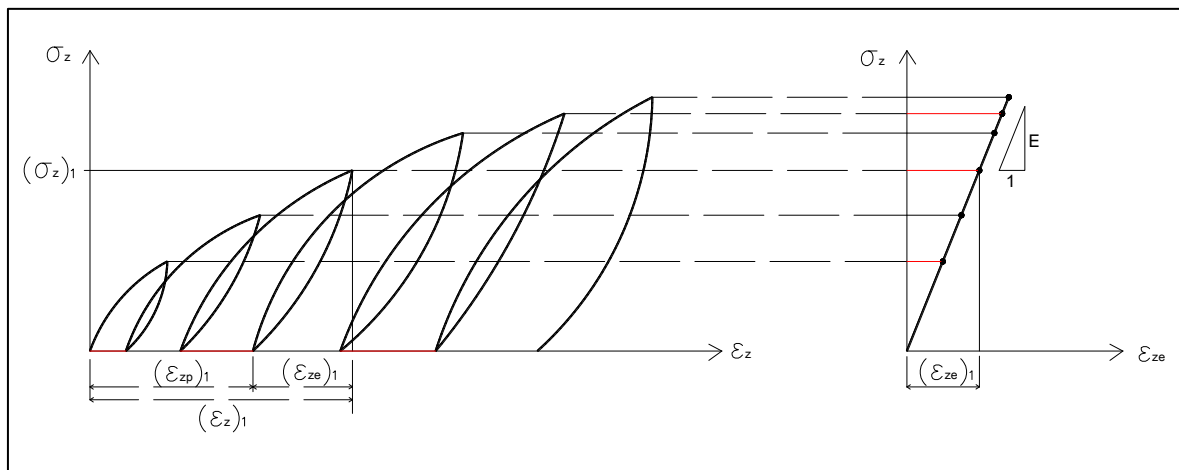


Figura 5. Determinación experimental del módulo E_{eq}

Otro método, pero de aplicación in situ, es el ensaye de prueba de placa, este ensaye da como resultado las propiedades elásticas del suelo en cuestión. El método consiste en someter al terreno a una carga que aumenta en incrementos e ir midiendo el asentamiento producido bajo cada incremento de carga. La norma ASTM D-1194 detalla el desarrollo experimental de la prueba de placa.

II.3 Aplicación de cargas debido al tráfico de los equipos que operan.

El equipo que opera en una terminal portuaria es variado, van desde grúas montadas sobre rieles que sirven para la carga y descarga de contenedores sobre los buques hasta montacargas que sirven para movilizar la carga suelta. En el área de almacenamiento de una terminal portuaria operan equipos como grúas montadas sobre neumáticos (Rubber Tyred Gantry o RTG por sus siglas), cargadores de contenedores (Reach Stacker) y camiones articulados (Planas).

La grúa RTG (Rubber Tyred Gantry) es un componente imprescindible para la operación de las terminales de contenedores. Se trata de un elemento seguro, eficiente, robusto y preciso. Consiste en una grúa pórtico móvil sobre neumáticos de caucho que se desplaza a través de roderas, actualmente éstas grúas pueden apilar hasta una altura de seis contenedores y la máxima carga a elevar puede variar de 40 a 60 ton en 2 contenedores (TEU's). En la figura 6 se observa una grúa RTG montada sobre 8 neumáticos.



Figura 6. Grúa RTG en vías de ferrocarril

Las grúas RTG pueden contener 4, 8 y 16 ruedas siendo la más común la grúa de 8 ruedas. Las dimensiones de la rueda se define como 18.00 – 25 la cual se

interpreta como 1,635 mm de diámetro con un ancho de sección de 498 mm, según el catálogo de neumáticos que se muestra en el anexo 2.



Figura 7. Arreglo de llantas en grúa RTG.

Los cargadores Reach Stacker también tienen una participación considerable en el movimiento de contenedores dentro de las terminales portuarias, existen cargadores solo para manipular contenedores vacíos y también los hay para manejar contenedores llenos. El arreglo geométrico de las llantas se observa en el anexo 1 y las características de las llantas, las cuales son iguales a las que emplea una grúa RTG, se observan en el anexo 2.



Figura 8. Cargador Reach Stacker



Figura 9. Reach Stacker en operación.

Un tercer medio para mover contenedores es por medio de camiones articulados llamados “Planas”, estos camiones son del tipo T2-S2. La geometría de estos camiones se muestra en el anexo 1 y las llantas son del tipo 285/75 R24.5, con un ancho de sección de 27.7 cm y una presión de inflado de 110 psi. En el anexo 2 se detallan las características de los neumáticos para camiones.



Figura 10. Camión tipo T2-S2 “Planas”

En los patios de almacenamiento de contenedores se presenta una concentración de esfuerzos debido al apilamiento de contenedores, actualmente se llegan a apilar hasta 6 contenedores llenos que descargan su peso sobre cuatro esquinas del contenedor localizado en la parte baja en una sección de 15.2 x 17.8 cm (6 in x 7 in) por cada esquina y frecuentemente sobresalen 1.27 cm (0.5 in) por debajo de la parte baja del contenedor. El peso de un contenedor lleno en promedio es de 30,480 kg con una tara de 2,350 kg, sumando un total de 32,830 kg.



Figura 11. Placas de identificación para el peso de contenedores.

Cada estiba de contenedores se debe espaciar un mínimo de 40 cm de distancia de la otra estiba para permitir una operación libre de la grúa sin interferir con el contenedor vecino, de la misma manera se busca una menor concentración de esfuerzos sobre el pavimento.

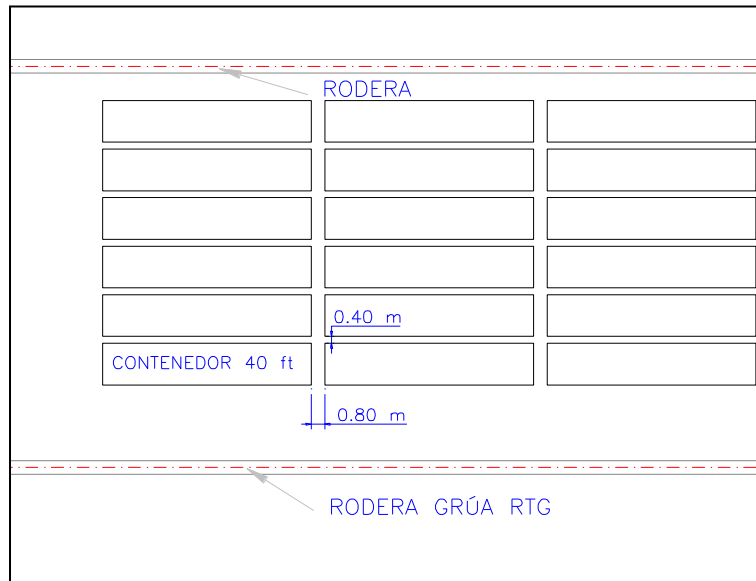


Figura 12. Vista en planta del apilamiento de contenedores, separación entre estibas.

El transporte de mercancía se realiza en contenedores que tienen por dimensiones 20x8x8.5 pies. Aparte del contenedor de 20 pies, que se conoce como una TEU, hay otros tamaños y tipos de contenedores. Los de uso más frecuente son de 40 pies y tienen por dimensiones 40x8x8.5 pies.

II.4 Geología de la región.

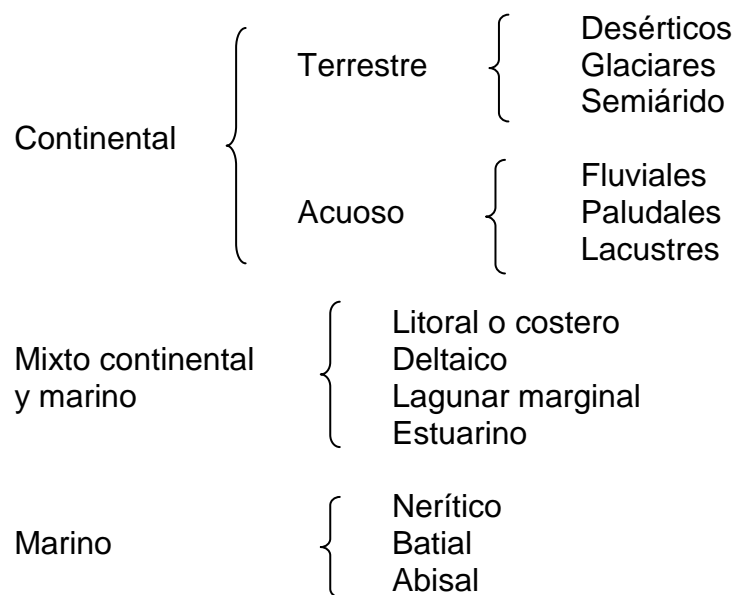
La anterior descripción da un panorama de los equipos que operan en una terminal y de este modo se conoce la magnitud de las cargas que estarán actuando sobre los pavimentos de almacenamiento. El conocer las características del suelo de soporte es de igual importancia para determinar los espesores de la estructura del pavimento. Otra variable que debe de ser tomada en cuenta es la geología de la región donde estarán construidos los pavimentos ya que muchos de los puertos del país están desplantados sobre la desembocadura de algún río.

La geología de la región es de especial importancia ya que representa el punto de partida para constituir un reconocimiento geotécnico del sitio. El reconocimiento geológico proporciona información de gran ayuda para conocer el tipo de material o materiales con los cuales se deberá trabajar durante el diseño y la construcción

de la obra civil, de la misma manera, el estudio de mecánica de suelos determinará las propiedades índice, mecánicas e hidráulicas de los depósitos presentes en el sitio de estudio, dicho estudio identificará a detalle el perfil estratigráfico de sitio y corroborará la geología previamente determinada.

El origen geológico de los depósitos de los materiales se debe al medio ambiente en que se desarrollaron. López Ramos, en 1993 muestra la base para clasificar el medio ambiente de depósito dependiendo básicamente si el sedimento puede presentarse en la parte continental, en un ambiente marino o en un ambiente mixto.

Cuadro 1. Medios ambientes



El medio ambiente de interés es el mixto continental y marino ya que en este ambiente es donde se encuentran desplantadas las terminales portuarias.

- **Medio ambiente litoral o costero**

Este medio consiste en aquella parte de la costa cuya zona es expuesta durante la bajamar y cubierta con agua durante la pleamar. Los depósitos litorales consisten principalmente en materiales que varían de cantos rodados a arcillas, Localmente se encuentran conchas, que en la mayoría de los casos están rotas y es conveniente llamarlas *gravas de conchas* y *arenas de conchas*.

- **Medio ambiente deltaico**

El delta es definido como una terraza de sedimentos construidos por corrientes a su entrada dentro de un cuerpo de agua. Un delta está compuesto por sedimentos de depositación subaérea o subacuosa. Los de depositación subaérea consisten

en depósitos fluviales, lacustrinos, paludales y eólicos. Los depósitos subacuáticos son aquellos formados dentro del cuerpo permanente de agua. Un delta generalmente está constituido de 3 series de capas, que son: superior, delantera e inferior.

La serie superior, superficie subaérea del delta, presenta sedimentos que consisten en material orgánico, arcillas, limos y arenas. Las gravas pueden estar presentes aunque no son comunes excepto en corrientes que fluyen dentro del mar, directamente de regiones montañosas; en este caso la grava llega a constituir una parte importante de los sedimentos.

La serie delantera, materiales que se descargan sobre el frente del delta dentro del agua, presenta sedimentos compuestos por arenas, limos y arcillas en unidades lenticulares.

La serie inferior, formada por lodos finos depositados sobre el fondo del agua, presenta depósitos de materiales finos y coloides en suspensión.

- **Medio ambiente lagunar marginal**

Una laguna es un cuerpo de agua de poca profundidad, separada del mar por una barrera de playa, banco de arena o barra. Ésta recibe agua dulce, sedimentos fluviales y agua salada del mar durante la parte alta de la marea. Los sedimentos de fondo normalmente muestran formas de arena fina a limo, y de arcillas con abundante material orgánico en las áreas tranquilas. La arena fina, limos y arcillas acarreadas por corrientes, son aumentadas por arenas transportadas por el viento de las barras, material orgánico y carbonatos de organismos; todos en conjunto proporcionan una amplia variedad de tipos sedimentarios lagunares.

- **Medio ambiente estuarino**

Un estuario es la parte del curso inferior de un río (desembocadura) que es afectado por las mareas, y su extensión depende de la variación de aquéllas. Las mareas altas retienen las aguas corrientes y la cantidad así retenida depende de la altura que éstas alcancen. Cuando la marea baja, la energía almacenada empuja a las aguas con considerable velocidad hacia el mar.

Los sedimentos de los estuarios son derivados de las corrientes y/o el mar como pueden ser arenas, limos, arcillas y material orgánico. La estratificación de los depósitos de estuario tiende a ser irregular en algunas unidades con algo de estratificación cruzada, limitadas por planos que no son paralelos.

Capítulo III. Estados límite de falla y de servicio

Un Estado Límite es una situación caracterizada por el valor de una magnitud física, tal que de ser rebasada, haría que la estructura dejara de ser apta para su uso, ya sea por falla estructural total o parcial o por una pérdida significativa de funcionalidad. El reglamento de construcción del Distrito Federal menciona que la revisión de la seguridad de una estructura ante estados límite de falla consiste en comparar la capacidad de carga de un suelo contra las acciones de diseño, de la misma manera; la revisión de la estructura ante estados límite de servicio consiste en determinar movimientos y deformaciones que se presentarán en el terreno de cimentación.

En un pavimento, el estado límite de falla está definido por el tránsito, ya que éste induce esfuerzos y deformaciones que pueden rebasar la capacidad estructural del pavimento (falla estructural). Cuando el pavimento ya no cumple con las funciones de seguridad, economía y comodidad para las que fue proyectado se dice que ha rebasado el límite de servicio (falla funcional).

III.1 Falla estructural

La falla estructural de un pavimento flexible se manifiesta de dos maneras:

- a) Falla plástica. Este tipo de falla se va revelando por la progresión de deformaciones transversales, permanentes y acumuladas, de naturaleza plástica, al presentarse ahuellamientos o roderas en la superficie de rodamiento, por el paso del tránsito vehicular.

La capacidad estructural en la superficie del pavimento depende de la resistencia a la tensión por flexión de la carpeta, mientras que la capacidad estructural del pavimento en conjunto depende de la resistencia al esfuerzo cortante del conjunto de las capas subyacentes.

- b) Falla por fatiga. Es debida a la aplicación repetitiva de cargas que ocasionan deformaciones elásticas en la estructura del pavimento y que se asocian a esfuerzos de tensión excesivos en la carpeta de rodamiento que finalmente producen grietas reticulares.

La aplicación de cargas sobre una superficie de rodamiento produce deformaciones totales (δ_t) que se componen de deformaciones elásticas (δ_e) y deformaciones plásticas (δ_p). De la misma manera, también se presentan esfuerzos de tensión (σ_r) en la fibra inferior de la carpeta, en el punto de aplicación de la carga. Si la fuerza vertical de compresión es excesiva, resultarán deformaciones permanentes en la estructura de pavimento debido a la sobre carga en la subrasante. Una excesiva deformación de las capas solamente puede ser controlada por las limitaciones de las propiedades de los materiales.

La aplicación sucesiva de las cargas del tránsito sobre el pavimento, va relajando la subestructura, produciéndose deflexiones cada vez de mayor magnitud y llevando al sistema a la falla por fatiga.

La deformación máxima presente en una carretera (agrietamiento ligero o medio) es de una magnitud de 1.2 cm para carreteras de altas especificaciones y de 2.5 cm para carreteras normales (agrietamiento medio o fuerte). Esta deformación es al término de su vida útil (Corro, 1999).

Para pavimentos rígidos la falla estructural se debe principalmente a las cargas. Dicha falla tiene lugar en las esquinas o en las orillas de las losas, al aplicar las cargas de los vehículos a través de los neumáticos, cuando:

- La magnitud de las cargas sea superior a la que se consideró en el proyecto.
- La resistencia a la tensión por flexión del concreto sea inferior a la del proyecto.
- Se genere el fenómeno de fatiga, por la aplicación repetitiva de las cargas.
- El pavimento carezca de pasajuntas, para transferir las cargas de una losa a la contigua.

III.2 Falla funcional

La falla funcional se manifiesta, básicamente, a través de deformaciones longitudinales y transversales que se generan sobre la superficie de rodadura del pavimento debido a las cargas actuantes del tránsito, pero también las grietas, baches, fracturas, deformaciones plásticas, desintegraciones, pulimento superficial y otras anomalías hacen más evidente la falla funcional del pavimento (Sosa, 2010).

Este deterioro gradual de la superficie produce en el usuario una sensación creciente de incomodidad e inseguridad, hasta el grado de opinar cuando la vialidad le resulta ya intransitable. Al mismo tiempo, se incrementan en forma acelerada los costos de operación de los vehículos, incluyendo los tiempos de recorrido.

Las deficiencias superficiales del pavimento manifestadas por la falla funcional están asociadas a un Índice de Servicio, el cual es una medida subjetiva, de la calificación del estado de servicio de la capa de rodadura. La escala de calificaciones que se maneja es de 0 a 5, siendo:

0 – 1	Muy malo
1 – 2	Malo
2 - 3	Regular
3 – 4	Bueno
4 – 5	Muy bueno

En ocasiones una falla funcional que no se atiende a su debido tiempo, puede también conducir a una falla estructural.

En la figura 13 se muestra la relación entre algunos factores que se involucran en la falla de un pavimento flexible.

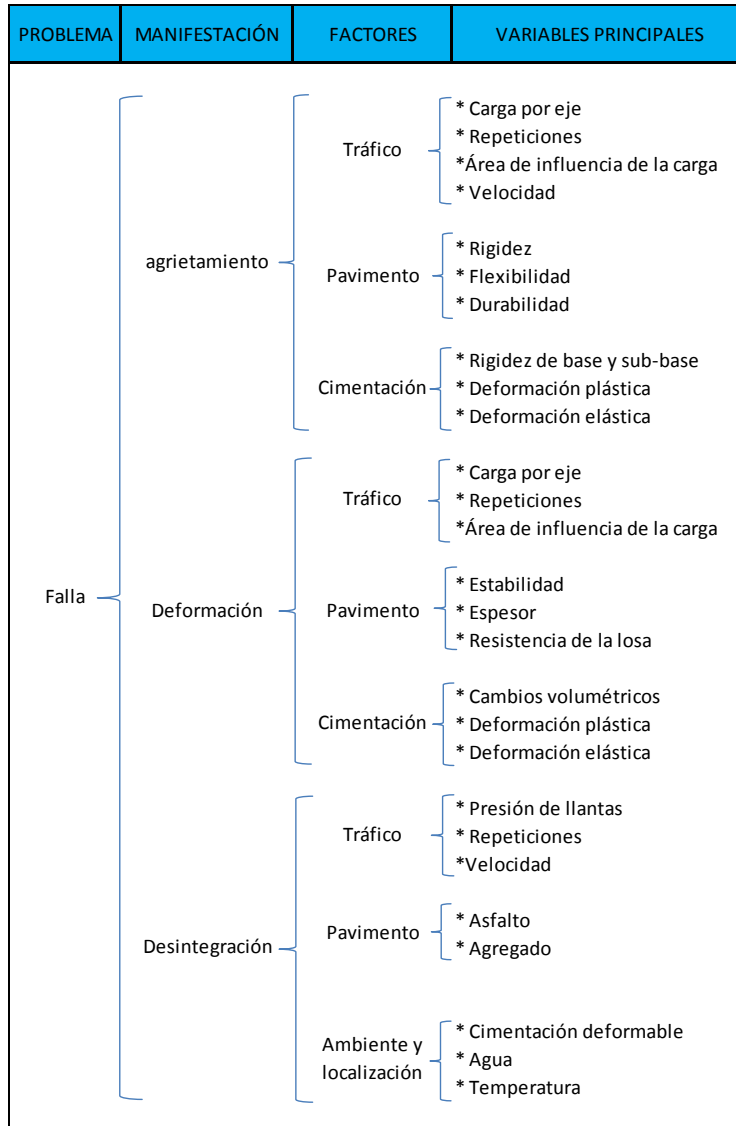


Figura 13. Variables principales que intervienen en la falla de un pavimento flexible (Corro, 1964).

Una teoría usual para predecir la falla en los pavimentos es la Teoría elástica de tres capas, la cual toma en consideración una estructuración de pavimento dividida en tres partes como se observa en la figura 14. A cada capa le corresponde valores particulares de Módulo de elasticidad, Relación de Poisson y espesor finito.

III.3 Teoría elástica de tres capas

Hipótesis:

- El sistema está constituido por tres capas, cada una homogénea, isótropa y de comportamiento elástico (E_1 , E_2 y E_3).
- Las dos primeras capas tienen un espesor finito (h_1 y h_2) mientras que a la tercera se le considera un espesor semi-infinito.
- El vehículo aplica su carga (P) a través de neumáticos deformables en un área circular (A_c), de radio de contacto r_c . Se supone que la presión estática de contacto (P_c) es igual a la presión de inflado (P_i).

La carga aplicada en la superficie del sistema produce, en cada una de las capas, un estado de esfuerzos (σ) y deformaciones (ε) que pueden descomponerse en dos direcciones: una vertical y la otra en un plano horizontal.

Desde el punto de vista analítico para el caso de pavimentos, los cinco esfuerzos que interesa determinar, son los que se muestran en la figura: σ_{z1} , σ_{z2} , σ_{r1} , σ_{r2} y σ_{r3} .

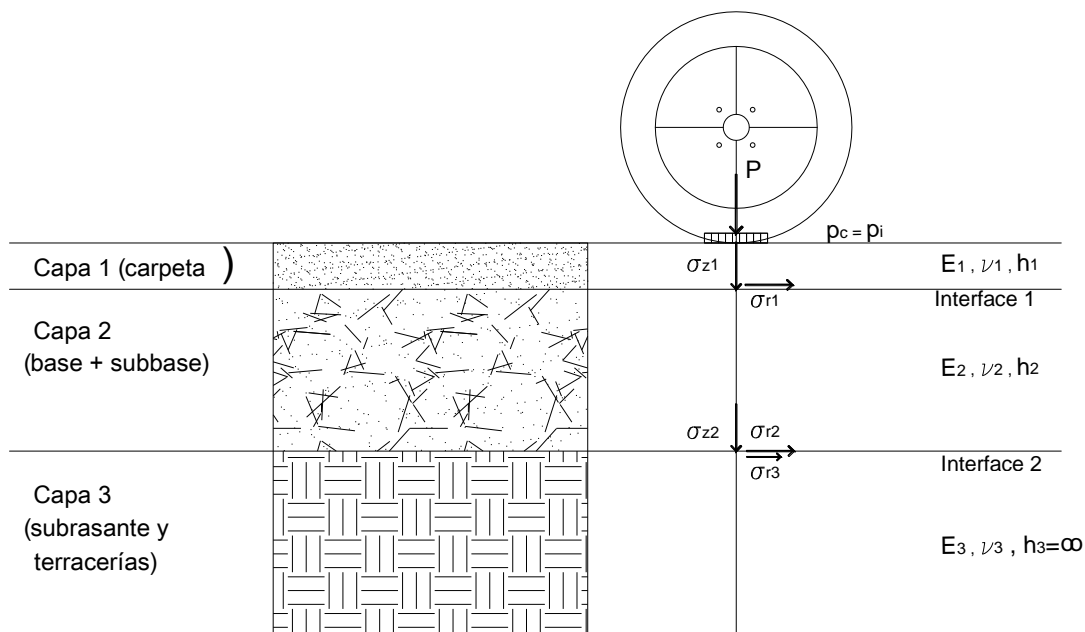


Figura 14. Sistema elástico de tres capas (Yoder, 1975).

donde:

- σ_{z1} = esfuerzo vertical en la interface 1
- σ_{z2} = esfuerzo vertical en la interface 2
- σ_{r1} = esfuerzo horizontal en el fondo de la Capa 1
- σ_{r2} = esfuerzo horizontal en el fondo de la Capa 2
- σ_{r3} = esfuerzo horizontal en la superficie de la Capa 3

Determinados los cinco esfuerzos de interés, finalmente se pueden calcular las deformaciones unitarias que se generan en la fibra inferior de la carpeta (ϵ_{r1}) y en la superficie de la subrasante (ϵ_{z3}), simplemente aplicando las fórmulas dadas por la teoría de la elasticidad siguientes:

$$(\epsilon_{r1}) = [\sigma_{r1} - \sigma_{z1}] / 2E_1 \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$(\epsilon_{z3}) = [\sigma_{z2} - \sigma_{r3}] / E_3 \quad \text{Ec. 3.2}$$

La teoría elástica de tres capas suele referirse a medios homogéneos e isótropos; pero la heterogeneidad de la estructura de los pavimentos, así como su anisotropía, producen así una primera incertidumbre en el planteamiento teórico de su comportamiento.

Cualquier análisis, en este caso elástico, constituye un intento para establecer un conocimiento ordenado de los factores que definen el comportamiento de los suelos y su capacidad de resistir cargas.

En fundamental tratar de apegarse al cumplimiento de las hipótesis de la teoría elástica para así mitigar en el material, la presencia de un comportamiento que sea difícil de interpretar. Del mismo modo, es primordial apegar a esta filosofía el método de diseño que se presenta en esta tesis, esto con la finalidad de obtener resultados que sean analizados con las fórmulas de la teoría de la elasticidad.

III.4 Módulo de resiliencia

Todos los materiales están caracterizados por el Módulo de elasticidad, llamado Módulo dinámico en mezclas asfálticas; Módulo de resiliencia para los materiales granulares sin tratar y los materiales de los suelos. En el caso de suelos estabilizados, las características mecánicas de los materiales cambian sustancialmente con la aplicación de productos estabilizadores, ya que el módulo de resiliencia se incrementa en valores apreciables.

Los materiales que estructuran un pavimento, incluyendo terracerías y terreno de cimentación, se ven sometidos a cargas que le son transmitidas por el tránsito de los equipos; estas cargas son de naturaleza cíclica. Estas cargas provocan en el pavimento una deformación resiliente o elástica y son de recuperación instantánea; suelen denominarse deformaciones plásticas a las que permanecen en el pavimento después de la aplicación de la carga.

Durante la aplicación de una carga cíclica la deformación permanente se va acumulando, este fenómeno se manifiesta con un incremento de deformación durante los primeros ciclos de aplicación de carga, en los ciclos intermedios la

deformación permanente para cada ciclo disminuye y en los ciclos finales prácticamente desaparece. El pavimento llega a un estado donde prácticamente toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de **Módulo de resiliencia**, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable (Garnica, 2002).

Un gran número de estudios se han realizado sobre el Módulo de resiliencia y en los resultados obtenidos se ha observado que este parámetro no es una propiedad constante de los materiales sino que depende de muchos factores como son: parámetros de compactación (peso volumétrico y contenido de agua), método de compactación; número de aplicaciones de carga; magnitud del esfuerzo; tipo y contenido de estabilizador; temperatura; etc.

En la Figura 15 se ilustra el mecanismo donde la deformación permanente se va acumulando durante cada ciclo. En un número n de ciclos de carga, el suelo llega a un estado en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se presenta un comportamiento resiliente (en donde el módulo secante es igual al módulo de resiliencia).

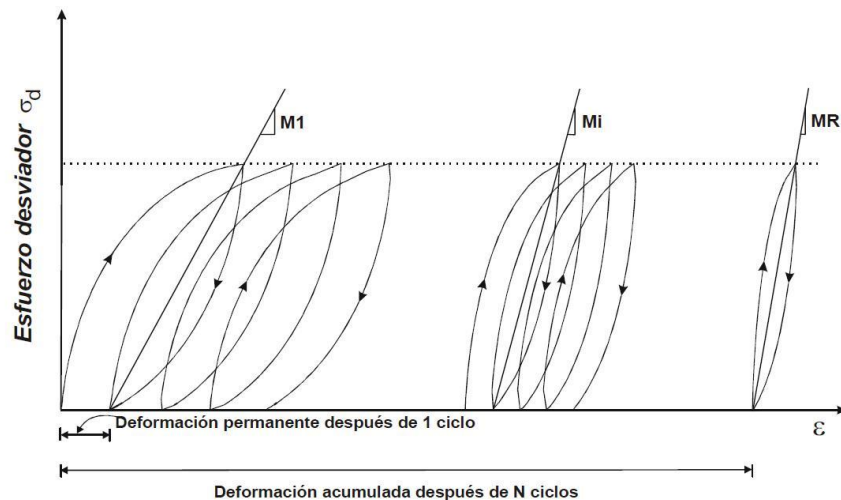


Figura 15. Módulo de resiliencia (Garnica, 2002).

En la figura 16 se muestra la gráfica deformación acumulada versus número de ciclos. La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en materiales con resistencia a la tensión (carpetas asfálticas o capas estabilizadas) colocados en la parte superior de la estructura, en los que se puede llegar a generar una falla de agrietamiento por fatiga si el número de repeticiones es importante y los materiales son susceptibles a este efecto.

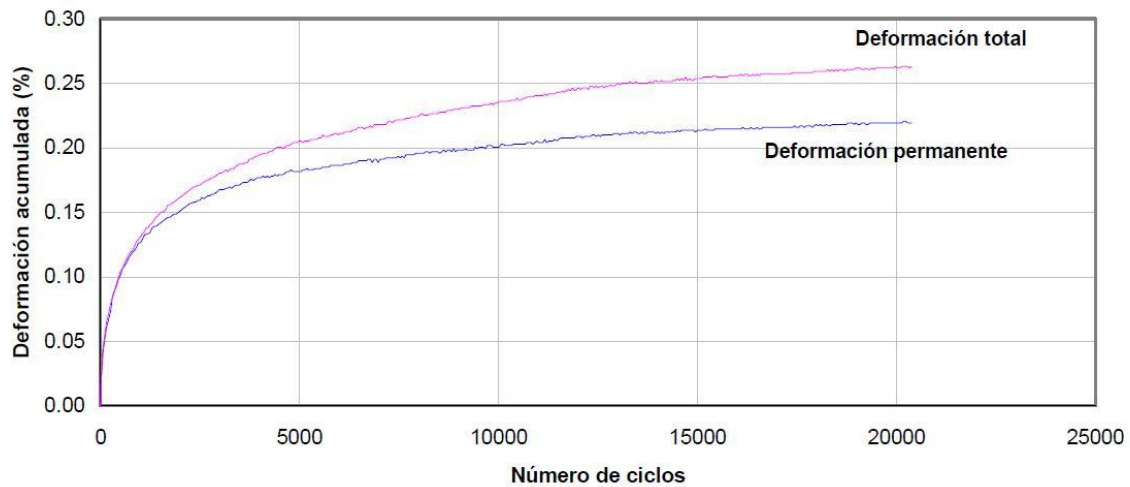


Figura 16. Curva deformación acumulada versus número de ciclos (Garnica, 2002).

III.4.1 Dispositivos experimentales usuales

Existe una gran variedad de dispositivos que son utilizados para la medición del módulo de resiliencia en suelos cohesivos y friccionantes. Entre los dispositivos utilizados con mayor frecuencia se encuentran:

Para suelos cohesivos

- Equipo triaxial cíclico
- Columna resonante
-

Para suelos friccionantes

- Equipo triaxial cíclico
- Máquina servohidráulica universal

Dependiendo de las condiciones de la prueba, no es posible determinar un valor único de módulo de resiliencia para un suelo sino que hay un número finito de valores. Es conveniente asignar, entonces un rango de valores apropiado para cada tipo de suelo.

Tabla 4. Valores del módulo de resiliencia y otras características de materiales para pavimentación (Garnica, 2002).

TIPO DE SUELO AASHTO*	DESCRIPCIÓN	SUCS*	γ _d * (KN/m ³)	VRS* %	VALOR k* (Mpa/m)	MÓDULO RESILIENTE (Mpa)
Suelos de grano fino						
A-4	Limo	ML, OL	14.1 - 16.5	4 - 8	6.79 - 44.79	14.07 - 42.22
	Grava-arena-limo		15.7 - 19.6	5 - 15	10.86 - 59.72	28.14 - 56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6 - 15.7	4 - 8	6.79 - 51.58	14.07 - 42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7 - 19.6	5 - 15	6.79 - 69.22	14.07 - 70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL, OL	14.1 - 19.6	4 - 15	6.79 - 58.36	14.07 - 70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6 - 17.3	3 - 5	10.86 - 59.76	28.14 - 70.37
Suelos de grano grueso						
A-1-a, bien graduado	Grava	GW, GP	19.6 - 22	60 - 80	81.44 - 122.16	70.37 - 140.74
A-1-a, mal graduado			18.9 - 20.4	35 - 60	81.44 - 108.58	70.37 - 140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3 - 20.4	20 - 40	54.29 - 108.58	42.23 - 105.55
A-3	Arena fina	SP	16.5 - 18.9	15 - 25	40.72 - 81.44	35.18 - 14.07
Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje de finos)						
A-2-4, gravosa	Grava limosa	GM	20.4 - 22.8	40 - 80	81.44 - 135.73	70.37 - 211.11
A-2-5, gravosa	Grava arenosa limosa					
A-2-4, arenosa	Arena limosa	SM	18.9 - 21.2	20 - 40	81.44 - 108.58	70.37 - 140.74
A-2-5, arenosa	Arena limosa con grava					
A-2-6 gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9 - 22.0	20 - 40	54.29 - 122.16	56.29 - 140.74
A-2-7 gravosa	Grava arcillosa con arena					
A-2-6 arenosa	Arena arcillosa	SC	16.5 - 20.4	10 - 20	40.72 - 95.00	35.18 - 105.55
A-2-7 arenosa	Arena arcillosa con grava					

* Títulos de columna

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials

SUCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

γ_d Peso Volumétrico Seco

VRS Valor Relativo de Soporte

k Módulo de reacción de la subrasante

La relación de Poisson también está determinada por las características intrínsecas del material, en la siguiente tabla se observa la variación de esta propiedad en relación al tipo de suelo.

Tabla 5. Valores de la relación de Poisson (Yang, 1993).

RELACIÓN DE POISSON PARA DIFERENTES MATERIALES		
MATERIAL	RANGO	TÍPICO
Mezcla de asfalto caliente	0.30 - 0.40	0.35
Concreto con cemento Portland	0.15 - 0.20	0.15
Materiales granulares sin tratar	0.30 - 0.40	0.35
Materiales granulares tratados con cemento	0.10 - 0.20	0.15
Suelos de grano fino tratados con cemento	0.15 - 0.35	0.25
Materiales estabilizados con cal	0.10 - 0.25	0.20
Mezclas de cal - ceniza volante	0.10 - 0.15	0.15
Arena limosa o arena suelta	0.20 - 0.40	0.30
Arena densa	0.30 - 0.45	0.35
Suelos de grano fino tratados con cemento	0.30 - 0.50	0.40
Arcillas blandas saturadas	0.40 - 0.50	0.45

III.4.2 Módulo de rigidez elástica (M_R)

Un estudio extensivo de las propiedades elásticas de las capas estructurales de un pavimento lo ha realizado la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) proporcionando correlaciones entre el módulo de elasticidad ó módulo de rigidez elástica y con algún otro valor característico del material.

Las propiedades de los materiales que son empleadas en las correlaciones se enuncian a continuación:

- CBR (VRS); Valor Relativo de Soporte (valor absoluto)
- f'_c ; resistencia a la compresión simple del concreto (kg/cm^2)
- Emrs; estabilidad Marshall, en mezclas asfálticas (kg)
- M_R ; módulo de rigidez elástica (psi).

La siguiente tabla muestra las correlaciones derivadas de los tramos experimentales de la AASHTO.

Tabla 6. Correlaciones estructurales (M_R). (AASHTO, 1993).

MÓDULOS DE RIGIDEZ ELÁSTICA (M_R)			
ELEMENTO ESTRUCTURAL	M_R (psi)	VALORES LÍMITE	
		MÍN.	MÁX.
<u>Carpetas:</u>			
Concreto asfáltico con polímeros	477.74 (Emrs) - 2916.8	212,100	522,600
Concreto asfáltico	477.74 (Emrs) - 2916.8	212,100	450,000
Mezcla en frío	468.63 (Emrs) + 4028.7	206,900	378,000
<u>Bases:</u>			
Agregados triturados	$-0.9696 (\text{CBR})^2 + 272.39 (\text{CBR}) + 12947$	28,500	31,700
Tratada con cal	15185 (f'c) - 76941	30,500	105,000
Asfáltica, mezcla en frío	468.63 (Emrs) + 4028.7	206,900	378,000
Asfáltica, concreto asfáltico	477.74 (Emrs) - 2916.8	212,100	386,900
Tratada con cemento	7448.4 (f'c) + 403682	560,000	925,000
<u>Subbases hidráulicas</u>	$-1.3125 (\text{CBR})^2 + 244.43 (\text{CBR}) + 8546.7$	18,100	19,800
<u>Subrasantes</u>	$-15.673 (\text{CBR})^2 + 1011.8 (\text{CBR}) + 1059.6$	5,700	15,000

III.5 Factores que afectan la deformación permanente en suelos cohesivos

Los factores principales que determinan la deformación permanente en un suelo cohesivo compactado, sometido a carga repetida, son los siguientes:

- Estado de esfuerzos del suelo.
- Número de aplicaciones del esfuerzo desviador.
- Estado físico del suelo.
- Tipo de suelo.

Estado de esfuerzos del suelo

Monismith et al (1975) y Brown et al (1977) (en Garnica 2002), mostraron que el esfuerzo desviador ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) es el principal factor que tiene influencia en la deformación plástica acumulada para suelos finos bajo carga repetida. Como consecuencia, un incremento en el esfuerzo desviador conducirá a un incremento en la deformación plástica.

Número de aplicaciones del esfuerzo desviador

La acumulación de la deformación permanente debida a carga repetitiva, presenta tres etapas en su evolución (Figura 15): la primera se presenta en los primeros

ciclos de carga. La segunda fase es transitoria, en la que la deformación se acumula gradualmente durante los ciclos de aplicación de la carga; y finalmente, se tiende a un estado estable en el que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña; a partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene mucho efecto en la acumulación de la deformación.

Estado físico del suelo

Este factor está constituido por el contenido de agua y peso específico seco y tiene un efecto significativo en la deformación plástica acumulada en los suelos.

Garnica et al (2002) realizaron una serie de ensayos sobre suelos cohesivos bajo diferentes condiciones de compactación en la deformación permanente. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de deformación plástica en suelo con diferentes condiciones. (Garnica, 2002).

Prueba	w (%)	γ_d (kN/m ³)	ϵ_p (%)
A	18.40	12.96	0.07
B	35.37	12.95	0.54
C	20.23	14.49	0.09
D	20.10	12.31	0.11
E	19.73	13.60	0.07
F	25.30	12.97	0.18
G	28.64	13.66	0.22
H	30.15	13.01	0.29

Tipo de suelo

Depende de la estructura del suelo y del método de compactación que se utilice, así como de la energía de compactación que se le aplique.

III.6 Factores que afectan la deformación permanente en suelos granulares

El comportamiento plástico de los materiales granulares, está en función de los siguientes parámetros:

- Nivel de esfuerzos.
- Rotación del esfuerzo principal.
- Número de aplicaciones de carga.
- Contenido de humedad.
- Historial de esfuerzos.
- Densidad.
- Granulometría y tipo de agregado

Nivel de esfuerzos

El nivel de esfuerzos es uno de los factores más importantes que afectan el desarrollo de la deformación permanente en materiales granulares. Diversos investigadores han reportado que la deformación permanente en materiales granulares está gobernada principalmente por algunas formas de relaciones de esfuerzos desviadores y de confinamiento.

Rotación del esfuerzo principal

El efecto de la reorientación del esfuerzo principal en el comportamiento de la deformación permanente no está todavía plenamente comprendido. Esto probablemente se debe al hecho de que la prueba triaxial de carga repetida, el medio más común de reproducir las condiciones del tránsito en un laboratorio, falla al proveer el cambio continuo en la dirección de los esfuerzos principales. Sin embargo, pruebas en cajas cortantes simples han mostrado un incremento significativo en la deformación permanente debido a la rotación del esfuerzo principal.

Número de aplicaciones de carga

El crecimiento de la deformación permanente en materiales granulares bajo carga repetida es un proceso gradual durante el cual cada aplicación de carga contribuye a la acumulación de deformación mediante un pequeño incremento. La estabilización de la deformación permanente se logra sólo cuando los esfuerzos aplicados son bajos. Por otra parte, altos valores de esfuerzos, podrían resultar en incrementos continuos de deformación permanente y deterioro gradual.

Contenido de agua

El efecto del contenido de agua en capas granulares de pavimento proporciona un aumento en la presión de poro, esfuerzo efectivo bajo y, consecuentemente, baja rigidez y baja resistencia a la deformación.

Historial de esfuerzos

Las deformaciones permanentes resultantes de un incremento sucesivo en el nivel de esfuerzos son considerablemente más pequeñas que la deformación que ocurre cuando el esfuerzo más alto es aplicado inmediatamente.

Densidad

El efecto de la densidad, descrita por el grado de compactación, se considera significativamente importante para comportamientos a largo plazo de materiales granulares. La resistencia a la deformación permanente en estos materiales bajo carga repetida parece estar altamente mejorada como un resultado de la densidad incrementada.

Granulometría y tipo de agregado

El efecto de la granulometría en la deformación permanente es más significativo que el grado de compactación, con la mayor resistencia a la deformación plástica para las mezclas más densas. El efecto del contenido de finos se manifiesta en que la resistencia a la deformación permanente en materiales granulares es

reducida mientras la cantidad de finos se incrementa; y para materiales angulares, tales como roca triturada, éstos experimentan deformaciones permanentes menores comparadas a materiales como grava con partículas redondeadas.

III.7 Factores que afectan la deformación en suelos estabilizados

El suelo estabilizado comúnmente se realiza a través de procedimientos químicos. La adición de un producto como cal, asfalto o cemento tiende a mejorar las características mecánicas del suelo, sin embargo; estos suelos estabilizados también presentan fatiga cuando son sometidos a cargas cíclicas repetidas. Los principales factores que afectan la fatiga en suelos estabilizados son:

- Tránsito
- Parámetros de compactación: peso volumétrico seco, contenido de agua y grado de saturación
- Tipo y contenido del estabilizador
- Tipo de suelo
- Aditivos

El módulo de resiliencia de los suelos estabilizados también depende de varios factores, pero los análisis estadísticos han determinado la siguiente correlación entre el módulo de resiliencia y la resistencia a la compresión no confinada (UCS, por sus siglas en inglés, unidades en MN/m²) (Garnica, 2002):

$$M_R = 102 * 233 * UCS \quad \text{Ec. 3.3}$$

III.8 Factores que afectan las deformaciones en el concreto asfáltico

El asfalto es un material que puede ser considerado elástico – lineal a temperaturas bajas y frecuencias de carga altas, pero muestra propiedades viscosas y plásticas a temperaturas mayores. Debido a este comportamiento, las cargas repetidas del tránsito generan deformaciones permanentes en las capas asfálticas, especialmente durante el periodo de verano.

Los principales factores que afectan las deformaciones permanentes en el concreto asfáltico son:

- Nivel de esfuerzos
- Número de repeticiones de carga
- Tipo de asfalto
- Contenido de asfalto
- Tipo y contenido de modificadores
- Contenido de vacíos en la mezcla
- Contenido de vacíos en el agregado mineral

- Método de compactación
- Tipo de agregado
- Forma, textura y tamaño de las partículas
- Temperatura
- Agua

La rigidez de las mezclas asfálticas es esencial para el análisis de la respuesta del pavimento a la carga vehicular. Los ensayos que se utilizan para conocer la rigidez o el módulo de resiliencia son:

- Prueba de rigidez axial resiliente
- Prueba de rigidez diametral resiliente
- Prueba de rigidez dinámica a flexión
- Prueba de rigidez dinámica cortante

Los tipos de pruebas anteriores han demostrado ser sensibles a la modificación de la mezcla y sus variables de prueba tales como: tipo de asfalto, tipo de agregados, contenido de vacíos de la mezcla y temperatura, entre otros.

III.9 Factores que afectan la fatiga del concreto hidráulico

El fracturamiento por fatiga suele ser considerado como el mayor o único criterio para el diseño de pavimentos de concreto, recientemente sólo se han considerado bombeo y erosión, otro criterio para tomarse en consideración incluye la sustentación y deterioro en las juntas del pavimento de concreto y las juntas reforzadas.

El fracturamiento por fatiga es causado probablemente por los esfuerzos que se inducen en el borde y en la mitad de la losa. El número permisible de repeticiones de carga para causar el fracturamiento por fatiga depende de la relación de esfuerzos entre el esfuerzo a la tensión y el módulo de ruptura del concreto.

Aunque la deformación permanente no es considerada en el diseño de pavimentos de concreto, la deformación resiliente bajo cargas por rueda repetida induce al bombeo en las losas de concreto.

El dispositivo experimental usual para caracterizar la fatiga en el concreto hidráulico es la prueba de resistencia a la ruptura por flexión. El módulo de ruptura (MR) tiene un caro efecto sobre el potencial de agrietamiento por fatiga de las losas de concreto para cualquier magnitud dada de esfuerzo repetido a la flexión.

Los principales factores que afectan la fatiga en el concreto hidráulico son:

- Número de aplicaciones de carga
- Resistencia y módulo de ruptura
- Espesor de la losa de concreto

- Espaciamiento entre juntas transversales
- Apoyo en el borde de las losas
- Apoyo de la subrasante
- Aditivos
- Tiempo de curado y edad del concreto

Para determinar el módulo de elasticidad del concreto hidráulico se puede emplear la relación existente con la resistencia a la compresión. Para el concreto de densidad normal, el ACI-318 (2005) presenta la siguiente expresión:

$$E_c = 4,700 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 3.4}$$

donde:

E_c = Módulo de elasticidad (MPa)

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto (MPa), determinada en cilindros de ensaye

Cuando la densidad del concreto difiere de 2.3 ton/m³ (para el concreto de peso normal), el módulo de elasticidad esta dado por:

$$E_c = W_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 3.5}$$

donde:

E_c = Módulo de elasticidad (MPa)

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto (MPa), determinada en cilindros de ensaye

W_c = Densidad comprendida entre 1500 y 2500 kg/m³

III.10 Esfuerzos en pavimentos por efecto de las cargas

En el apartado II.1 de capítulo anterior se comentan las teorías aplicables para determinar la distribución de esfuerzos sobre el suelo. Para el caso de pavimentos, la carga actuante sobre el pavimento es aquella debida a la presión de contacto (P_c) del neumático y se encuentra distribuida en un área circular de radio r_c (Yoder, 1975)

$$r_c = \sqrt{\frac{P}{p\pi}} \quad \text{Ec. 3.6}$$

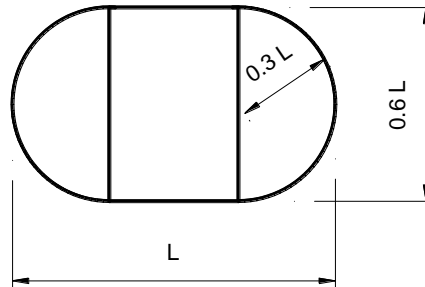
donde:

r_c = radio de contacto

P = carga total sobre la rueda

p = presión de inflado

La forma circular del contacto entre neumático y pavimento se acepta en la mayoría de los problemas, esta suposición no es correcta, pero el error en que incurre no es significativo. Otra forma de contacto es la que se muestra a continuación:



$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}}$$

Ec. 3.7

Figura 17. Geometría de contacto entre neumático y pavimento.

donde:

Ac = área de contacto

$$Ac = \frac{P}{P_c}$$

P = carga total sobre la rueda

P_c = presión de contacto

La geometría de la carga es un parámetro indispensable para determinar la disipación de esfuerzos en un suelo. Dicha disipación se puede obtener con el método de elemento finito además de conocer igualmente la deformación que genera dicha aplicación de carga.

III.10.1 Factor de Equivalencia de carga

El factor de equivalencia de carga (FEC) define el daño por pasada que se le causa a un pavimento debido a un vehículo de análisis en relación con el daño por pasada que causa un vehículo estándar arbitrariamente seleccionado.

En el entendido de que cada estructura de pavimento acepta un cierto número de pasadas N_f antes de que se presente la falla, cada pasada de un vehículo sobre una estructura de pavimento provoca un daño definido como sigue:

$$d_j = \frac{1}{N_f}$$

Ec. 3.8

donde:

d_j = daño causado al pavimento por pasada

N_f = número total de pasadas

Entonces el FEC referido a un vehículo estándar queda definido de la siguiente manera:

$$FEC_j = \frac{d_j}{d_s} = \frac{N_{fs}}{N_{fj}} \quad \text{Ec. 3.9}$$

donde:

d_s = daño causado al pavimento por un vehículo estándar
 N_{fs} = número total de pasadas de vehículos estándar

De la ecuación anterior se observa que el FEC está en función del número de repeticiones para obtener la falla. Deacon y Witcsak (en Yoder, 1975) han investigado el valor de FEC empleando el criterio de esfuerzos de tensión presentes en la parte inferior de la capa de asfalto. Los resultados que obtuvieron se resumen en la siguiente fórmula.

$$FEC_j = \left(\frac{\epsilon_j}{\epsilon_s} \right)^c \quad \text{Ec. 3.10}$$

donde:

ϵ_j = esfuerzo de tensión máxima debido a la pasada de un vehículo
 ϵ_s = esfuerzo de tensión máxima causado por el vehículo estándar
 c = constante de regresión

Las pruebas de laboratorio y de campo indican que el valor de c está entre el rango de 3 y 6 siendo un valor común 4 ó 5.

Para pavimento rígido, se asume que el concreto puede resistir repeticiones ilimitadas de carga siempre y cuando la relación entre el esfuerzo aplicado y el módulo de ruptura del concreto sea menor del 0.5.

$$r_0 = \frac{\sigma_{to}}{\sigma'_r} \quad \text{Ec. 3.11}$$

donde:

r_0 = relación de esfuerzos
 σ_{to} = esfuerzo de tensión en la fibra inferior, con carga al centro de la losa
 σ'_r = módulo de ruptura del concreto

$$\sigma'_r = 8\sqrt{f'_c} \text{ a } 10\sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde:

σ'_r = módulo de ruptura (psi)
 f'_c = resistencia a la compresión del concreto (psi)

Usando conceptos similares a los que se emplearon en el análisis por fatiga del concreto asfáltico, el FEC para pavimento rígido puede ser evaluado de la siguiente manera:

$$FEC. = \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_s}\right)^4 \quad \text{Ec. 3.13}$$

donde

σ_j es el esfuerzo debido a la pasada de un vehículo

σ_s es el esfuerzo causado por el vehículo estándar.

Usualmente el vehículo estándar que se emplea para el análisis de tránsito es aquel que tiene un eje de carga de 18 kips, es decir, 18,000 libras (8.2 ton).

Capítulo IV. Método de diseño

En los capítulos anteriores se dieron a conocer las variables involucradas en el diseño de un pavimento con fines de servicio portuario. A continuación se muestra la metodología de diseño para determinar una estructura de pavimento que presente un desempeño óptimo ante tales variables de diseño.

A modo de resumen se enumeran las variables a considerar:

- Propiedades elásticas del suelo de cimentación
- Propiedades elásticas de la estructura del pavimento
- Equipo
 - Grúas RTG
 - Cargador Reach Stacker
 - Camiones articulados “Planas”
 - Estibas de Contenedores
- Vida de diseño
- Análisis de tránsito

IV.1 Variables de diseño

IV.1.1 Propiedades elásticas del suelo de cimentación

Con base en el perfil estratigráfico del suelo se determinan los estratos de suelo que sirven como terreno de cimentación. Si el terreno no es el óptimo para desplantar la estructura del pavimento éste se deberá tratar con algún método de mejoramiento ya sea físico o químico.

Para fines de cálculo se tomará el siguiente perfil estratigráfico, así mismo se tomará dicho perfil estratigráfico como el representativo del suelo en cuestión.

De la Tabla 4 y 5 se obtienen las siguientes propiedades elásticas según el suelo presente.

Módulo de resiliencia	
Limo arenoso con arcillas	14.07 - 42.22 MPa (143.5 – 430.5 kg/cm ²)
Arcilla limo arenosa	14.07 - 70.37 MPa (143.5 – 717.5 kg/cm ²)
Limo arcillo arenoso	14.07 - 42.22 MPa (143.5 – 430.5 kg/cm ²)
Limo arcilloso con arena	14.07 - 42.22 MPa (143.5 – 430.5 kg/cm ²)
Relación de Poisson	0.35



LINCON DEL PACIFICO S.A. DE C.V.

AV. PRIMAVERAS, MANZANA 56, LOTE 3, BARRIO 2.
 VALLE DE LAS GARZAS, C.P. 28219, MANZANILLO, COLIMA.
 TEL/FAX: 01-(314)-33-6-93-82 / 33-6-68-68; CEL: 01-(314)-11-6-29-29, NEXTEL 72*15*33635.
 lincons@prodigy.net.mx y linconpac@hotmail.com

PRUEBA DE PENETRACION NORMAL ESTANDAR (SPT).

OBRA :	PROYECTO TALLER DEL CEM		SONDEO No :	4
UBICACION:	Carretera a Minatitlán , Lote No. 2, Manzana No. 1.		MUSTREADOR TIPO :	Media Caña
Zona Industrial de Tapeixtlas, Municipio de Manzanillo, Colima.				
SOLICITADA POR:	Ing. Andrés Ruiz Cabrera		FECHA DE ESTUDIO:	14 de Abril del 2011.
SSA MEXICO, S.A. DE C.V.				
PROFUNDIDAD DEL SONDEO :	3 mts.	PROF. DEL N.F. (mts)	Indefinido	UBICACIÓN DEL SONDEO
Ubicados en Plano: Lamina 1				

PROFUNDIDAD DEL SONDEO (M)	PENETRACION ESTANDAR (SPT) NUMERO DE GOLPES EN 30 (cms.)	ESTRATIGRAFIA	DESCRIPCION DEL MATERIAL RECABADO	CLASIF. S.U.C.S.	CAP. CARGA (Ton / m2)	GRANULOMETRIA (% PASA LA MALLA No 200)	% DE HUMEDAD	ANGULO DE FRICCION INTERNA (°)	COHESION (Kg/Cm ²)	COMPACTIDAD RELATIVA (%)
0.15	14		LIMO ARENOSO CON ARCILLAS (47-30-23)	ML	19.4	23	4.8	*****	1.01	Compacta
0.30										
0.45										
0.60										
0.75										
0.90										
1.00	6		ARCILLA LIMO ARENOSA (53-28-19)	CL	7.8	53	13.2	*****	0.38	Media
1.15										
1.30										
1.45										
1.60										
1.75										
1.90	13		LIMO ARCILLO ARENOSO (37-33-30)	ML	18.7	37	11	*****	0.93	Compacta
2.00										
2.15										
2.30										
2.45										
2.60										
2.75	16		LIMO ARCILLOSO CON ARENAS (47-40-13)	ML	21.8	41	12.3	*****	1.07	Muy Compacta
2.90										
3.00										
3.15										
3.30										
3.45										

Figura 18. Perfil estratigráfico (esquemático).
 Fuente: MB Desarrollos Integrales, S.C.

IV.1.2 Propiedades elásticas de la estructura del pavimento

La estructura del pavimento se compone básicamente de las siguientes capas de material:

- Subbase
- Base, y
- Capa de rodamiento

Las bases tratadas con cemento son en la actualidad muy empleadas ya que proporcionan una capa más rígida y de menor espesor en comparación con una base hidráulica.

Las propiedades elásticas de estas capas de pavimento se obtienen a través de la prueba triaxial cíclica. A través de ésta prueba se conoce el módulo de resiliencia del suelo que forma parte de la estructura del pavimento. Para fines de cálculo se propone el valor del módulo de resiliencia de cada una de las capas del pavimento con apoyo en la Tabla 6:

- Subrasante (M_R = 15, 000 psi (1,054.60 kg/cm²), $\nu = 0.35$)
- Subbase (M_R = 19,800 psi (1,392.08 kg/cm²), $\nu = 0.35$)
- Base
 - Base hidráulica (M_R = 31,700 psi (2,228.73 kg/cm²), $\nu = 0.35$)
 - Base tratada con cemento (M_R = 925,070 psi (65,033.94 kg/cm²), $\nu = 0.15$)
- Capa de rodamiento
 - Asfalto (M_R = 350,000 psi (31,638.13 kg/cm²), $\nu = 0.35$)
 - Concreto (E_c = 3,993,680 psi (280,783.5 kg/cm²), $\nu = 0.15$)
 - Adoquín (E_c = 5,228,959 psi (367,632.2 kg/cm²), $\nu = 0.15$)

El módulo de elasticidad de una base tratada con cemento $f'c = 70 \text{ kg/cm}^2$ se obtiene con ayuda de la ecuación presente en la Tabla 6,

$$E_c = 7448.4 (f'c) + 403682$$

$$E_c = 7,448.4 (70) + 403,682$$

$$E_c = 925,070 \text{ psi}$$

El módulo de elasticidad del concreto ($f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$) se obtiene empleando la ecuación 3.4,

$$E_c = 4,700 \sqrt{34.32}$$

$$E_c = 27,535.45 \text{ MPa}$$

$$E_c = 3,993,680 \text{ psi}$$

Para adoquines se emplea un $f'c = 500 \text{ kg/cm}^2$ ya que se necesita garantizar una buena resistencia a la abrasión de dichos elementos.

IV.1.3 Equipo

Se deberá analizar los diferentes panoramas dependiendo del tipo de equipo. Cada equipo tiene especificaciones particulares que afectan directamente las cargas que transmiten hacia la estructura del pavimento. Para fines de diseño se deberá seleccionar aquel equipo que proporcione la condición más desfavorable.

IV.1.3.1 Grúa RTG

La grúa RTG tiene el siguiente las siguientes características:

- Las dimensiones de la rueda se define como 18.00–25 la cual se interpreta como 1,635 mm de diámetro con un ancho de sección de 498 mm.
- La presión de inflado es de 1000 kPa (10.19 kg/cm²)
- La distancia entre ejes es 2500/3900/2500 mm

Según el diagrama de cargas se tiene lo siguiente:

- Carga Máxima en Rueda de 310 kN (31.61 t) (Rueda cargada)
- Carga Máxima en Rueda de 220 kN (21.41 t) (Rueda descargada)

Empleando la ecuación 3.7 se obtiene la geometría de carga.

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}}$$

$$Ac = \frac{P}{Pc} = \frac{31,610 \text{ kg}}{10.19 \text{ kg/cm}^2}$$

$$Ac = 3,102.06 \text{ cm}^2$$

$$L = \sqrt{\frac{3,102.06}{0.5227}}$$

L = 77.03 cm (Rueda cargada), y

L = 63.40 cm (Rueda descargada)

IV.1.3.2 Cargador Reach Stacker

Este cargador tiene la desventaja de manipular un contenedor lleno y descargar el peso hacia el pavimento por solo dos ejes sencillos. Según el diagrama de cargas el eje delantero, en condiciones críticas, transmite al pavimento una carga de 99.3 ton sobre cuatro llantas (eje dual). El tipo de llanta que emplea este cargador es el mismo que el de una grúa RTG solo que la presión de inflado es de 900 kPa. El eje trasero transmite una carga de 13.5 ton sobre un eje sencillo.

En condiciones de operación descargados la transmisión de carga al pavimento es de 37.6 ton en el eje delantero y 34.5 en el eje trasero.

Con base en la figura 16 y en la ecuación 3.7 se puede obtener la geometría de la carga que actúa sobre el pavimento.

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}}$$

$$Ac = \frac{P}{Pc} = \frac{24,825 \text{ kg}}{9.17 \text{ kg/cm}^2}$$

$$Ac = 2,707.19 \text{ cm}^2$$

$$L = \sqrt{\frac{2,707.19}{0.5227}}$$

$$L = 71.96 \text{ cm}$$

El ancho de la geometría de contacto es $0.6L$, entonces:

$$0.6L = 43.17 \text{ cm (eje delantero cargado)}$$

Para la geometría de contacto de los demás ejes se hace un cálculo similar teniendo los siguientes resultados:

$$\text{Ancho de geometría} = 22.59 \text{ cm (eje trasero cargado)}$$

$$\text{Ancho de geometría} = 26.57 \text{ cm (eje delantero descargado)}$$

$$\text{Ancho de geometría} = 35.99 \text{ cm (eje trasero descargado)}$$

El ancho geométrico de la rueda es de 49.8 cm y el ancho de la geometría de contacto es de 43.17 cm para el eje delantero cargado; esto se debe a la curvatura que presenta la llanta en condiciones de inflado. Además, el eje delantero del Reach Stacker está constituido por cuatro llantas las cuales se distribuyen en dos por lado con una separación de 15.6 cm entre ellas.

IV.1.3.3 Camiones “Planas”

Los camiones articulados tienen las siguientes cargas por eje:

- Primer eje sencillo 7.9 t
- Segundo eje sencillo 20 t
- Eje tándem 37 t

En condiciones de camión descargado la configuración es la siguiente:

- Primer eje sencillo 0.66 t
- Segundo eje sencillo 2.64 t
- Eje tándem 2.64 t

Los camiones que operan dentro de una terminal son del tipo T2-S2 y T2-S3 en su gran mayoría; sin embargo, cuando existe manejo de mercancía para exportación se presentan camiones de doble remolque del tipo T3-S2-R4.

La llanta es del tipo 275/80 R22.5, con un ancho de sección de 28.2 cm y una presión de inflado de 90 psi para ejes duales y 100 psi para ejes sencillos.

El eje sencillo del camión está constituido por cuatro llantas las cuales se distribuyen en dos por lado (eje dual) con una separación de 36.0 cm entre ejes de llantas.

Empleando la ecuación 3.7 se tiene una geometría de contacto en el segundo eje sencillo (eje dual) como sigue:

$$L = \sqrt{\frac{Ac}{0.5227}}$$

$$Ac = \frac{P}{P_c} = \frac{5,000 \text{ kg}}{6.32 \text{ kg/cm}^2}$$

$$Ac = 791.13 \text{ cm}^2$$

$$L = \sqrt{\frac{791.13}{0.5227}}$$

$$L = 38.90 \text{ cm (eje sencillo dual)}$$

$$0.6L = 23.34 \text{ cm}$$

Aplicando la ecuación 3.7 se obtiene una geometría de contacto como sigue para los demás ejes:

$$L = 32.78 \text{ cm (eje sencillo)}$$

$$0.6L = 19.67 \text{ cm}$$

$$L = 37.41 \text{ cm (eje tándem)}$$

$$0.6L = 22.45 \text{ cm}$$

Para camión descargado:

$$L = 28.26 \text{ cm (eje sencillo dual)}$$

$$0.6L = 16.96 \text{ cm}$$

$$L = 13.40 \text{ cm (eje sencillo)}$$

$$0.6L = 8.04 \text{ cm}$$

$$L = 28.26 \text{ cm (eje tándem)}$$

$$0.6L = 16.96 \text{ cm}$$

IV.1.3.4 Estibas de contenedores

La estiba de contenedores tiene gran importancia debido a la concentración de cargas en un área pequeña como lo es la zapata de desplante de los contenedores. Esta área está localizada en la parte baja del contenedor y tiene una sección de 15.2 x 17.8 cm (6 in x 7 in) por cada esquina y frecuentemente sobresalen 1.27 cm (0.5 in) por debajo de la parte baja del contenedor.

El peso de un contenedor lleno en promedio es de 30,480 kg con una tara de 2,350 kg, sumando un total de 32,830 kg. Usualmente se estiban los contenedores en una columna de 6 piezas, proporcionando una bajada de cargas de 196,980 kg

(196.98 ton) por estiba y una carga de 49,245 kg en cada esquina del contenedor que está en contacto con la estructura del pavimento.

La presión de contacto entre la estiba de contenedores y la estructura del pavimento será de 182.01 kg/cm².

IV.1.4 Vida de diseño

Comúnmente se proyecta una vida de diseño de 20 a 25 años que coincide con el periodo de la cesión parcial de derechos que otorga La Administración Portuaria Integral a las operadoras portuarias interesadas en la construcción de una terminal.

IV.1.5 Análisis de tránsito

El análisis de tránsito se efectuará para los tres equipos antes mencionados.

IV.1.5.1 Grúa RTG

Este equipo tiene un tiempo de operación casi en su totalidad sobre unas roderas en las cuales se desplaza para apilar contenedores, el tiempo restante se emplea en mantenimiento. De esta manera el tránsito de la grúa sobre las roderas está definido por la maniobra de mercancía que se realice en el bloque destinado al almacenamiento de contenedores. Según el operador portuario, en promedio una Grúa RTG realiza un número de pasadas de 200,000 sobre un mismo punto en un periodo de 20 años.

IV.1.5.2 Cargador Reach Stacker

Este equipo tiene la facilidad de movilizarse por toda el área de almacenamiento de contenedores. Según el operador portuario, el número de pasadas que realiza en un mismo punto durante un año es de 10,000 en condiciones de equipo cargado.

IV.1.5.3 Camiones “Planas”

Los camiones tienen la tarea de trasladar la mercancía de la zona del muelle al área de almacenamiento, tiene recorridos muy cortos pero de gran frecuencia, según información del operador portuario, en un punto específico del pavimento existe un número estimado de 400 pasadas por día.

IV.2 Análisis de la estructura del pavimento con elemento finito

Con las variables de diseño es posible alimentar el programa de elemento finito y obtener los esfuerzos y deformaciones que se inducen al pavimento mientras transita el equipo portuario.

Con los resultados del programa se determinará el daño que sufre la estructura del pavimento debido al tránsito del equipo y también el número de pasadas que admite el pavimento antes de presentar la falla.

El criterio de falla por deformación permanente se expresa como

$$N_d = f_4(\varepsilon_c)^{-f_5} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde N_d es el número de repeticiones de carga admisible al límite de la deformación permanente, ε_c es la deformación unitaria en la superficie de la capa subrasante y f_4 y f_5 son constantes determinadas en pruebas de laboratorio o campo. Según la Compañía Shell los valores sugeridos de f_4 y f_5 son 6.15×10^{-7} y 4.0 respectivamente.

Para determinar la deformación unitaria en la superficie de la capa subrasante, ε_c , se emplean la siguiente fórmula basada en la Teoría Elástica de Tres Capas:

$$(\varepsilon_{z3}) = [\sigma_{z2} - \sigma_{r3}] / E_3 \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde ε_{z3} es la deformación unitaria en la superficie de la subrasante y corresponde a ε_c de la ecuación 4.1 propuesta por la Compañía Shell y el Instituto del Asfalto, E_3 es el módulo de elasticidad de la capa subrasante, σ_{z2} y σ_{r3} son esfuerzos axiales y radiales respectivamente.

A continuación se presenta la metodología a seguir para determinar los esfuerzos inducidos en la estructura del pavimento empleando el programa de elemento finito.

- 1.- Se propone un terreno de cimentación y una estructura de pavimento con propiedades elásticas (módulo de elasticidad, módulo de resiliencia y relación de Poisson) y pesos volumétricos del material. Se emplea un modelo elástico durante el análisis.
- 2.- Se dibujan las cargas actuantes según el equipo portuario que se desee analizar (eje de carga).
- 3.- Se declaran las condiciones iniciales del suelo, nivel freático y estado de esfuerzos.

- 4.- Se procede a correr el programa dando de alta las cargas actuantes y la malla de análisis.
- 5.- Con los resultados que arroja el programa se extraen los datos de distribución de esfuerzos σ_{xx}' (esfuerzo radial) y σ_{yy}' (esfuerzo axial).
- 6.- Empleando fórmulas de teoría elástica de capas se determinan las deformaciones unitarias tanto en la fibra inferior de la capa de rodamiento como en la parte superior de la capa subrasante.
- 7.- Empleando criterios de falla se determina el potencial a presentar falla por fatiga o falla por deformación permanente.
- 8.- Se repiten los pasos anteriores pero con una modificación en el espesor de la capa de rodamiento. La variación usual del espesor es de 0.5, 0.4, 0.3 y 0.2 m para estructuras de pavimento con capa de rodamiento a base de concreto y para estructuras de pavimento con adoquín la variación usual del espesor de la base es desde 1.2 hasta 0.6 m. Para cada espesor de la capa de rodamiento se realizan los pasos anteriores.
- 9.- Se realizan los mismos pasos anteriores pero ahora con otra configuración de carga (otro eje de carga del equipo en análisis). Se analiza el equipo en condición de carga y descarga.
- 10.- En una hoja de Excel se realiza el análisis de tránsito en base a los datos obtenidos determinando el número de pasadas permisible en el pavimento en términos de un solo eje de carga.
- 11.- Se gráfica espesor de capa de rodamiento versus número de pasadas.
- 12.- Se determina el espesor de diseño.

A continuación se muestra la metodología antes descrita aplicada al programa de análisis.

Equipo en análisis: Cargador Reach Stacker
 Eje de análisis: Eje delantero cargado.
 Estructura de pavimentación: Concreto

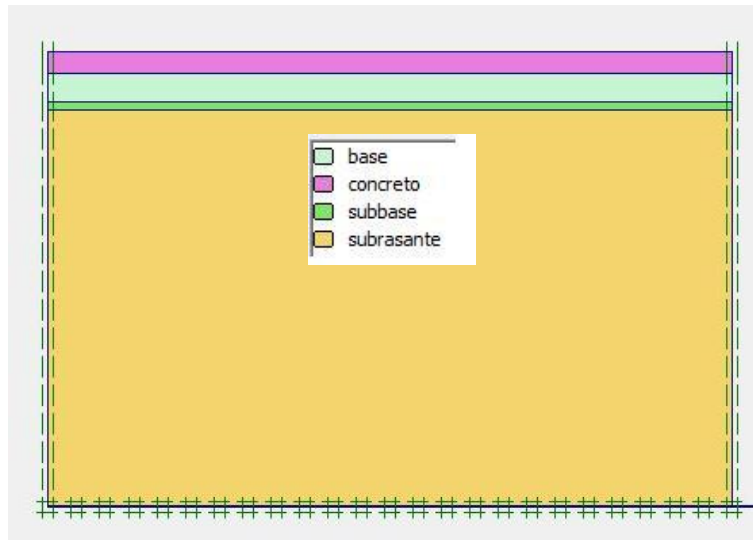


Figura 19. Estructura de pavimento propuesta.

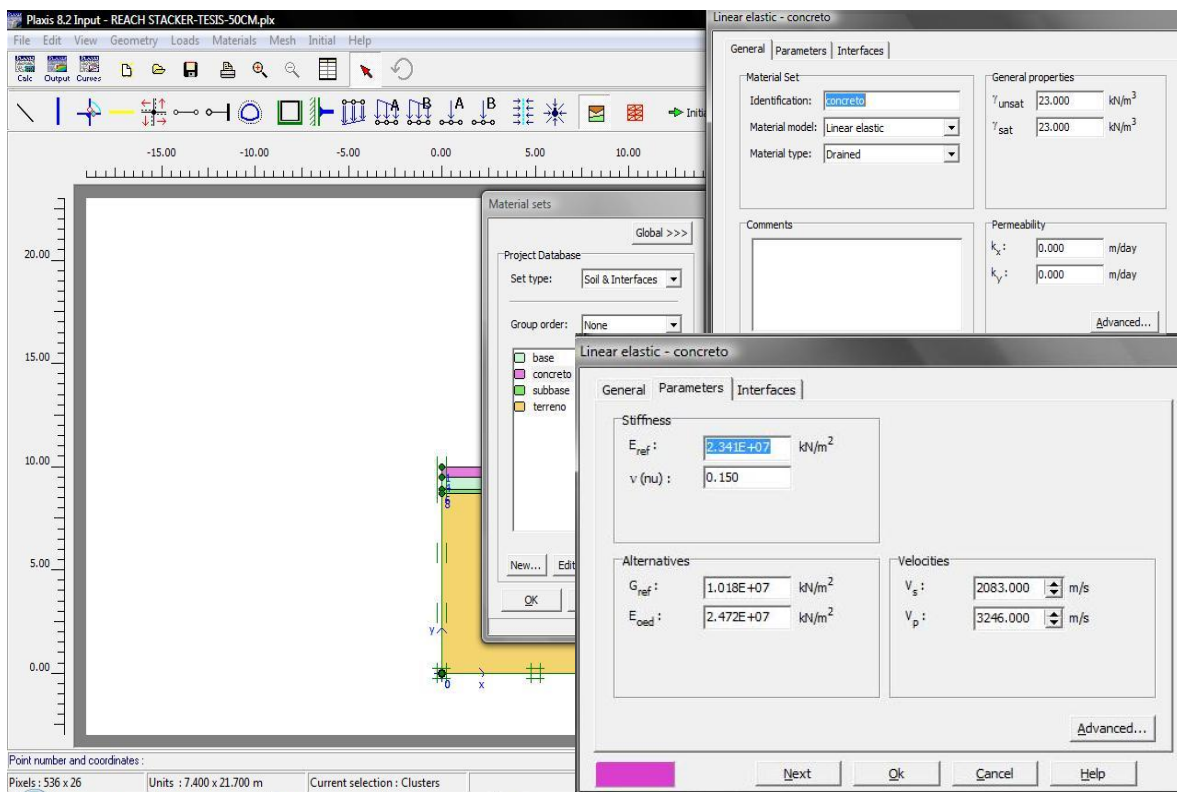


Figura 20. Propiedades elásticas de los materiales empleados.

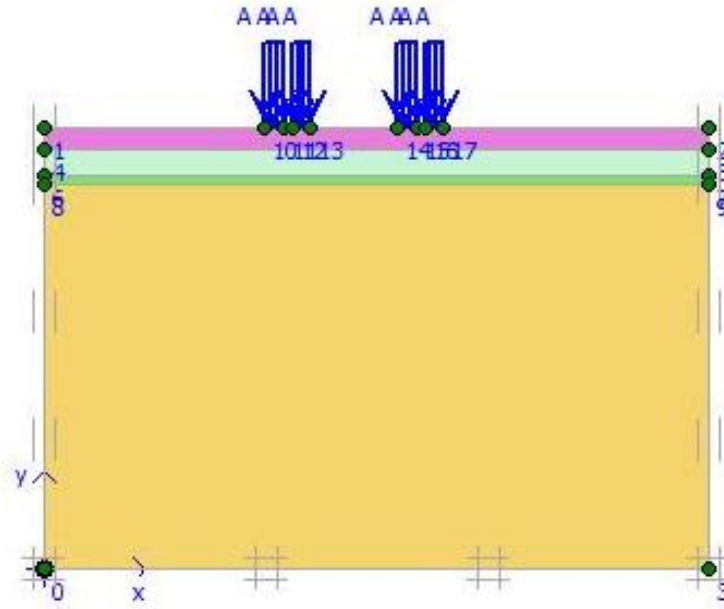


Figura 21. Cargas aplicadas al pavimento. Geometría del Eje Delantero Cargado.

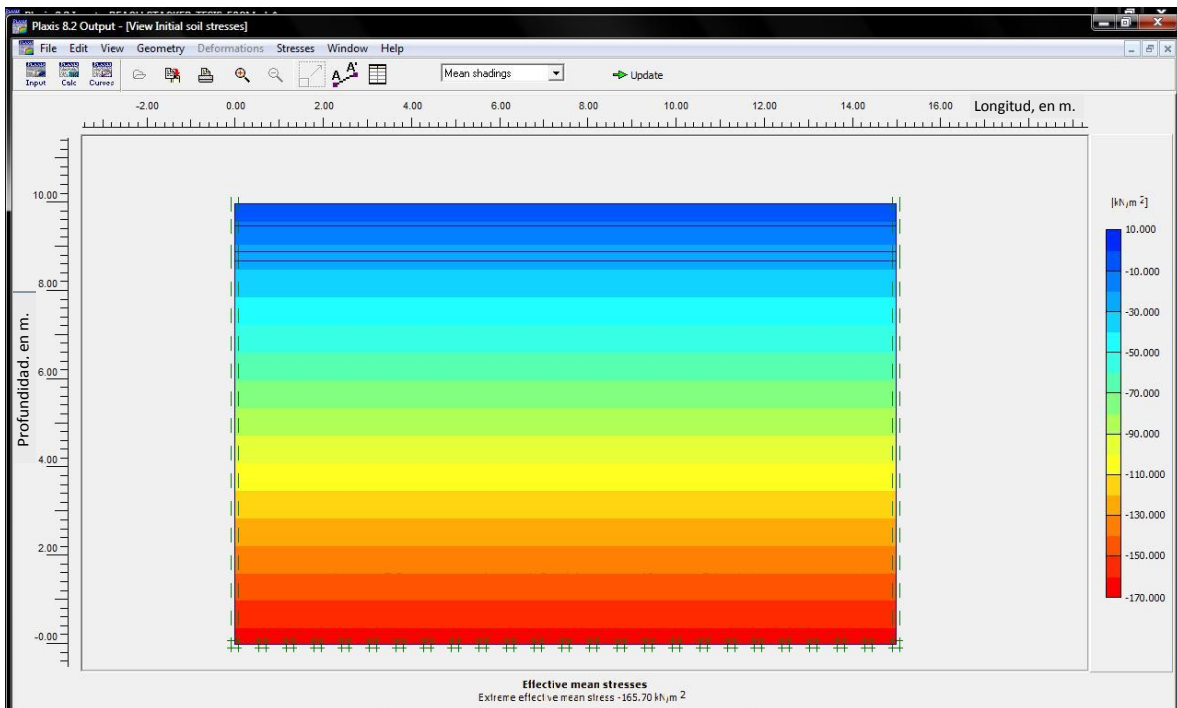


Figura 22. Condiciones iniciales del sistema.
Esfuerzos en la masa del suelo por peso propio.

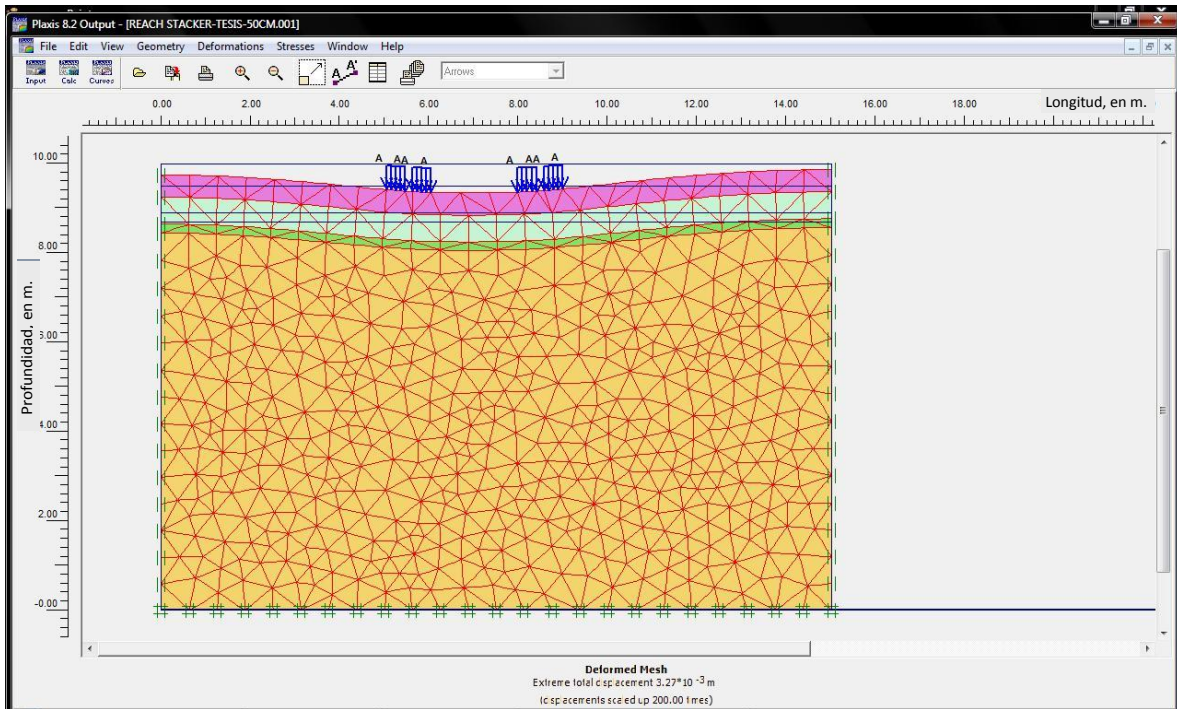


Figura 23. Deformación del pavimento debido a la acción de las cargas.

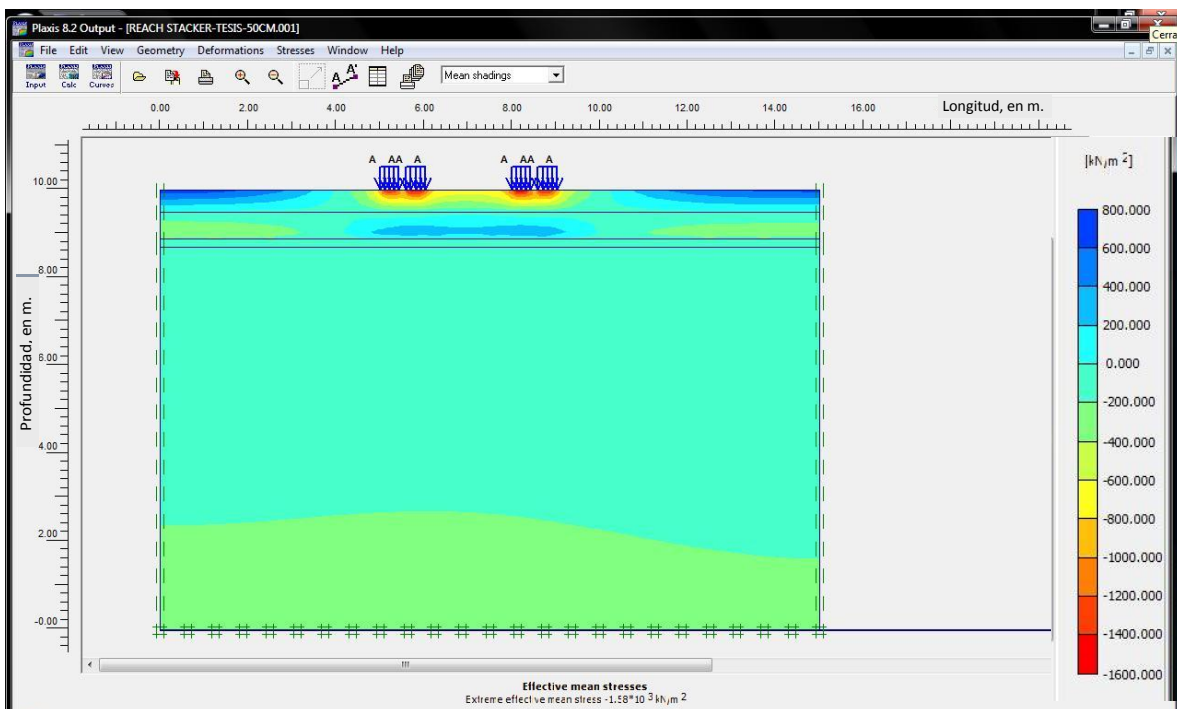


Figura 24. Distribución de esfuerzos en el pavimento debido a la acción de las cargas.

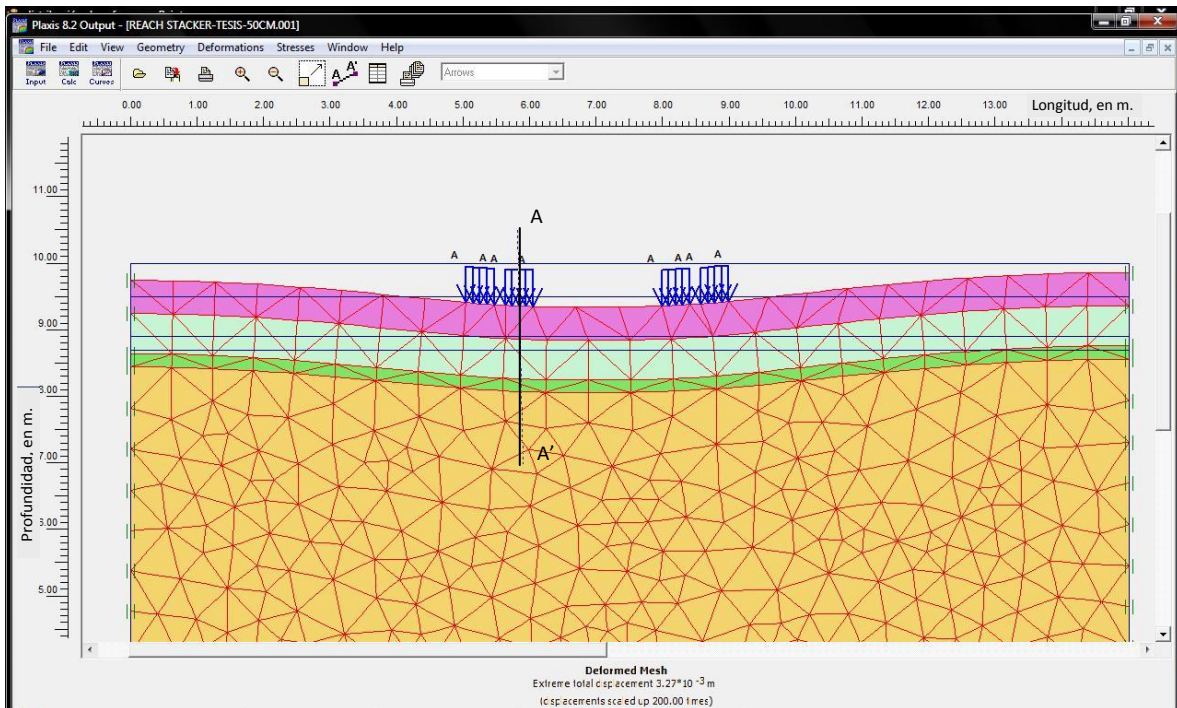


Figura 25. Corte A-A' para obtener la distribución de esfuerzos en la estructura del pavimento.

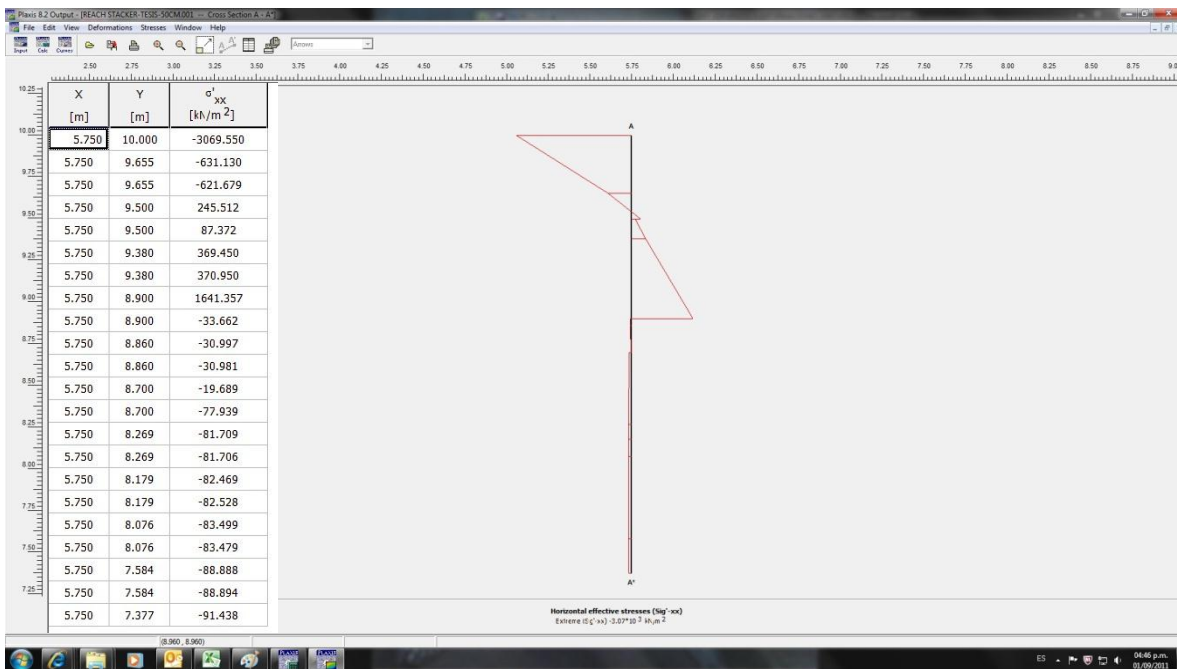


Figura 26. Determinación de esfuerzos σ'_{xx} .

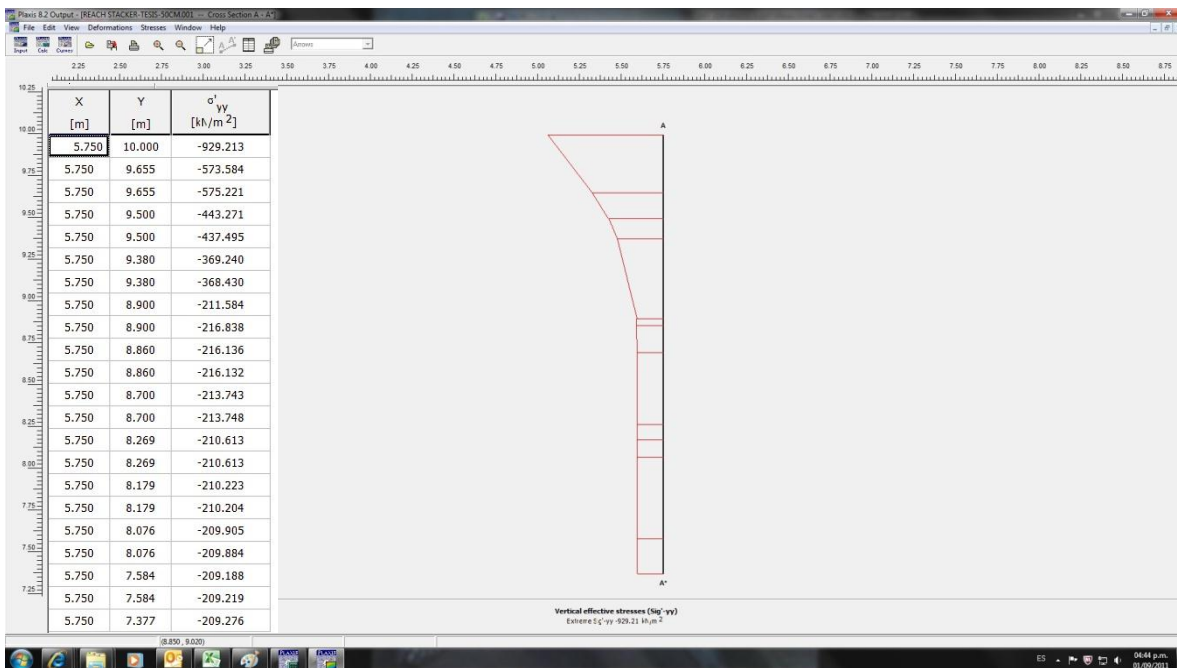


Figura 27. Determinación de esfuerzos σ'_{yy} .

Con la magnitud de los esfuerzos que se obtuvieron en la estructura del suelo se procede a desarrollar el análisis de tránsito. Sin embargo, es necesario analizar los demás ejes del equipo para obtener el daño que genera cada uno en la estructura del pavimento.

Después del análisis de cada eje se determina el daño producido por el tránsito del equipo en términos de un solo eje de carga. Como Eje de diseño se empleará aquel que proporcione el mayor daño a la estructura.

Siguiendo la metodología desarrollada con anterioridad, se procede a realizar el análisis del otro eje de carga, por ejemplo:

Equipo en análisis: Cargador Reach Stacker

Eje de análisis: Eje trasero cargado.

Estructura de pavimentación: Concreto

Este eje tiene la característica de contar con un arreglo simple de llantas como se representa en la figura.

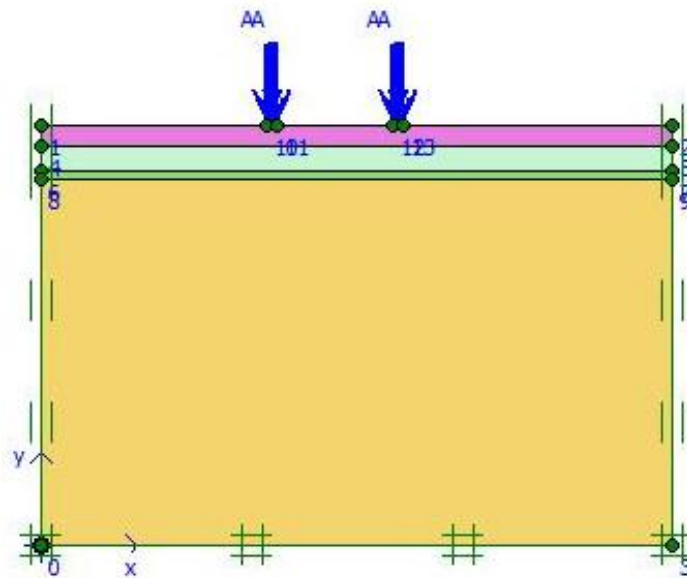


Figura 28. Cargas aplicadas al pavimento (Eje trasero cargado).

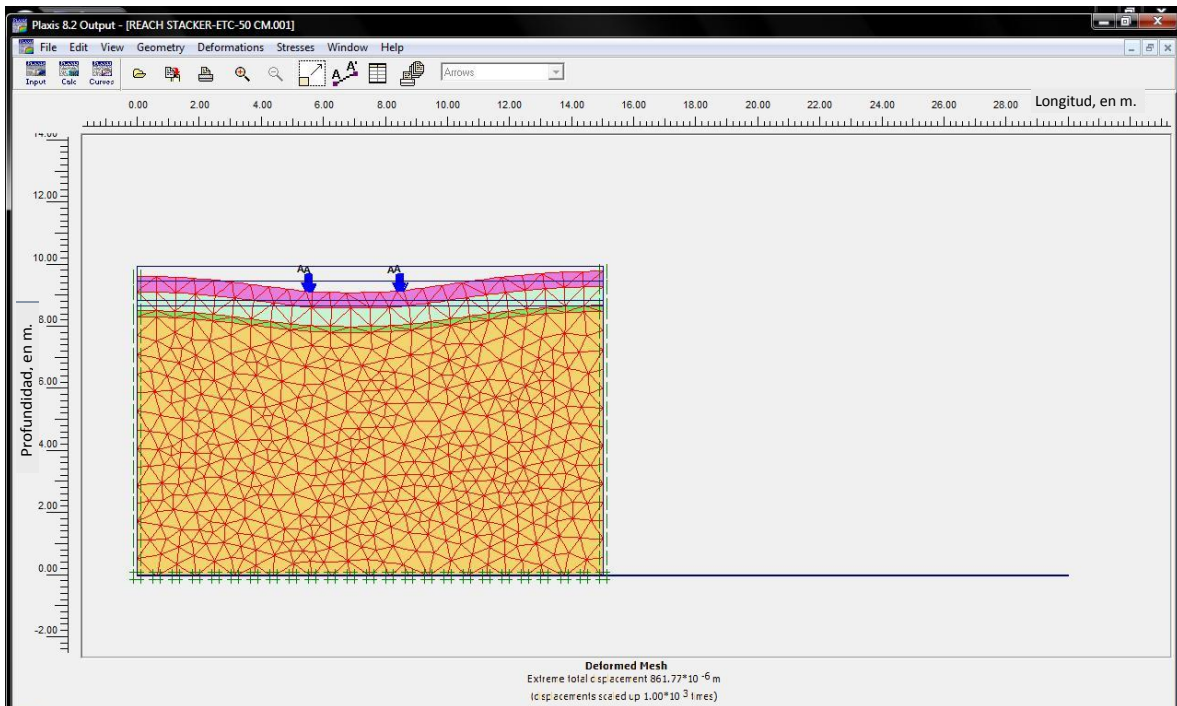


Figura 29. Deformación del pavimento debido a la acción del eje.

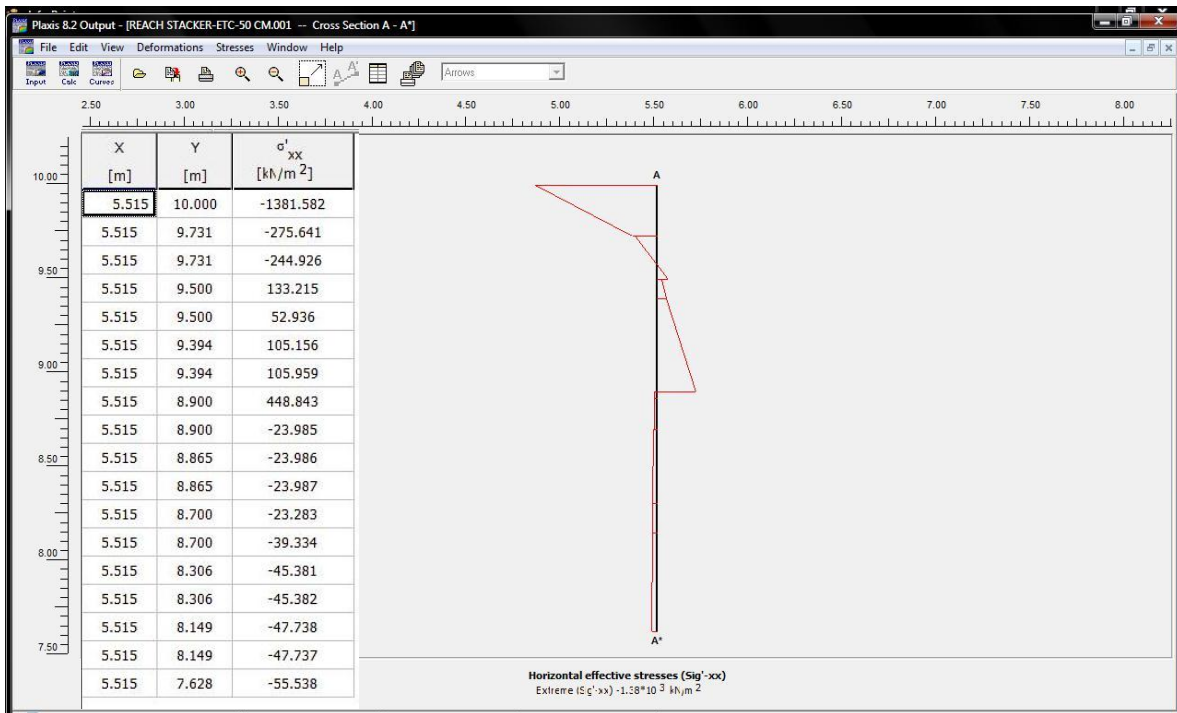


Figura 30. Determinación de esfuerzos σ'_{xx} .

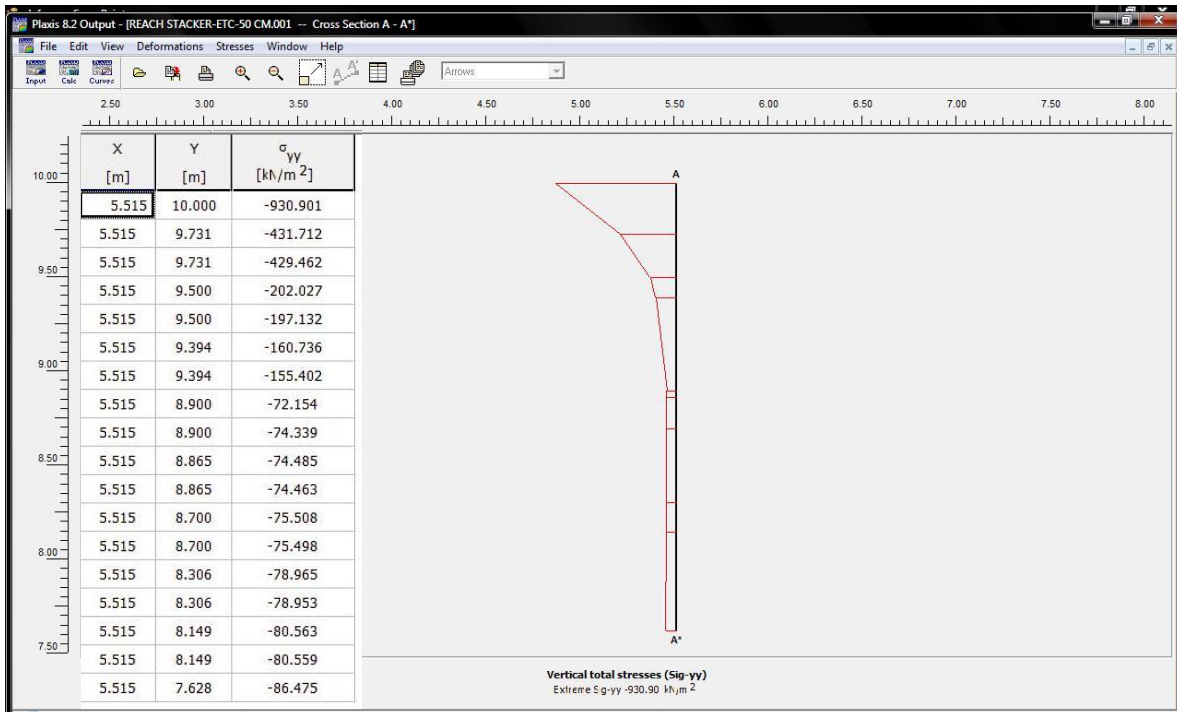


Figura 31. Determinación de esfuerzos σ_{yy} .

De esta forma es como se determinan los esfuerzos en la estructura del pavimento; posteriormente con estos esfuerzos se realiza el análisis de tránsito para determinar el número de pasadas permisible en la estructura del pavimento.

IV.3 Aspectos complementarios al diseño

IV.3.1 Concreto

Para aumentar la vida útil de un pavimento depende de la calidad de los materiales empleados, una buena subestructura, buen drenaje y sobre todo buenas técnicas de colocación, compactación y terminado de la capa de concreto.

Para complementar el diseño del espesor del pavimento es conveniente tener en cuenta los siguientes aspectos que, aunque no están directamente en el rubro del diseño de espesores, se está obligado a estudiar para complementar el proyecto estructural del pavimento.

a) Barras de amarre

Las barras de amarre se colocan a lo largo de la junta longitudinal para amarrar dos losas, con la finalidad de que se mantengan juntas y asegurar que la carga se transfiera a través de la junta.

Las varillas de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro por 36 pulgadas de longitud y separación de 30 a 40 pulgadas son las que comúnmente se usan.

b) Pasajuntas

El tamaño de las pasajuntas depende del espesor de la losa. Se usan en las juntas transversales para transferir las cargas a las losas adyacentes, ya que el esfuerzo y la deflexión en la junta son mucho más pequeños cuando las cargas son soportadas por dos losas. El uso de pasajuntas puede minimizar las fallas de bombeo y de diferencia de elevación de losas.

Tabla 8. Diámetros y longitudes recomendadas en pasajuntas.

ESPESOR DE LOSA (mm)	BARRAS PASAJUNTAS		
	Diámetro (mm)	Longitud (cm)	Separación (cm)
13 a 15	19	41	30
15 a 20	25	46	30
20 a 30	32	46	30
30 a 43	38	51	38
43 a 50	45	56	46

c) Modulaci3n de losas

A cambio de evitar la aparici3n de fisuras en la losa es esencial que se realicen las juntas de contracci3n en modulaciones cortas. La regla pr3ctica que permite dimensionar los tableros de losas para inducir el agrietamiento controlado bajo sus cortes es la siguiente:

$$S_{JT} = (21 \text{ A } 24) D \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

S_{JT} = Separaci3n de juntas transversales (≤ 5.0 m)

D = Espesor del pavimento

Se utiliza el valor de $21 \cdot D$ cuando hay mayor fricci3n entre la base y el pavimento de concreto, como en el caso de bases estabilizadas, bases con textura muy cerrada o Whitetopping.

El valor de 24 se utiliza cuando el valor de la base y el pavimento corresponden a valores normales, como en el caso de bases granulares.

La otra dimensi3n que tiene que ver con la modulaci3n de losas es la separaci3n de juntas longitudinales cuyo valor debe estar entre 3.0 y 4.5 m que se refiere a la forma de los tableros de las losas.

La relaci3n entre largo y ancho de un tablero de losas no deber3 estar fuera de los l3mites 0.71 a 1.4.

IV.3.1.1 Materiales

Los materiales de subbase y base tratada con cemento deben de cumplir con los lineamientos que enuncia la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) en sus normas respectivas a Materiales para Pavimentos.

A continuaci3n se enuncian dichas normas y adem3s pueden consultarse en el Anexo 3.

- Materiales para Terrapl3n N CMT 1 01/02
- Materiales para Subrasante N CMT 1 03/02
- Materiales para Subbases N CMT 4 02 001/11
- Materiales para Bases Hidr3ulicas N CMT 4 02 002/11
- Materiales para Bases Tratadas N CMT 4 02 003/04

El material empleado en la capa de rodamiento (concreto y adoqu3n) debe de cumplir con la normativa respectiva. La resistencia a la tensi3n del concreto ser3 superior a los 48 Kg/cm².

Para material de concreto se debe de apegar a las *Normas Mexicanas sobre Concreto Fresco y Endurecido (producto, especificaciones y m3todos de ensaye)*,

mientras que las características de los adoquines deben de estar en apego a las *Normas de Bloques, Tabiques o Ladrillos, Tabicones y Adoquines*.

La normativa antes mencionada marca los lineamientos y la calidad de los materiales que se deben emplear en la estructuración del pavimento. La normativa de la SCT se puede adquirir de forma gratuita en la página electrónica siguiente www.normas.imt.mx mientras que las normas relativas a concreto y adoquines se pueden adquirir en instituciones privadas como el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) o en el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).

IV.3.1.2 Colocación

El concreto debe ser tendido con máquina excepto en lugares reducidos donde su operación sea inapropiada. Es deseable realizar la construcción de una losa de prueba donde se observe la pericia del contratista para ejecutar los trabajos. En dicha losa de prueba se debe verificar que el concreto esté bien compactado, libre de defectos y con el acabado que se especifica.

IV.3.1.3 Juntas

Las juntas transversales y longitudinales que se realizan durante la construcción del pavimento deben de ser perpendiculares. Las juntas transversales deben de formar un ángulo de 90° con el eje del pavimento. Cuando el remate de las juntas se haga a mano se debe dejar una arista de 5 mm de radio.

El detalle de juntas se pueden observar en las siguientes figuras:

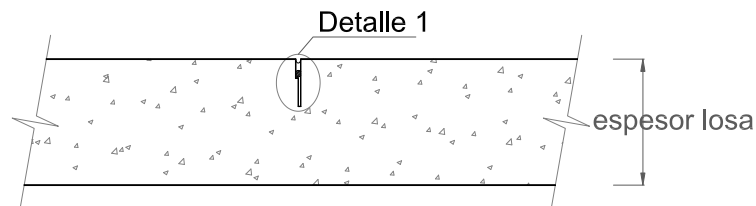


Figura 32. Junta de contracción

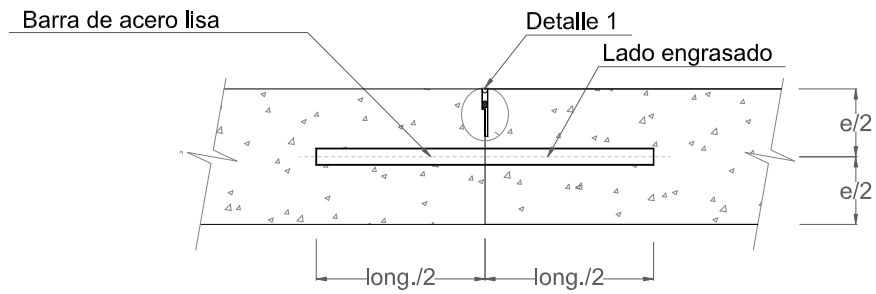


Figura 33. Pasajuntas

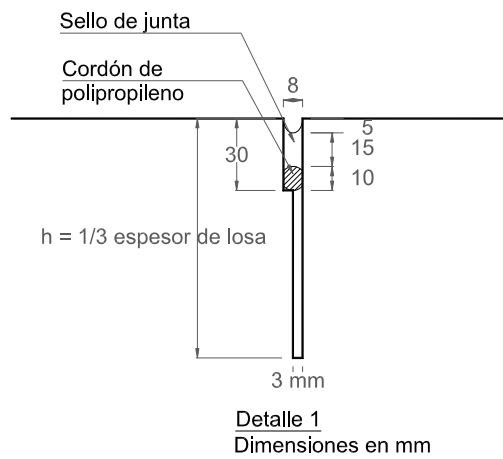


Figura 34. Detalle de sello

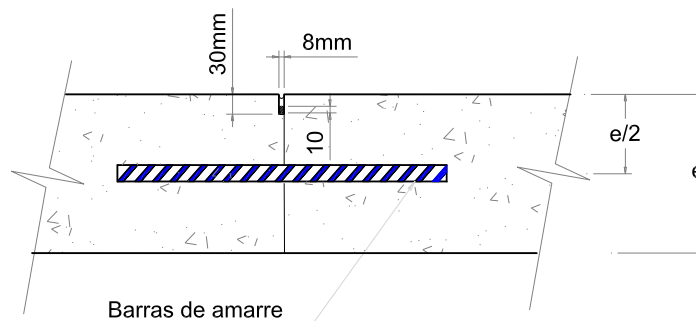


Figura 35. Barras de amarre

IV.3.1.4 Acabado

Es importante producir una textura superficial satisfactoria que dure bajo el tráfico, para la resistencia al derrape de un pavimento de concreto. La textura superficial determina que tan rápido escapa el agua entre las ruedas del vehículo y el pavimento y que tan rápido drena el agua desde la superficie durante la lluvia. Un acabado escobillado es apropiado para los fines operativos de la terminal.

IV.3.2 Adoquines

Para los adoquines se puede esperar una vida útil de 20 años siempre y cuando se haya realizado un correcto diseño y una construcción apropiada así como un mantenimiento preventivo.

IV.3.2.1 Diseño

El proceso de diseño para adoquines es similar al procedimiento de diseño de un pavimento asfáltico. Se acepta que una capa de adoquín y una cama de arena de 5 cm tienen un comportamiento similar al de una capa de material asfáltico de 16 cm de espesor.

Los bloques de adoquín deben ser de forma rectangular con dimensiones de 80x100x200 mm (alto, ancho, largo) y la cama de arena debe de estar apoyada sobre una capa base tratada para rigidizar la estructura del pavimento.

IV.3.2.2 Materiales

Las especificaciones y la calidad de los adoquines se enuncian en las *Normas de Bloques, Tabiques o Ladrillos, Tabicones y Adoquines* y se pueden adquirir en el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).

Comúnmente la resistencia mínima a compresión de los adoquines oscila entre 350 y 450 kg/cm², sin embargo, en el caso específico de una terminal portuaria se recomienda emplear adoquines con una resistencia superior a los 500 kg/cm².

El material pétreo que se emplee como cama de arena debe cumplir con la siguiente granulometría:

Tabla 9. Camas de arena para adoquines (Salazar, 1998).

CAMA DE ARENA (Requisitos Granulométricos)	
Denominación de la Malla	% que Pasa
3/8"	100
No. 4	95 – 100
No. 8	80 – 100
No. 16	50 – 95
No. 30	25 – 60
No. 50	10 – 30
No. 100	5 – 15
No. 200	0 – 10

Adicionalmente, la arena no deberá contener más del 5% de finos. La humedad a la que se coloque estará comprendida entre 5 a 10%.

La compactación de este material se efectuará cuando ya se haya colocado las piezas de adoquín, a fin de que la arena penetre en el espacio entre las citadas piezas. Para lograr lo anterior será suficiente colocar del orden de 1 a 2 cm adicionales de arena en estado suelto, antes de proceder a compactar.

La arena para el junteo debe estar limpia, seca y con una granulometría tal que el 100% pase la malla No. 16 y el 10% pase la malla No. 200.

IV.3.2.3 Bordillos

Los bordillos son elementos estructurales que restringen los movimientos laterales del adoquinado y del material de plantilla, debido al paso del tránsito.

El tipo común de bordillo es a base de concreto con suficiente ancho y profundidad para prevenir el movimiento de los adoquines. La resistencia de este elemento estructural deberá ser de 300 kg/cm² mínimo.

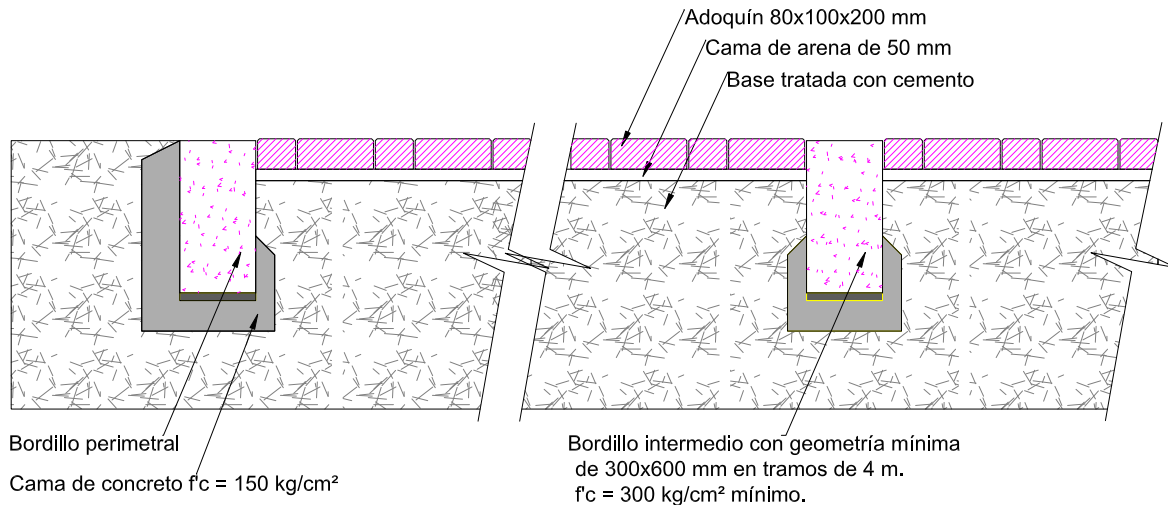


Figura 36. Bordillo para pavimento con adoquín.

IV.3.2.4 Colocación

La capa base deberá ser tendida y compactada con maquinaria dentro de una tolerancia de $\pm 10 \text{ mm}$. Es esencial que la base esté completamente compactada para dejar una superficie densa y lisa en la cual será tendida la cama de arena.

La cama de arena será tendida sobre una superficie lisa hasta alcanzar una profundidad promedio de 50 mm después de su compactación.

Los adoquines serán colocados a mano o con maquinaria con un patrón regular de *cola de pescado* a 45° o a 90° sobre el eje del pavimento.

Los adoquines serán cortados con máquina. En las inmediaciones de los bordillos, banquetas, pozos de visita, alcantarillas, etc. se utilizarán fragmentos de adoquines, los cuales provendrán de cortes hechos con máquina.

En el caso de que los huecos por rellenar sean tan pequeños que la ejecución de fragmentos no sea práctica, se deberá colocar en los bordes a manera de rellenos concreto con una resistencia de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, con un tamaño máximo de agregado de 1 cm.

Después del tendido de los adoquines, garantizando una junta mínima de 2 mm de espesor, se procede a compactarlos con la ayuda de una placa vibratoria para alcanzar una superficie lisa.

Después de la compactación se deberá realizar el sellado de las juntas con arena fina descrita en el inciso IV.3.2.2.

IV.3.2.5 Juntas de expansión

En condiciones normales no se requieren juntas de expansión. Sin embargo, algunos problemas se pueden presentar si los adoquines son colocados con una junta muy cerrada. A cambio de prevenir esté problema es necesario garantizar que los adoquines a emplearse cuenten con una junta integral.

IV.3.2.6 Acabado

Un acabado de superficie satisfactorio es aquel donde no existan adoquines que sobresalgan del adoquín vecino. Como criterio de aceptación, una tolerancia en la superficie será de 5 mm en 3 metros.

IV.3.3 Asfalto

No es recomendable emplear pavimento flexible ya que el desempeño no es el óptimo a causa de los grandes esfuerzos que debe soportar la estructura del pavimento.

Algunas de los motivos por los que no es recomendable un pavimento asfáltico se enuncian a continuación:

- El material asfáltico es susceptible a deformación en periodos de clima caluroso. La resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura.
- La rigidez disminuye en relación al tiempo de aplicación de carga, por ejemplo, en la esquina de apoyo en la estiba de contenedores se produce una penetración bastante profunda.
- El pavimento asfáltico se deteriora rápidamente con la presencia de aceite o derrame de combustible.
- La carpeta asfáltica se deteriora con el tiempo (vida útil de 12.5 años)
- Requiere reparaciones y recarpeteos constantes
- Alto costo de mantenimiento (bacheo anual, recarpeteo cada 5 años)
- Se deforma su superficie ofreciendo un manejo irregular, o bajo índice de servicio.

En cambio los pavimentos rígidos presentan un mejor desempeño debido a las características siguientes:

- Deterioro mínimo durante su vida útil (20 a 30 años)
- Mantenimiento mínimo (sello de grietas, sustitución de sello en juntas, cada 5 años)
- Deformación mínima de su superficie (no se presentan roderas)
- Índice de servicio alto durante su vida útil

- Mayor velocidad de construcción
- Disminución de costos de operación
- Mejor drenaje superficial
- Mayor reflexión de la luz
- Requiere menor estructura de soporte

También representan un ahorro principalmente por su bajo costo de conservación y algunos otros ahorros en combustibles de camiones y en iluminación de vialidades.

IV.4 Consideraciones de diseño en la estructura de pavimento con adoquín

Para determinar la estructura del pavimento de adoquín se deben realizar algunas consideraciones adicionales, ya que esta estructura se comporta como un pavimento semi-rígido. El siguiente análisis se basa en el empleo de adoquines de concreto con una capa de base tratada con cemento, como la empleada en el análisis de capa de rodamiento con concreto.

Según el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (en Coronado, 2002), los adoquines colocados sobre un lecho de arena de 5 cm tienen una capacidad de distribución de carga similar a la del asfalto compactado de 16 cm de espesor.

Con base en esta afirmación se desarrollará una estructura de pavimento con adoquines para que soporten el tránsito del cargador Reach Stacker, teniendo en cuenta que los adoquines son unos elementos prefabricados que ya no generan tensión en la fibra inferior de la capa de rodamiento, debido a que dicha capa se encuentra “prefracturada” por los mismos adoquines; por lo tanto, el análisis se centrará en el potencial de que se manifieste la falla por deformación permanente en la estructura del pavimento.

Para fines de análisis se emplea un módulo de elasticidad del adoquín de 31,638 kg/cm², que es el que corresponde a una carpeta asfáltica. Aunque el módulo de elasticidad de los adoquines es muy superior al del pavimento asfáltico, se emplea este número ya que como se citó, el comportamiento del adoquín es similar al de una capa de asfalto de 16 cm de espesor.

La estructura del adoquín será la siguiente:
Adoquines con geometría 8x10x20 cm (alto, ancho, largo).
Resistencia a la compresión superior a los 500 kg/cm².
Cama de arena de 5 cm de espesor.
Arena para sello de adoquines.

Como está estructura es fija, es decir, no se puede modificar sustancialmente la estructura de los adoquines, las dimensiones de éstos no cambian demasiado,

entonces se procederá a modificar el espesor de la capa base con la finalidad de obtener una estructura de pavimento que no presente falla por deformación permanente.

El procedimiento de análisis es el mismo efectuado para la estructura de pavimento con concreto hidráulico, considerando las mismas cargas pero modificando el espesor de la base tratada con cemento.

A continuación se muestran los resultados del programa procesados en hojas de Excel para realizar el análisis de tránsito y determinar el espesor de diseño, tanto en estructuras de pavimento con concreto como adoquines.

También se presenta un análisis de costos de construcción de ambas estructuras de pavimentación a manera de cotejar y determinar la opción más factible en términos económicos.

EQUIPO: CARGADOR REACH STACKER

CAPA DE RODAMIENTO: CONCRETO

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Capa	Espesor (m)				Espesor (m)				Espesor (m)				Espesor (m)				Módulo Elasticidad (KN/m²)
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	
Sup. Rodamiento	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	27,535,450
Base	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	6,377,650
Subbase	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	136,516
Subrasante	infinita				infinita				infinita				infinita				103,421

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS (KN/m²)

	EJE DELANTERO CARGADO				EJE DELANTERO DESCARGADO				EJE TRASERO CARGADO				EJE TRASERO DESCARGADO			
	σz1	σz2	σr1	σr2	σz1	σz2	σr1	σr2	σz1	σz2	σr1	σr2	σz1	σz2	σr1	σr2
σz1	609.106	492.464	419.269	357.978	422.11	333.547	276.725	229.502	321.6	240.557	191.191	158.772	507.405	372.747	286.961	231.139
σz2	218.784	208.067	198.855	191.322	143.897	138.059	133.382	129.552	74.057	72.876	72.205	71.868	104.111	100.778	98.329	96.593
σr1	910.406	-501.52	-1310.843	-1742.596	459.054	-368.73	-826.089	-1098.961	-179.323	-463.927	-577.566	-617.411	-121.528	-1186	-880.582	-971.822
σr2	61.045	62.783	65.413	68.612	46.502	48.435	50.978	53.835	32.319	34.827	37.458	40.167	37.801	40.435	43.266	46.168
σr3	77.393	77.511	78.611	80.309	56.605	57.525	59.134	61.056	37.75	38.755	40.912	43.179	44.826	46.65	48.726	50.953

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA (εr1)

$(\epsilon_{r1}) = 1/2\epsilon_1 (\sigma_{r1}-\sigma_{z1})$

(εr1)	5.4711E-06	-1.8049E-05	-3.1416E-05	-3.8143E-05	6.7084E-07	-1.2752E-05	-2.0025E-05	-2.4123E-05	-9.0960E-06	-1.2792E-05	-1.3959E-05	-1.4094E-05	-1.1420E-05	-2.8304E-05	-2.1201E-05	-2.1844E-05
-------	------------	-------------	-------------	-------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA SUBRASANTE (εz3)

$(\epsilon_{z3}) = 1/E_3 (\sigma_{z2}-\sigma_{r3})$

(εz3)	1.3671E-03	1.2624E-03	1.1627E-03	1.0734E-03	8.4404E-04	7.7870E-04	7.1792E-04	6.6230E-04	3.5106E-04	3.2992E-04	3.0258E-04	2.7740E-04	5.7324E-04	5.2337E-04	4.7962E-04	4.4130E-04
-------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

CRITERIO DE FALLA PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$N_d = f_4(\epsilon_{z3})^{f_5}$ (número de repeticiones de carga permisibles)
 Según Compañía Shell:
 $f_4 = 6.150E-07$
 $f_5 = 4.00$

Nd	1.760E+05	2.422E+05	3.366E+05	4.633E+05	1.212E+06	1.673E+06	2.315E+06	3.196E+06	4.049E+07	5.191E+07	7.337E+07	1.039E+08	5.696E+06	8.197E+06	1.162E+07	1.622E+07
Tránsito esperado =	200,000.00															

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN EL CONCRETO

$r_0 = \frac{\sigma_{z0}}{\sigma'_c}$

σz0	910.406	-501.52	-1310.843	-1742.596	459.054	-368.73	-826.089	-1098.961	-179.323	-463.927	-577.566	-617.411	-121.528	-1186	-880.582	-971.822
σr	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675
ro	0.1871	-0.1031	-0.2695	-0.3582	0.0944	-0.0758	-0.1698	-0.2259	-0.0369	-0.0954	-0.1187	-0.1269	-0.0250	-0.2438	-0.1810	-0.1998
	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS

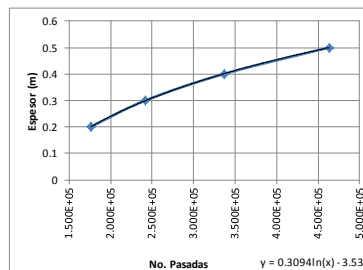
ANÁLISIS DE TRÁFICO

Tránsito esperado = 100% 200,000.00 pasadas
 Equipo cargado = 200,000.00
 Equipo descargado = 200,000.00

FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA

1 pasada eje delantero descargado = 0.1448 eje delantero cargado
 1 pasada eje trasero cargado = 0.0047 eje delantero cargado
 1 pasada eje trasero descargado = 0.0295 eje delantero cargado
 Equivalencia de carga = 35,799.74 ejes delanteros cargados

PASADAS TOTALES = 235,800 ejes delanteros cargados



ESPESOR DISEÑO (m) : 0.2905
 ESPESOR DISEÑO (m) : 0.30

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FINAL:

Capa rodamiento concreto f'c=350 kg/cm² (m) = 0.30
 Capa base tratada con cemento f'c=70 kg/cm² (m) = 0.60
 Capa subbase (m) = 0.40
 Capa subrasante (m) = infinita

EQUIPO: CARGADOR REACH STACKER
CAPA DE RODAMIENTO: ADOQUÍN
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Capa	Espesor (m)				Espesor (m)				Espesor (m)				Espesor (m)				Módulo Elasticidad (KN/m ²)
Sup. Rodamiento	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	3,102,641
Base	0.6	0.8	1	1.2	0.6	0.8	1	1.2	0.6	0.8	1	1.2	0.6	0.8	1	1.2	6,377,650
Subbase	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	136,516
Subrasante	infinita				infinita				infinita				infinita				103,421

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS (KN/m²)

	EJE DELANTERO CARGADO				EJE DELANTERO DESCARGADO				EJE TRASERO CARGADO				EJE TRASERO DESCARGADO			
Oz1	744.125	779.294	748.757	796.263	580.709	572.224	575.141	586.095	512.474	508.636	510.762	519.661	756.124	760.875	766.569	768.159
Oz2	251.237	229.734	212.879	199.433	163.459	151.84	142.677	135.998	82.267	79.222	77.422	76.76	118.187	110.363	105.224	102.13
Or1	1376.788	1375.916	1287.99	1219.819	907.462	885.636	843.75	792.234	538.723	507.065	455.106	440.127	835.05	807.487	752.112	706.465
Or2	68.931	69.157	71.4	74.821	50.638	52.678	55.426	59.039	32.458	36.46	40.305	44.315	38.668	42.677	46.57	50.684
Or3	87.509	85.283	85.168	86.476	62.197	62.637	63.92	66.243	37.826	40.856	43.986	47.356	47.194	49.636	52.366	55.494

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA (Er1)

$$(Er1) = 1/2E1 [Or1-Oz1] \quad \text{NO APLICA}$$

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA SUBRASANTE (Ez3)

$$(Ez3) = 1/E3 [Oz2-Or3]$$

(Ez3) =	1.5831E-03	1.3967E-03	1.2349E-03	1.0922E-03	9.7912E-04	8.6252E-04	7.6152E-04	6.7447E-04	4.2971E-04	3.7097E-04	3.2330E-04	2.8431E-04	6.8644E-04	5.8718E-04	5.1109E-04	4.5093E-04
---------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

CRITERIO DE FALLA PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$$Nd = f4(Ez3)^{-f5} \quad (\text{número de repeticiones de carga permisibles})$$

Según Compañía Shell:

$$f4 = 6.150E-07$$

$$f5 = 4.00$$

Nd =	9.791E+04	1.616E+05	2.645E+05	4.322E+05	6.692E+05	1.111E+06	1.829E+06	2.972E+06	1.804E+07	3.247E+07	5.629E+07	9.412E+07	2.770E+06	5.174E+06	9.013E+06	1.487E+07
Tránsito esperado =	200,000.00															

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN EL CONCRETO

$$r_0 = \frac{\sigma_{to}}{\sigma_r'} \quad \text{NO APLICA}$$

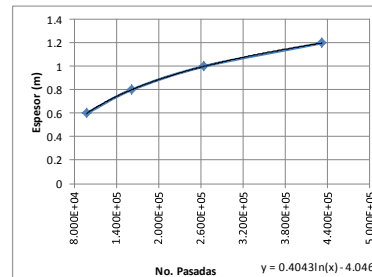
ANÁLISIS DE TRÁFICO

Tránsito esperado =	100%	200,000.00	pasadas
Equipo cargado =		200,000.00	
Equipo descargado =		200,000.00	

FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA

1 pasada eje delantero descargado =	0.1446	eje delantero cargado
1 pasada eje trasero cargado =	0.0047	eje delantero cargado
1 pasada eje trasero descargado =	0.0293	eje delantero cargado
Equivalencia de carga =	35,733.61	ejes delanteros cargados

PASADAS TOTALES = 235,734 ejes delanteros cargados



ESPESOR DISEÑO (m) : 0.9545

ESPESOR DISEÑO (m) : 0.96

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FINAL:

Capa rodamiento adoquin-cama arena (m) =	0.13
Capa base tratada con cemento f'c=70 kg/cm ² (m) =	0.96
Capa subbase (m) =	0.4
Capa subrasante (m) =	infinita

EQUIPO: RTG

CAPA DE RODAMIENTO: CONCRETO

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Capa	Espesor (m)				Espesor (m)			
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
Sup. Rodamiento	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
Base	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Subbase	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Subrasante	infinita				infinita			

Módulo Elasticidad
(KN/m²)
27,535,450
6,377,650
136,516
103,421

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS (KN/m²)

	EJE CARGADO				EJE DESCARGADO			
	813.842	668.297	555.49	466.115	702.522	595.987	493.319	410.085
σ _{x1}	221.348	208.965	198.875	190.204	192.046	181.472	172.981	165.66
σ _{r1}	815.081	-902.02	-1765.602	-2191.247	509.091	-929.942	-1624.554	-1964.186
σ _{r2}	56.134	58.458	61.608	65.218	49.199	51.536	54.558	58.004
σ _{r3}	74.127	74.55	75.825	77.681	65.095	65.718	67.101	69.002

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA (ε_{r1})

$$(\epsilon_{r1}) = 1/2E_1 (\sigma_{r1} - \sigma_{x1})$$

(ε_{r1}) = 2.2498E-08 -2.8514E-05 -4.2147E-05 -4.8253E-05 -3.5124E-06 -2.7708E-05 -3.8457E-05 -4.3113E-05

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA SUBRASANTE (ε_{z3})

$$(\epsilon_{z3}) = 1/E_3 (\sigma_{z2} - \sigma_{r3})$$

(ε_{z3}) = 1.4235E-03 1.2997E-03 1.1898E-03 1.0880E-03 1.2275E-03 1.1192E-03 1.0238E-03 9.3460E-04

CRITERIO DE FALLA PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$$N_d = f_4 (\epsilon_{z3})^4 (-f_5) \quad (\text{número de repeticiones de carga permisibles})$$

Según Compañía Shell:

$$f_4 = 6.150E-07$$

$$f_5 = 4.00$$

N_d = 1.498E+05 2.155E+05 3.069E+05 4.389E+05 2.709E+05 3.919E+05 5.598E+05 8.061E+05

Tránsito esperado = 200,000.00

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN EL CONCRETO

$$\gamma_0 = \frac{\sigma_{r0}}{\sigma_r^*}$$

σ _{r0}	815.081	-902.02	-1765.602	-2191.247	509.091	-929.942	-1624.554	-1964.186
σ _r	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675
γ ₀	0.1676	-0.1854	-0.3629	-0.4504	0.1047	-0.1912	-0.3339	-0.4038
	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS

ANÁLISIS DE TRÁFICO

Tránsito esperado = 100% 200,000.00

Equipo cargado = 200,000.00

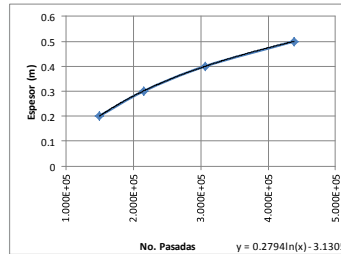
Equipo descargado = 200,000.00

FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA

1 pasada eje descargado = 0.5482 eje cargado

Equivalencia de carga = 109,637.53 ejes cargados

PASADAS TOTALES = 309,638 ejes cargados



ESPESOR DISEÑO (m) : 0.4020
ESPESOR DISEÑO (m) : 0.41

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FINAL:

Capa rodamiento concreto $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.41
Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.6
Capa subbase (m) = 0.4
Capa subrasante (m) = infinita

EQUIPO: RTG

CAPA DE RODAMIENTO: ADOQUÍN

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Capa	Espesor (m)				Espesor (m)			
Sup. Rodamiento	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Base	0.6	0.8	1	1.2	0.6	0.8	1	1.2
Subbase	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Subrasante	infinita				infinita			

Módulo Elasticidad
(KN/m²)
3,102,641
6,377,650
136,516
103,421

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS (KN/m²)

	EJE CARGADO				EJE DESCARGADO			
σz1	991.507	1017.428	1015.368	1005.755	954.555	979.88	960.796	965.751
σz2	257.268	233.016	214.08	199.245	224.07	202.807	186.055	173.785
σr1	1725.545	1656.327	1567.832	1461.457	1537.185	1474.71	1399.038	1307.55
σr2	62.383	64.598	67.401	83.878	54.812	56.972	59.899	63.884
σr3	83.425	82.31	82.424	87.39	73.406	72.63	73.111	74.906

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA (εr1)

$$\{\epsilon_{r1}\} = 1/2\epsilon_1 \{\sigma_{r1} - \sigma_{z1}\} \quad \text{NO APLICA}$$

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA SUBRASANTE (εz3)

$$\{\epsilon_{z3}\} = 1/E_3 \{\sigma_{z2} - \sigma_{r3}\}$$

{εz3}	1.6809E-03	1.4572E-03	1.2730E-03	1.0815E-03	1.4568E-03	1.2587E-03	1.0921E-03	9.5608E-04
-------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

CRITERIO DE FALLA PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$$N_d = f_4 \{\epsilon_{z3}\}^{-f_5} \quad (\text{número de repeticiones de carga permisibles})$$

Según Compañía Shell:

$$f_4 = 6.150E-07$$

$$f_5 = 4.00$$

Nd	7.703E+04	1.364E+05	2.342E+05	4.495E+05	1.365E+05	2.450E+05	4.324E+05	7.360E+05
Tránsito esperado =	200,000.00							

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN EL CONCRETO

$$r_0 = \frac{\sigma_{to}}{\sigma_r'} \quad \text{NO APLICA}$$

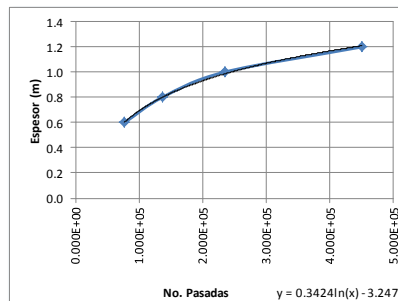
ANÁLISIS DE TRÁFICO

Tránsito esperado = 100% 200,000.00 pasadas
 Equipo cargado = 200,000.00
 Equipo descargado = 200,000.00

FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA

1 pasada eje descargado = 0.5416 eje cargado
 Equivalencia de carga = 108,322.84 ejes cargados

PASADAS TOTALES = 308,323 ejes cargados



ESPESOR DISEÑO (m) : 1.0798
 ESPESOR DISEÑO (m) : 1.08

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FINAL:

Capa rodamiento adoquin-cama arena (m) = 0.13
 Capa base tratada con cemento f'c=70 kg/cm² (m) = 1.08
 Capa subbase (m) = 0.4
 Capa subrasante (m) = infinita

EQUIPO: CAMIONES ARTICULADOS (PLANAS)

CAPA DE RODAMIENTO: CONCRETO

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Capa	Espesor (m)				Espesor (m)				Espesor (m)			
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
Sup. Rodamiento	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
Base	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Subbase	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Subrasante	infinita				infinita				infinita			

Módulo Elasticidad (KN/m²)
 27,535,450
 6,377,650
 136,516
 103,421

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS (KN/m²)

	EJE SENCILLO (DUAL) CARGADO				EJE SENCILLO CARGADO				EJE TÁNDEM CARGADO				EJE SENCILLO (DUAL) DESCARGADO				EJE SENCILLO DESCARGADO				EJE TÁNDEM DESCARGADO			
	268.768	211.372	202.797	173.383	229.082	167.194	129.987	107.512	259.036	203.407	195.147	168.58	216.042	159.861	148.023	127.374	94.525	67.888	55.116	49.938	218.11	159.928	146.093	127.602
Or1	110.111	104.885	100.859	97.732	63.206	62.054	61.476	61.324	106.742	101.876	98.083	95.082	86.357	83.222	80.902	79.281	39.552	40.442	41.578	42.857	86.381	83.231	81.007	79.27
Or2	464.426	-310.403	-727.611	-952.756	69.808	-251.177	-406.443	-481.941	445.312	-300.218	-700.201	-919.332	321.267	-236.531	-532.71	-691.769	24.047	-103.28	-163.69	-196.123	320.151	-236.402	-528.681	-692.177
Or3	32.609	34.884	37.549	40.497	27.708	30.034	32.537	35.132	32.26	34.482	37.173	40.13	30.029	32.274	34.876	37.638	25.049	27.36	29.738	32.167	30.024	32.272	34.839	37.642
Or3	41.656	42.949	44.712	46.793	31.84	33.708	35.785	37.998	40.956	42.281	44.065	46.173	36.607	38.172	40.085	42.221	26.736	28.86	31.067	33.332	36.605	38.171	40.065	42.223

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA (Er1)

$(Er1) = 1/2E1 \cdot (Or1 - Or2)$

(Er1) =	3.5529E-06	-9.4746E-06	-1.6895E-05	-2.0449E-05	2.8922E-06	-7.5970E-06	-9.7407E-06	1.0704E-05	3.3825E-06	-9.1450E-06	-1.6258E-05	-1.9755E-05	1.9107E-06	-7.1978E-06	1.2361E-05	-1.4874E-05	-1.2798E-06	-3.1081E-06	-3.9732E-06	-4.4681E-06	1.8529E-06	-7.1967E-06	-1.2253E-05	-1.4886E-05
---------	------------	-------------	-------------	-------------	------------	-------------	-------------	------------	------------	-------------	-------------	-------------	------------	-------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	------------	-------------	-------------	-------------

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA SUBRASANTE (Ez3)

$(Ez3) = 1/E1 \cdot (Or2 - Or3)$

(Ez3) =	6.6190E-04	5.9887E-04	5.4290E-04	4.9254E-04	3.0328E-04	2.7408E-04	2.4841E-04	2.2554E-04	6.3610E-04	5.7623E-04	5.2231E-04	4.7291E-04	4.8104E-04	4.3560E-04	3.9467E-04	3.5834E-04	1.2392E-04	1.1199E-04	1.0163E-04	9.2099E-05	4.8129E-04	4.3569E-04	3.9588E-04	3.5821E-04
---------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

CRITERIO DE FALLA PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$N_d = f_d(Ez3)^{-f_s} \cdot (f_s)$ (número de repeticiones de carga permisibles)

Según Compañía Shell:

$f_d = 6.150E-07$
 $f_s = 4.00$

Nd =	3.204E+06	4.781E+06	7.080E+06	1.045E+07	7.269E+07	1.090E+08	1.615E+08	2.377E+08	3.756E+06	5.578E+06	8.263E+06	1.230E+07	1.149E+07	1.708E+07	2.535E+07	3.730E+07	2.608E+09	3.910E+09	5.764E+09	8.548E+09	1.146E+07	1.707E+07	2.504E+07	3.735E+07
------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN EL CONCRETO

$r_0 = \frac{\sigma_{tc}}{\sigma_c}$

σ_c =	464.426	-310.403	-727.611	-952.756	69.808	-251.177	-406.443	-481.941	445.312	-300.218	-700.201	-919.332	321.267	-236.531	-532.71	-691.769	24.047	-103.28	-163.69	-196.123	320.151	-236.402	-528.681	-692.177
σ_r =	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675
r_0 =	0.0955	-0.0638	-0.1496	-0.1959	0.0143	-0.0516	-0.0835	-0.0991	0.0915	-0.0617	-0.1439	-0.1890	0.0660	-0.0486	-0.1095	-0.1422	0.0049	-0.0212	-0.0336	-0.0403	0.0658	-0.0486	-0.1087	-0.1423
	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS	PASADAS
	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	PASADAS	ILIMITADAS	PASADAS	PASADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS	ILIMITADAS

ANÁLISIS DE TRÁFICO

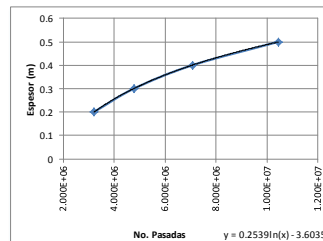
Tránsito esperado = 2,920,000
 Equipo cargado = 2,920,000
 Equipo descargado = 2,920,000

FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA

- 1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.0439 eje sencillo cargado
- 1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.8572 eje tándem cargado
- 1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.2799 eje sencillo dual descargado
- 1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.0012 eje sencillo descargado
- 1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.2802 eje tándem descargado

Equivalencia de carga = 4,269,969.47 ejes sencillos dual cargados

PASADAS TOTALES = 7,189,969 ejes cargados



ESPESOR DISEÑO (m) : 0.4051
 ESPESOR DISEÑO (m) : 0.41

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FINAL:

- Capa rodamiento concreto $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.41
- Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.6
- Capa subbase (m) = 0.4
- Capa subrasante (m) = infinita

EQUIPO: CAMIONES ARTICULADOS (PLANAS)

CAPA DE RODAMIENTO: ADOQUÍN

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Capa	Espesor (m)				Espesor (m)				Espesor (m)			
	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Sup. Rodamiento	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Base	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2
Subbase	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Subrasante	infinita				infinita				infinita			

Módulo Elasticidad (KN/m²)

3,102,641
6,377,650
136,516
103,421

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS (KN/m²)

	EJE SENCILLO (DUAL) CARGADO				EJE SENCILLO CARGADO				EJE TÁNDEM CARGADO				EJE SENCILLO (DUAL) DESCARGADO				EJE SENCILLO DESCARGADO				EJE TÁNDEM DESCARGADO			
σ _{z1}	425.393	393.761	376.902	390.756	313.528	329.493	331.022	331.536	393.202	389.77	371.682	380.651	319.451	344.829	321.515	371.892	144.617	147.429	145.024	142.863	334.314	349.737	328.301	359.966
σ _{z2}	129.627	117.757	109.344	103.848	71.518	68.242	66.597	66.056	125.318	114.282	106.336	101.157	99.965	92.743	87.664	84.764	42.353	43.338	44.871	46.919	100.063	92.764	87.69	84.739
σ _{r1}	741.971	723.111	669.112	615.022	427.434	416.397	392.638	365.538	712.631	698.175	644.991	592.865	545.663	541.918	496.546	467.521	180.241	178.032	165.292	153.547	548.817	543.419	497.922	464.897
σ _{r2}	46.345	38.087	41.443	45.401	28.444	31.774	35.386	39.31	35.125	37.625	40.996	44.958	31.972	34.791	38.268	42.162	24.812	28.406	32.143	35.986	31.971	34.778	38.261	42.17
σ _{r3}	46.369	47.117	49.019	51.712	33.385	35.889	38.848	42.173	45.412	46.313	48.287	51.027	39.74	41.361	43.782	46.766	26.821	30.096	33.553	37.156	39.745	41.36	43.779	46.77

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA (E_{r1})

$(E_{r1}) = 1/2E_1 (\sigma_{r1} - \sigma_{z1})$ NO APLICA

DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA SUBRASANTE (E_{z3})

$(E_{z3}) = 1/E_3 (\sigma_{z2} - \sigma_{r3})$

(E _{z3}) =	8.0504E-04	6.8303E-04	5.8329E-04	5.0411E-04	3.6871E-04	3.1283E-04	2.6831E-04	2.3093E-04	7.7263E-04	6.5720E-04	5.6129E-04	4.8472E-04	5.8233E-04	4.9682E-04	4.2430E-04	3.6741E-04	1.5018E-04	1.2804E-04	1.0944E-04	9.4400E-05	5.8323E-04	4.9703E-04	4.2458E-04	3.6713E-04
----------------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

CRITERIO DE FALLA PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$N_p = f_4 (E_{z3})^4 (f_s)$ (número de repeticiones de carga permisibles)

Según Compañía Shell:

$f_4 = 6.150E-07$
 $f_s = 4.00$

N _p =	1.464E+06	2.826E+06	5.313E+06	9.523E+06	3.327E+07	6.422E+07	1.187E+08	2.163E+08	1.726E+06	3.297E+06	6.196E+06	1.114E+07	5.348E+06	1.009E+07	1.897E+07	3.375E+07	1.205E+09	2.288E+09	4.288E+09	7.744E+09	5.315E+06	1.008E+07	1.892E+07	3.385E+07
Tránsito esperado =	2,920,000																							

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN EL CONCRETO

$r_0 = \frac{\sigma_{z3}}{\sigma'_c}$ NO APLICA

ANÁLISIS DE TRÁFICO

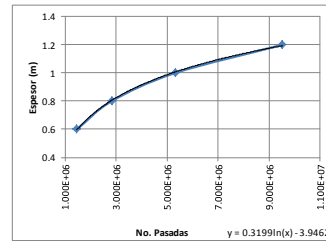
Tránsito esperado = 100% 2,920,000
Equipo cargado = 2,920,000
Equipo descargado = 2,920,000

FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA

1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.0440 eje sencillo cargado
1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.8571 eje tándem cargado
1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.2799 eje sencillo dual descargado
1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.0012 eje sencillo descargado
1 pasada eje sencillo dual cargado = 0.2804 eje tándem descargado

Equivalencia de carga = 4,271,033.13 ejes sencillos dual cargados

PASADAS TOTALES = 7,191,033 ejes cargados



ESPESOR DISEÑO (m) : 1.1045
ESPESOR DISEÑO (m) : 1.11

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FINAL:

Capa rodamiento adoquin-cama arena (m) = 0.13
Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 1.11
Capa subbase (m) = 0.4
Capa subrasante (m) = infinita

EQUIPO: CONTENEDORES

CAPA RODAMIENTO: CONCRETO

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Capa	Espesor (m)			
Sup. Rodamiento	0.1	0.15	0.2	0.3
Base	0.6	0.6	0.6	0.6
Subbase	0.4	0.4	0.4	0.4
Subrasante	infinita			

Módulo Elasticidad
(KN/m²)
27,535,450
6,377,650
136,516
103,421

DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS (KN/m²)

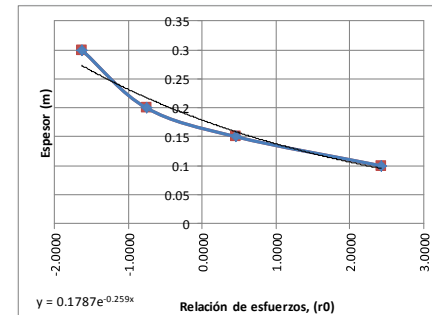
σ _{r1}	11782	2229	-3697	-7965
σ _{r2}	154	150	149	153
σ _{r3}	246	237	231	225

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN LA BASE

$r_0 = \frac{\sigma_{r0}}{\sigma_r}$				
σ _{r0} =	154	150	149	153
σ _r =	2175.549	2175.549	2175.549	2175.549
r ₀ =	0.0708	0.0689	0.0685	0.0703
	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS

CRITERIO DE FALLA POR FATIGA EN EL CONCRETO

$r_0 = \frac{\sigma_{r0}}{\sigma_r}$				
σ _{r0} =	11782	2229	-3697	-7965
σ _r =	4864.675	4864.675	4864.675	4864.675
r ₀ =	2.4220	0.4582	-0.7600	-1.6373
	AUMENTAR PERALTE	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS	PASADAS ILIMITADAS



ESPESOR DISEÑO (m) : 0.1570
ESPESOR DISEÑO (m) : 0.16
ESPESOR RECOMENDADO (m) : 0.18

NOTA: AL ESPESOR DE DISEÑO SE RECOMIENDA AUMENTAR 2 cm DE CONCRETO DEBIDO AL DAÑO QUE PROVOCA AL APILAMIENTO DE CONTENEDORES EN LA SUPERFICIE DE ALMACENAMIENTO (ABRASIÓN).

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FINAL:

Capa rodamiento concreto f' _c =350 kg/cm ² (m) =	0.18
Capa base tratada con cemento f' _c =70 kg/cm ² (m) =	0.6
Capa subbase (m) =	0.4
Capa subrasante (m) =	infinita

TABLA DE RESULTADOS

EQUIPO	CONCRETO	ADOQUÍN
REACH STACKER	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)
	Capa rodamiento concreto $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.30	Capa rodamiento adoquin-cama arena (m) = 0.13
	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.6	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.96
	Capa subbase (m) = 0.4	Capa subbase (m) = 0.4
	Capa subrasante (m) = infinita	Capa subrasante (m) = infinita
GRÚA RTG	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)
	Capa rodamiento concreto $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.41	Capa rodamiento adoquin-cama arena (m) = 0.13
	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.6	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 1.08
	Capa subbase (m) = 0.4	Capa subbase (m) = 0.4
	Capa subrasante (m) = infinita	Capa subrasante (m) = infinita
CAMIONES ARTICULADOS	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)
	Capa rodamiento concreto $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.41	Capa rodamiento adoquin-cama arena (m) = 0.13
	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.6	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 1.11
	Capa subbase (m) = 0.4	Capa subbase (m) = 0.4
	Capa subrasante (m) = infinita	Capa subrasante (m) = infinita
CONTENEDORES	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, (m)
	Capa rodamiento concreto $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.18	Capa rodamiento adoquin-cama arena (m) = 0.13
	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.6	Capa base tratada con cemento $f'c=70 \text{ kg/cm}^2$ (m) = 0.8
	Capa subbase (m) = 0.4	Capa subbase (m) = 0.4
	Capa subrasante (m) = infinita	Capa subrasante (m) = infinita

ANÁLISIS DE COSTOS RELATIVOS

EQUIPO	ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN Y COSTO DIRECTO DE CONSTRUCCIÓN										
	CONCRETO		UNIDAD	COSTO DIRECTO (\$)	ESPESOR (m)	COSTO (\$/m ²)	ADOQUÍN		UNIDAD	COSTO DIRECTO (\$)	ESPESOR (m)
REACH STACKER	Concreto f'c=350 kg/cm ²	m ³	\$ 2,656.55	0.30	\$ 796.97	Adoquin-cama arena	m ²	\$ 411.84	0.13	\$ 411.84	
	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	0.6	\$ 302.58	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	0.96	\$ 484.13	
	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	
	SUMA					\$ 1,197.37	SUMA				
GRÚA RTG	Concreto f'c=350 kg/cm ²	m ³	\$ 2,656.55	0.41	\$ 1,089.19	Adoquin-cama arena	m ²	\$ 411.84	0.13	\$ 411.84	
	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	0.6	\$ 302.58	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	1.08	\$ 544.64	
	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	
	SUMA					\$ 1,489.59	SUMA				
CAMIONES ARTICULADOS	Concreto f'c=350 kg/cm ²	m ³	\$ 2,656.55	0.41	\$ 1,089.19	Adoquin-cama arena	m ²	\$ 411.84	0.13	\$ 411.84	
	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	0.6	\$ 302.58	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	1.11	\$ 559.77	
	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	
	SUMA					\$ 1,489.59	SUMA				
CONTENEDORES	Concreto f'c=350 kg/cm ²	m ³	\$ 2,656.55	0.18	\$ 478.18	Adoquin-cama arena	m ²	\$ 411.84	0.13	\$ 411.84	
	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	0.6	\$ 302.58	Base tratada f'c=70 kg/cm ²	m ³	\$ 504.30	0.8	\$ 403.44	
	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	Capa subbase	m ³	\$ 244.55	0.4	\$ 97.82	
	SUMA					\$ 878.58	SUMA				

IV.4 Análisis de resultados

Las diferentes estructuras de pavimento analizadas, tanto concreto como adoquín, presentan un comportamiento adecuado ante las solicitaciones que actúan sobre ellas. Tales solicitaciones son de una magnitud considerable en valores superiores a 6.32 kg/cm^2 en la condición más favorable y de 10.19 kg/cm^2 en la más desfavorable. Para que la distribución de esfuerzos sea aceptable en el terreno de cimentación es necesario rigidizar la estructura del pavimento. Debido a esta condicionante, es necesario emplear una base tratada con cemento; solamente con esta condición se logra una correcta distribución de esfuerzos tanto en el pavimento como en el terreno.

Para el análisis de estructura de pavimento con capa de rodamiento con concreto hidráulico se fijó el espesor de la base hidráulica como constante para tener una sola variable independiente. De la misma manera se procedió con la estructura de pavimento con adoquín, donde la variable independiente fue el espesor de la base tratada con cemento. Para ambas estructuras se consideró una capa subbase de 40 cm de espesor con fines de capa de transición y drenante.

De los tres equipos portuarios analizados, cargador Reach Stacker, grúa RTG y camiones articulados; se obtienen diversas estructuras de pavimento ya sea con concreto o con adoquín. A continuación se muestra un análisis de los resultados obtenidos.

IV.4.1 Equipo cargador Reach Stacker

Para un cierto número de pasadas de este equipo, la estructura de pavimento con concreto hidráulico es de 1.30 m mientras que la de pavimento con adoquín es de 1.49 m. Se observa que mientras más grande sea el espesor de la capa base, se tendrá un mejor desempeño de la estructura de pavimento, es decir, la magnitud del esfuerzo en la capa subrasante se ve disminuida debido al incremento en el espesor de la capa base con la que se ensayó.

En términos económicos, la capa de rodamiento en la estructura de concreto en comparación con la de adoquín aumenta el costo directo de construcción en un 20.5 %; esto se debe en gran medida al espesor de 30 cm de concreto que se debe colocar en la estructura del pavimento.

IV.4.2 Equipo grúa RTG

Para este equipo portuario se obtuvo una estructura de pavimento de 1.41 m para superficie de rodamiento con concreto hidráulico y un espesor de 1.61 m para pavimento con adoquín. Debido a la mayor superficie de contacto de los

neumáticos con el pavimento, así como la presión de inflado de los mismos, se obtiene una estructura de pavimento más robusta (41 cm de espesor de concreto).

Aunque la estructura de pavimento a base de concreto es de menor magnitud que la del pavimento de adoquín, este no es un factor decisivo para su elección ya que una capa de concreto de 41 cm y 60 cm de base tratada con cemento es más costosa en comparación con la capa de adoquín de 13 cm con una base tratada de 108 cm. La relación de costo indica que es de un 42.3% más costosa la estructura a base de concreto en comparación con la de adoquín.

IV.4.3 Equipo camiones articulados

El tránsito esperado de los camiones articulados genera un espesor considerable en la estructura del pavimento, ya que se obtiene un espesor de 41 cm de concreto hidráulico y 60 cm de base tratada con cemento contra 13 cm de adoquín con 111 cm de base tratada.

El camión analizado fue un T2-S2 con un número aproximado de 2,920,000 pasadas. La estructura de pavimento fue similar a la obtenida en el análisis del pavimento con grúa RTG, lo que es un indicativo que el tránsito de estos equipos provoca un daño similar al de una grúa en el mismo lapso de tiempo (vida útil).

Aunque la estructura del pavimento de concreto es de 1.41 m y la del adoquín es de 1.64 m, el costo directo de construcción entre ambas alternativas es de un 39.3% de diferencia a favor de la estructura de adoquín.

IV.4.4 Contenedores

El análisis del pavimento en zona de estiba de contenedores se basó en un criterio de resistencia a la flexión en el concreto, debido a que la carga se estimó como estática y no existen repeticiones de carga que deterioren por fatiga la capa subrasante; de esta manera se fijó un espesor de capa base constante de 60 cm y se determinó el espesor de la capa de concreto fundamentándose en la relación de esfuerzos permisibles.

Como el criterio de diseño se realizó considerando esfuerzos permisibles en la capa de rodamiento, no es posible realizar un diseño empleando adoquines debido a que éstos no permiten que se desarrolle una relación de esfuerzos, dado que por la disposición y geometría de los adoquines, al momento de su colocación, ya se encuentran “prefabricados”. El criterio adoptado para determinar el espesor de la estructura de pavimento con adoquines fue aquel en donde se distribuyeran los esfuerzos en la masa del suelo y ya no se reflejaran considerablemente en la masa de soporte; el espesor de base tratada obtenido fue de 80 cm.

El espesor de la estructura a base de concreto fue de 1.18 m, de los cuales 0.18 m conforman la capa de concreto, mientras que la estructura de adoquín fue de 1.33 m. En este caso el análisis de costo directo, éste es a favor del concreto ya que representa una opción 3.8% más económica. El ahorro observado se debe a que el espesor de la capa de concreto es de 18 cm; en caso de aumentar el espesor de la capa de concreto se incrementa el costo. Con un espesor de concreto de 19.3 cm se igualan los costos directos de construcción entre ambas alternativas.

Para todos los equipos analizados se obtuvieron las respectivas gráficas de diseño, las cuales, por involucrar las variables de *espesor de la estructura contra No. de pasadas* son de utilidad y prácticos, porque de esta manera solamente será necesario conocer el análisis de tránsito para determinar con ayuda de la gráfica el espesor de la estructura del pavimento.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

V.1 Conclusiones

- Dentro de las necesidades existentes para el desarrollo portuario del país se encuentran las obras de pavimentación para la operación y almacenamiento, las cuales tienen por objetivo garantizar un adecuado comportamiento estructural ante las sollicitaciones aplicadas. Actualmente México cuenta con puertos que compiten, por su eficiencia en la operación de contenedores, con puertos líderes en el mundo, sin embargo, aun es necesario afinar la metodología de diseño para la estructuración de los pavimentos.
- En esta tesis se aborda la infraestructura portuaria referente a las áreas de almacenamiento y a las vialidades internas, las cuales por estar en constante dinámica operativa llegan a presentar falla estructural o de servicio.
- Generalmente, los métodos de diseño comunes son los de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para vías terrestres y los de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para terminales aéreas; sin embargo, no existe una metodología adecuada para el diseño de terminales portuarias que tome en cuenta el tipo de equipo (grúas y cargadores) y el daño que producen en una estructura de pavimento.
- Basados en la teoría elástica de tres capas se presenta una metodología de análisis para determinar las variables de esfuerzo-deformación en una estructura de pavimentación debido a la presencia de cargas aplicadas por un equipo portuario. Posteriormente se asocia el número de repeticiones admisibles con los esfuerzos y deformaciones que se presentan en puntos críticos de la sección estructural de un pavimento. Para deformación permanente en la parte superior de las terracerías se toma la deformación unitaria en compresión máxima, ϵ_c . El cálculo de esta deformación supone un comportamiento elástico de los materiales, lo que es válido en pavimentos ya que los niveles de esfuerzo que se generan al paso de las cargas de los equipos son inferiores a la resistencia al esfuerzo cortante.

Los módulos elásticos que se utilizan deben ser, sin embargo, obtenidos en ensaye de carga cíclica. Los procedimientos de ensaye para la obtención de los módulos elásticos en materiales tratados con cemento y módulos resilientes en suelos compactados y materiales granulares, están todos normalizados.

- Con la metodología seguida, los espesores que se obtienen en la estructura del pavimento son de magnitud robusta debido a las sollicitaciones actuantes; sin embargo, es necesario rigidizar y robustecer la estructura para permitir una distribución de esfuerzos tal que no sea perjudicial para la capa subrasante. Las gráficas de diseño obtenidas como resultado permiten conocer una lectura de espesor de la estructura contra el número de pasadas; de esta manera es posible determinar el espesor de la estructura con solo conocer el tránsito esperado del equipo en análisis en determinada cantidad de años.
- La estructura de pavimento de adoquín, en comparación con la estructura de concreto, es una opción más factible, ya que presenta un desempeño similar ante las sollicitaciones de carga y además presenta ventajas económicas, constructivas y de control de calidad.
- En ambas opciones de estructuración se debe poner énfasis tanto en las variables de diseño como las variables de construcción, ya que ambas afectan el comportamiento final de un pavimento; un descuido en estas variables puede verse reflejado en la falla estructural de dicho pavimento.
- La metodología presentada aborda las principales variables de diseño para una estructura de pavimento; sin embargo, es posible mejorar el modelo con observaciones de desempeño, por ejemplo, con correlaciones empíricas. Tomar en consideración el mayor número de variables favorece la confiabilidad del método de diseño.
- El presente trabajo deja abierta la línea de investigación para su complemento y afine en áreas específicas como las siguientes:
 - Se tiene la necesidad de contar con una aforo interno en las terminales que reduzcan la incertidumbre existente en la actualidad, ya que solo se cuenta con un número aproximado de pasadas de los equipos y este número es un estimado de lo que los operadores portuarios reportan. Un estudio más a detalle puede afinar el método de diseño ya que el análisis de tránsito es una variable que presenta sensibilidad considerable.
 - Se debe de conocer con mayor detalle el peso de los contenedores apilados, ya que se puede aplicar un factor de reducción de carga si se conoce el porcentaje de carga que tiene cada contenedor.
 - Se debe de plantear el desgaste que produce la actividad de los neumáticos (frenado y giro) sobre la capa de rodadura.
 - Se debe de conocer el desempeño de un pavimento con diferentes panoramas de drenaje; así mismo, en el caso de pavimentos de concreto, el comportamiento con elementos estructurales como pasajuntas.

Finalmente se puede concluir que se han cumplido los objetivos planteados, y se ha generado un documento que servirá de apoyo para los profesionistas relacionados y comprometidos con el desarrollo de la infraestructura portuaria del país.

V.2 Recomendaciones

Las recomendaciones propuestas se derivan por la presencia de fallas en las obras viales en la República Mexicana. Las fallas de los pavimentos flexibles y semi-flexibles pueden dividirse en tres grupos fundamentales.

- 1) Fallas por insuficiencia estructural.
Se produce cuando las combinaciones de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y los respectivos espesores no son los adecuados para que se establezca un mecanismo de resistencia apropiado.
- 2) Fallas por defectos constructivos.
Se trata de pavimentos en cuya construcción se han producido errores o defectos que comprometen el comportamiento conjunto.
- 3) Fallas por fatiga.
Se trata de pavimentos que por la continua repetición de las cargas del tránsito sufrieron efectos de degradación estructural, pérdida de resistencia y deformación acumulada.

Las fallas en los pavimentos rígidos pueden deberse a dos causas principales. La primera se debe a deficiencias de la propia losa y comprende por un lado defectos del concreto propiamente dicho, y por otro lado, defectos de construcción o de insuficiencia estructural de la losa.

La otra causa principal de falla en los pavimentos rígidos se refiere al inadecuado comportamiento estructural del conjunto losa, subbase, subrasante y terreno de cimentación.

Frecuentemente las fallas obedecen a una combinación de causas, antes que a una sola, de manera que los problemas de diagnóstico y corrección se hacen complicados.

El tipo de las fallas que se presentan con mayor frecuencia en las obras viales de la República Mexicana se manifiestan con agrietamiento y deformación permanente a causa del exceso de carga (insuficiencia estructural) y repetición de carga (fatiga).

Para mitigar la manifestación de fallas en la estructura de un pavimento se recomienda tener en consideración los aspectos referentes a pavimentos con carpeta de rodamiento de concreto y adoquín que se mencionan en el apartado *IV.3 Aspectos complementarios al diseño* del capítulo anterior

Bibliografía

- Abualtayef, M. et al.** “Sensitivity Analysis of Heavy Pavement Design for a Container Terminal Area, Case Study: Port of Gaza, Palestine”. Journal of Applied Sciences., 7. 2007.
- American Concrete Institute** “Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 310S-05) y Comentario (ACI 318SR-05)” Comité ACI 318. American Concrete Institute, USA, 2005.
- Arnal Simón, Luis, y Betancourt Suárez, Max** "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal". Editorial Trillas. México, 2010.
- Bowles, J. E.** “Foundation Analysis and Design”. Mc Graw Hill, USA, 1968.
- Cemex Concretos S.A. de C.V.** “Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos”. Cemex Concretos S.A. de C.V., México, 2000.
- Coronado Iturbe, Jorge** “Manual Centroamericano Para Diseño de Pavimentos”. Agencia de los Estados Unidos para el desarrollo Internacional. Secretaria de Integración Económica Centroamericana. Guatemala, 2002.
- Corro Caballero, Santiago** “Estudios de Comportamiento para el Diseño de Pavimentos Flexibles”. Instituto de Ingeniería, UNAM. 1960.
- Corro C., Santiago, y Prado O., Guillermo** “Diseño Estructural de Carreteras con Pavimento Flexible”. Instituto de Ingeniería, UNAM, 1974.
- “Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos, Incluyendo Carreteras de Altas Especificaciones”. Instituto de Ingeniería, UNAM, 1999.
- Corro Caballero, Santiago et al** “Instructivo para Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras”. Instituto de Ingeniería, UNAM, 1981.

- Defence-Estate Organisation** “Roads for Tracked Vehicles”. Defence Works Functional Standard. Design and Maintenance Guide 01. Ministry of Defence, London, 1996.
- Díaz-Rodríguez, Jorge Abraham** Apuntes de la cátedra “Propiedades de los Suelos”. Posgrado de Ingeniería, UNAM. 2009.
- Finney, Edwin A.** “Better Concrete Pavement Serviceability”. American Concrete Institute, Monograph No. 7. Michigan. 1973.
- Garnica Anguas, Paul y Gómez López, José Antonio** “Deformaciones Permanentes en Materiales Granulares para la Sección Estructural de Carreteras”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 176. Sanfandila, Qro. 2001.
- Garnica Anguas, Paul, et al.** “Mecánica de Materiales para Pavimentos”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 197. Sanfandila, Qro. 2002.
- “Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 142. Sanfandila, Qro. 2000.
- Gillespie, Thomas D. y Karamihas, Steve M.** “Heavy Truck Properties Significant to Pavement Damage”. Vehicle-Road Interaction, ASTM SPT 1225, B. T. Kulakowski, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia. 1994.
- Huang, Yang, H** “Pavement Analysis and Design”. Editorial Prentice Hall Inc. New Jersey, USA. 1993.
- Kazimiers Jan, Osicki, et al.** “Guía sobre Especificaciones y Características Técnicas de Grúas Pórtico, para Patio de Contenedores”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 81. Sanfandila, Qro. 1995.

- López Ramos, Ernesto.** “Geología General y de México”. Editorial Trillas. México, 1993 (reimp. 2008).
- Lozano Guzmán, Alejandro, et al.** “Aspectos de la Dinámica de Vehículos Pesados y su Relación con el Daño a Pavimentos”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 119. Sanfandila, Qro. 1999.
- Minaya G., Silene, y Ordóñez H., Abel** “Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos”. Instituto de Construcción y Gerencia. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú, 2006.
- Rico Rodriguez, Alfonso, et al.** “Pavimento Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 104. Sanfandila, Qro. 1998.
- Romero Navarrete, José Antonio, et al.** “Modelado de la Interacción Carga Sólida – Vehículo”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 189. Sanfandila, Qro. 2002.
- “Estudio de la Distribución Espacial del Daño a Pavimentos causado por Vehículos Pesados”. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 190. Sanfandila, Qro. 2002.
- Salazar Rodríguez, Aurelio.** “Guía para el Diseño y Construcción de Pavimentos Rígidos”. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México, 1998.
- Sosa Garrido, Roberto.** Apuntes de la cátedra “Estructura de pavimentos”. Posgrado de Ingeniería, UNAM. 2010.
- Timoshenko, S. y Goodier, J. N.** “Teoría de la elasticidad”. Editorial Urmo, S. A. de ediciones. España, 1975.
- Yoder, E. J., y Witczak, M. W.** “Principles of Pavement Design”. Editorial John Wiley & Sons, Inc. USA.1975.

Páginas electrónicas consultadas:

http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/U_DGP/estadisticas/2010/Anuario/index.htm

<http://www.cmec-hb.com/product/CRS450ABZ5-Container-Reach-Stacker.html>

<http://www.taylorbigred.com/TS-Reach-Stackers.html>

<http://www.siglobal.org/espanol/divportuaria-seccion.php?sec=2>

<http://www.duratread.com>

<http://www.continentaltire.com.mx/>

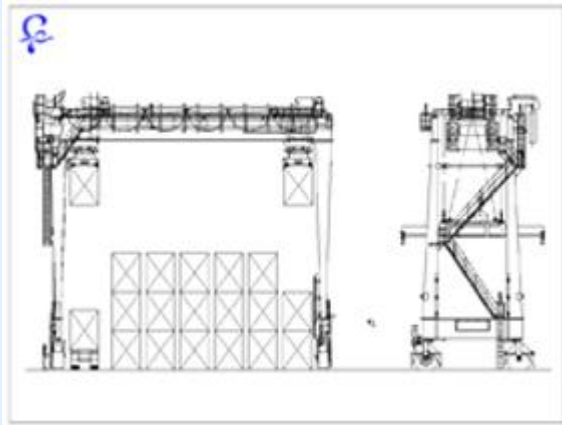
**ANEXO 1
ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS**



Especificaciones de grúas RTG

Fuente : <http://www.siglobal.org/espanol/divportuaria-seccion.php?sec=2>

4 RUEDAS



DIMENSIONES PRINCIPALES:

- Distancia entre ejes rueda: 22.55-28,49 m
- Libre interior: 21.23-27.17 m
- Altura bajo spreader: 15.26-17.94m
- Recorrido del carro: 18.20-24.06m

CARGA NOMINAL: 40T.

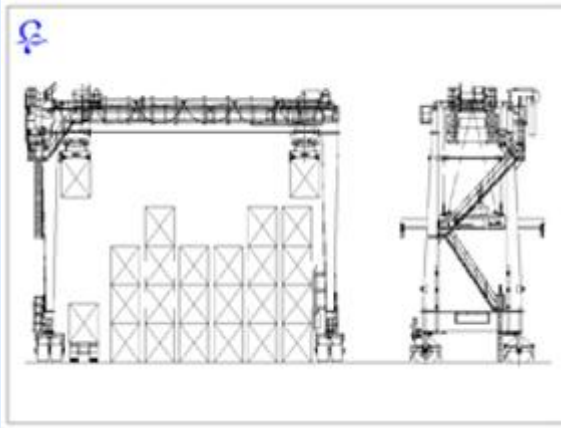
SPREADER: 20-40-45 Ft.

VELOCIDADES:

- . Elevación a plena carga: 15-18 m/min
- Elevación sin carga: 23/m/min
- Carro: 70 m/min
- . Pórtico: 125m/min



8 RUEDAS



DIMENSIONES PRINCIPALES:

- Distancia entre ejes rueda: 23.09-28,95 m
- Libre interior: 21.36-27.22 m
- Altura bajo spreader: 15.24-17.94m
- Recorrido del carro: 18.20-24.06m

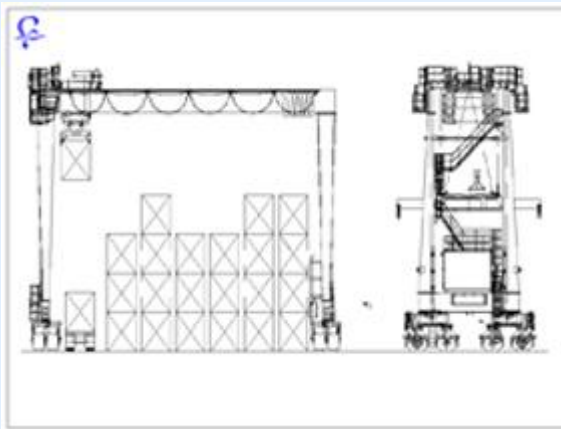
CARGA NOMINAL: 40T.

SPREADER: 20-40-45 Ft.

VELOCIDADES:

- . Elevación a plena carga: 15-18 m/min
- Elevación sin carga: 23/m/min
- Carro: 70 m/min
- . Pórtico: 135m/min

16 RUEDAS



DIMENSIONES PRINCIPALES:

- Distancia entre ejes rueda: 23.65-26,45 m
- Libre interior: 21.50-23.95 m



· Altura bajo spreader: 15.00-18.00m

· Recorrido del carro: 20.75m

CARGA NOMINAL: 40T.

SPREADER: 20-40-45 Ft.

VELOCIDADES:

. Elevación a plena carga: 15-18 m/min

· Elevación sin carga: 23/m/min

· Carro: 70 m/min

. Pórtico: 125m/min

Especificaciones para vehículos de carga
Fuente :MB Desarrollos Integrales, S.C.

Equipo	Información requerida	
1. Grúa de Pórtico	Peso vacío de grúa	210 toneladas
	Ancho de operación (o carril)	23.47 m
	Espaciamiento de llantas (o arreglo)	2.5m – 3.9m – 2.5m. por eje
	No de pasadas estimadas durante la vida de proyecto	250,000 por el mismo punto en 25 años (carga simple de 4.96 ton)
	CBR de los suelos (determinado a partir del estudio de suelos)	CBR = 12 % Estimado
2. Reach Stacker	Peso vacío del equipo	99.3 ton
	CBR	12 %
	Espaciamiento de llantas (o arreglo)	4 llantas frontales con 4.5 m de distancia entre llantas extremas.
	Porcentaje de cargas en el eje delantero y en el eje trasero caso del Reach Stacker	88% delanteras 12% traseras
	Nº de pasadas diarias por un mismo punto (estimado)	16
	Pasadas por año del equipo	10,000 (Cargado)
3. Camión Pesado	Nº de pasadas estimadas por día (o de operación)	400
	Peso de cada uno de los ejes	6.63 ton eje delantero del truck, 11.2 ton eje trasero del truck, 18.75 por cada uno de los dos ejes traseros del chasis.



Especificación del cargador Reach Stacker

Fuente: <http://www.cmec-hb.com/product/CRS450ABZ5-Container-Reach-Stacker.html>

Modelo: CRS450ABZ5

Item				Unit	Data
Rated capacity	Distance from 1st row	1900mm	5CRS	Kg	31000
			4CRS		45000
		3850mm	4CRS		31000
		6350mm	3CRS		15000
Max lifting height				mm	14850
Min ground clearance				mm	400
Min turning radius				mm	8200
Lifting speed (unload/load)				mm/s	380/240
Lowering speed (unload/load)				mm/s	300/250
Traveling speed (Unload)	Forward /backward	1 shift		Km/h	4/4
		2 shift			9/9
		3 shift			16/16
		4 shift			25/25
Max. gradient(unload/load)				%	30/15
Brake distance	Unload 20Km/h			m	<7
	Load 20Km/h				<3.5
Beam	Max. Angle			deg	60
	Max. Spread			mm	6800
Service weight				Kg	73000
Tyre	Model	Front		MPa	18.00-25-40PR
		Rear			18.00-25-40PR
	Air pres	Front			0.90
		Rear			0.90
Engine	Type				M11-C330
	Manufacturer				CUMMINS
	Displacement			cc	10800
	Rated output			Kw/RPM	246/2100
	Max. Torque			N.m/RPM	1458/1300
Transmission box	Type				14.7HR36432 fixed shaft
	Manufacturer				DANA
	Shift type				APC72 Auto-electric control gear shift
	Gear shift				Forward 4/back 4



	Speed ratio (F/R)		1st shift	5.814/5.814
			2nd shift	2.422/2.422
			3rd shift	1.379/1.379
			4th shift	0.784/0.784
Driving axle	Manufacturer		KESSLER+CO	
	Model		D102 PL341/528-NLB8460	
	Speed ratio	Total	26,35	
	Parking brake		Forcipated brake	
	Service brake		Oil-cooled multi-disc brake	
Spreader	Model		817	
	Manufacturer		ELME	
	Max. capacity		Kg	45000
	Shift distance		mm	800
	Rotation		'	+95/-185
	Suitability		20"-40"international Standard heavy container	
Steering Axle	Type		Tran sward-cylinder axle	
Hydraulic system	Pump	(PARKER) PAVC100B38R2A22 (PARKER) PAVC100B38R29A4A+GP2AND30AS		
	Valve	Initial valve	(PARKER) X104920	
		Main steering valve	(PARKER) M400LS-012	
		Balance valve set	(PARKER) 91217414	
Electric system	Working handle		(PARKER) IQAN-LL-4N5T	
	Control-indi module		(PARKER) IQAN-MDM	
	Length sensor		(PARKER) SL3010-PK1025MU/GS130	
	Angle sensor		(PARKER)530260 /414307	
	Presure sensor		(PARKER)5020003	
	others		Include control module joint insert are all ELME (PARKER)	



ANEXO 2
ESPECIFICACIONES DE LOS NEUMÁTICOS



Parte 1. Neumáticos para Grúa RTG y cargador Reach Stacker
 Fuente: <http://www.duratread.com>

Neumáticos OTR Duratread

Información Técnica



Neumáticos OTR Duratread para Camiones, Cargadores, Volquetes y Vehículos Portuarios

Construidos y producidos bajo los estándares más altos de calidad, los Neumáticos OTR Duratread proporcionan una vida máxima al neumático utilizando caucho formulado especialmente para las pisadas en la minería.

Las fábricas de Duratread tienen muchos años de experiencia en OTR y hacen productos confiables, duraderos y que aseguran que su compra vale la pena.

Características

- » Carcasas de nylon de equipo pesado para mayor resistencia contra daños y capacidad adicional de carga
- » Grado de compuestos OTR y para Minería resistente a cortes.
- » Modelos de pisada específicamente diseñados para usos especiales
- » Aprobados por ISO 9001:2000 y Oficina de Estándares de Calidad Japonesa (JIS)

Gama de Neumáticos



E3

E4

E4

E4

G2/L2 R4

L5

L5S

Logística

Duratread tiene extensa experiencia en operaciones logísticas y manejo de procesos completos desde la fábrica hasta el destino final, manteniendo a los clientes completamente informados de sus pedidos y embarques.

Cuidado y Gerenciamiento de Neumáticos

Duratread es parte del grupo de compañías de Team Group quienes mercadean y venden Neumáticos OTR y productos relacionados con los neumáticos y servicios a los clientes alrededor del mundo. Además de proveer y abastecer neumáticos OTR duraderos y de alta calidad, también ofrecemos productos complementarios de valor agregado a los neumáticos OTR como Tyre Protector, herramientas para el mantenimiento de neumáticos y un sistema para el gerenciamiento de neumáticos.

Garantía y Servicio

Todos los neumáticos Duratread están cubiertos por nuestra garantía respaldada de fábrica. Personal local está disponible para visitar a los usuarios, consejos en las aplicaciones, y asegurar que los neumáticos funcionen en la aplicación para la que fueron diseñados.

Nuestra meta es ayudarlo a maximizar la vida de los neumáticos y minimizar el tiempo de baja en sus vehículos para darle el uso más eficiente a los neumáticos.

www.duratread.com

DURATread®



Neumáticos OTR Duratread

Información Técnica

Duratread G2 L2 / R4													
Aro	Medida	Diseño	Lonaje	Pisada TRA	TT / TL	Ancho de Aro	Capacidad de Carga (Kg @ PSI)		mm	Diámetro 1.5%	Ancho de Sección	Prof. de Pisada	
							40 Km/h	10 Km/h					
24	13.00-24	Grader 200	12 PR	G2/L2	TL	8.00	2725 @ 44	5600 @ 65	mm	1280	330	24	
									in/32nd	50.4	13.0	30/32	
									mm	1350	360	24	
	14.00-24	Grader 200	16 PR	G2/L2	TL	8.00	3650 @ 51	7300 @ 80	in/32nd	53.1	14.2	30/32	
	19.5L-24	Tractor 401	14 PR	R4	TL	16.00	2600 @ 36	TBA	mm	1314	445	29	
									in/32nd	51.7	17.5	37/32	
Duratread E3													
Aro	Medida	Diseño	Lonaje	Pisada TRA	TT / TL	Ancho de Aro	Capacidad de Carga (Kg @ PSI)		mm	Diámetro 1.5%	Ancho de Sección	Prof. de Pisada	
							50 Km/h	10 Km/h					
24	14.00-24	OTR 530	28 PR	E3	TT	10.00	5600 @ 94	10300 @ 142	mm	1340	375	27.5	
									in/32nd	52.8	14.8	34/32	
25	16.00-25	OTR 530	32 PR	E3	TL	11.25 / 2.0	7300 @ 94	12500 @ 127	mm	1485	440	35.5	
									in/32nd	58.5	17.3	44/32	
		17.5-25	OTR 530	16 PR	E3/L3	TL	14.00 / 1.5	4250 @ 44	7300 @ 69	mm	1350	450	26
									in/32nd	53.1	17.7	33/32	
		20.5-25	OTR 530	20 PR	E3/L3	TL	17.00 / 2.0	6000 @ 47	9500 @ 65	mm	1470	540	30
									in/32nd	57.9	21.3	38/32	
		23.5-25	OTR 530	20 PR	E3/L3	TL	19.50 / 2.5	7300 @ 44	10900 @ 54	mm	1600	590	35
35	26.5-25	OTR 530	32 PR	E3/L3	TL	22.00 / 3.0	10000 @ TBA	17000 @ 80	in/32nd	63	23.2	44/32	
									mm	1750	691	35	
		29.5-25	OTR 590	34 PR	E3/L3	TL	25.00 / 3.5	13200 @ 58	20000 @ 76	in/32nd	68.9	27.2	44/32
									mm	1892	798	40	
		37.25-35	Rock Haul 300	36 PR	E3	TL	31.00	19500 @ 47	30750 @ 65	in/32nd	74.5	31.4	50/32
									mm	2389	946	47	
									in/32nd	94	37	59/32	
Duratread E4 / IND4													
20	12.00-20	OTR 530D	18 PR	E4	TT	8.50	3300 @ 107	TBA	mm	1140	315	24	
									in/32nd	44.9	12.4	30/32	
		12.00-20	OTR 550	24 PR	E4	TT	8.50	4050 @ 122	6150 @ 120	mm	1150	315	30
24	12.00-24	OTR 530D	20 PR	E4	TT	8.50	3650 @ 80	6900 @ 120	in/32nd	45.3	12.4	38/32	
									mm	1235	315	26	
		12.00-24	OTR 550	24 PR	E4	TT	8.50	4050 @ 94	6900 @ TBA	in/32nd	48.6	12.4	33/32
25									mm	1255	315	33	
									in/32nd	49.4	12.4	42/32	
	18.00-25	OTR 530	40 PR	IND4	TL	13.00 / 2.5	9750 @ 102	17000 @ 138	mm	1635	498	48	
33	18.00-33	OTR 540	36 PR	E4	TL	13.00 / 2.5	10600 @ 91	TBA	in/32nd	64.4	19.6	60/32	
									mm	1875	512	54	
									in/32nd	73.8	20.2	68/32	
Duratread L5 / L5S													
25	18.00-25	Rock Load 500S	32 PR	L5S	TL	13.00	TBA	15000 @ 109	mm	1671	495	78	
									in/32nd	65.8	19.5	98/32	
29	29.5-29	Rock Load 500	34 PR	L5	TL	25.00	14000 @ 58	21200 @ 76	mm	2023	749	95	
									in/32nd	79.6	29.5	120/32	
33	35/65-33	Rock Load 500	42 PR	L5	TL	28.00	TBA	25750 @ 86	mm	2077	890	95	
									in/32nd	81.8	35	120/32	



* Las presiones de aire pueden variar dependiendo de la carga y velocidad aplicada.



* Para mayor información visite nuestra página web www.duratread.com

Parte 2. Neumáticos para camiones articulados (Planas).

Fuente: <http://www.continentaltire.com.mx/>



Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HDL Eco Plus	Tracción 
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	22.2	1062	282	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	22.2	1117	282	3250	120	3000	120		
275/80 R22.5	H	8.25	22.2	1036	279	3150	120	2800	120		
285/75 R24.5	H	8.25	22.2	1066	272	3075	120	2800	120		
305/75 R24.5	H	9.00	22.2	1066	307	3550	120	3150	120		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HDL2 DL	Tracción 
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	25.4	1062	287	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	25.4	1113	287	3250	120	3000	120		
275/80 R22.5	G	8.25	25.4	1031	292	2800	110	2575	100		
285/75 R24.5	G	8.25	25.4	1064	284	2800	110	2575	100		



Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HDL2 DL Eco Plus Tracción	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
275/80 R22.5	G	8.25	25.4	1031	292	2800	110	2575	100		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HDC Tracción	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	23.8	1074	282	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	23.8	1125	282	3250	120	3000	120		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HDO Tracción	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	23.8	1072	280	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	23.8	1124	280	3250	120	3000	120		



Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HDR	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
245/70 R19.5	H	6.75	15.87	846	240	2240	115	2120	115		
265/70 R19.5	H	7.50	15.87	881	254	2725	120	2575	120		
285/70 R19.5	H	8.25	16.6	895	279	2900	125	2725	125		
12 R 22.5	H	9.00	20.63	1084	292	3350	120	3150	120		
255/70 R22.5	H	7.5	20.6	930	255	2500	120	2300	120		
275/70 R22.5	H	8.25	17.4	961	270	2995	120	2725	120		
315/80 R22.5	J	9.00	20.63	1086	328	4000	130	3350	130		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HDR	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
225/70 R19.5	G	6.75	14.3	810	221	1650	95	1550	95		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSL 2	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	15	1052	282	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	15	1102	282	3250	120	3000	120		
275/80 R22.5	H	8.25	15	1019	287	3150	120	2800	120		
285/75 R24.5	H	8.25	15	1052	98	3075	120	2800	120		



Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSL1 Coach Dirección	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
315/80 R22.5	J	9.00	15.8	1076	312	4000	130	3350	130		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSR2 Toda Posición	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	18.3	1057	282	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	18.3	1105	282	3250	120	3000	120		
275/80 R22.5	H	8.25	18.3	1016	282	3150	120	2800	120		
285/75 R24.5	H	8.25	18.3	1049	272	3075	120	2800	120		
315/80 R22.5	L	9.00	15.0	1076	312	4125	130	3750	130		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSR2 SA Toda Posición	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
275/80 R22.5	H	8.25	16	1016	320	3150	120	2800	120		
295/80 R22.5	H	9.00	16	1052	335	3350	120	3000	120		



Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSR-1 Toda Posición	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
245/70 R19.5	H	6.75	12.7	846	249	2240	125	2120	125		
255/70 R22.5	H	7.50	13.9	930	274	2500	120	2300	120		
275/70 R22.5	H	8.25	14.3	973	276	3150	130	2900	130		
295/80 R22.5	H	9.00	14.3	1052	305	3350	120	3000	120		
315/80 R22.5	J	9.00	14.3	1072	312	4000	130	3350	130		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSR Dirección	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
225/70 R19.5	G	6.75	12.7	813	221	1650	95	1550	95		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSC Toda Posición	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	18.3	1062	282	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	18.3	1113	282	3250	120	3000	120		
12 R 22.5	H	9.00	18.3	1090	315	3350	120	3075	120		
12 R 24.5	H	9.00	18.3	1144	315	3550	120	3250	120		




Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSU Toda Posición	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	H	8.25	18.3	1057	282	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	H	8.25	18.3	1105	282	3250	120	3000	120		
305/75 R24.5	J	9.00	18.3	1066	272	3750	125	3250	125		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HSU2 Toda Posición	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
315/80 R22.5	L	9.00	20.6	1093	316	4540	130	4125	130		

Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HTL Remolque	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
11 R 22.5	G	8.25	10.3	1011	277	2800	105	2650	105		
11 R 22.5	H	8.25	10.3	1011	277	3000	120	2725	120		
11 R 24.5	G	8.25	10.3	1092	282	3000	105	2725	105		
275/80 R22.5	G	8.25	10.3	1044	282	2800	110	2575	100		
285/75 R24.5	G	8.25	10.3	1044	277	2800	110	2575	110		



Medida	Rango de Carga	Ancho de Rin (mms.)	Prof. de piso (mms.)	Diam. Ext. (mms.)	Ancho de Secc. (mms.)	Tablas y Presiones Max.				HTC1 Toda Posición	
						Sencillo (Kgs.)	Sencillo (Libras)	Dual (Kgs.)	Dual (Libras)		
385/65 R22.5	L	11.75	18.3	1067	376	4250	130	N.A.	0		
425/65 R22.5	L	12.25	18.3	1150	454	5000	120	N.A.	0		
445/65 R22.5	L	13.0	18.3	1150	454	5600	120	N.A.	0		



ANEXO 3
NORMAS SCT PARA PAVIMENTOS



N-CMT-1-01/02

LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PARTE: 1. MATERIALES PARA TERRACERÍAS

TÍTULO: 01. Materiales para Terraplén

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad de los materiales que se utilicen en la construcción de terraplenes.

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Los materiales para terraplén son suelos y fragmentos de roca, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar el cuerpo de un terraplén hasta el nivel de desplante de la capa subyacente.

La clasificación de los suelos y fragmentos a que se refiere esta Norma, se describe en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

MANUALES	DESIGNACIÓN
Muestreo de Materiales para Terracerías	M-MMP-1-01
Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos	M-MMP-1-02
Contenido de Agua	M-MMP-1-04
Límites de Consistencia	M-MMP-1-07
Compactación AASHTO	M-MMP-1-09
Grado de Compactación	M-MMP-1-10
Valor Soporte de California (CBR) y Expansión en Laboratorio	M-MMP-1-11

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-1-01/02

D. REQUISITOS DE CALIDAD

Los materiales que se utilicen para la formación de terraplenes cumplirán con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt), ni materiales producto de despalmes.

TABLA 1.- Requisitos de calidad de materiales para terraplén

Característica	Valor
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] , %, mínimo	5
Expansión; %, máxima	5
Grado de compactación ^[2] , %	90 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa. Cuando el material sea no compactable, de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*, se colocará en capas del espesor mínimo que permita el tamaño máximo del material y se bandeará, previa aplicación de un riego de agua a razón de 150 L/m², dando como mínimo tres pasadas en toda la superficie en cada capa, con un tractor de 36,7 t con orugas.

E. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales para terraplén por parte de la Secretaría, se hará considerando lo siguiente:

- E.1. El encargado de elaborar el estudio geotécnico o del banco, es el responsable de determinar, a nivel estudio, que el material cumpla con los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material establecido en el proyecto, en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.
- E.2. En el caso de que el Contratista de Obra seleccione el material o el banco, él será el responsable de asegurar que el material cumpla con los requisitos de calidad señalados en esta Norma, considerando lo indicado en la Fracción anterior. El Contratista de

NORMAS

N-CMT-1-01/02

- Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su propio laboratorio o por un laboratorio externo aprobado por la Secretaría.
- E.3.** Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad del material en la ejecución de la obra, el Contratista de Obra, por cada trescientos (300) metros cúbicos o fracción del material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con el límite líquido indicado en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante el procedimiento de prueba contenido en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de ese requisito.
- E.4.** Además de lo señalado en la Fracción anterior, el Contratista de Obra, por cada mil (1 000) metros cúbicos o fracción del material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con todos los valores establecidos en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos.
- E.5.** Una vez tendidas y compactadas las capas de terraplén, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren el cumplimiento del grado de compactación establecido en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, en el número y con la periodicidad indicada por los mismos, mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-1-10, *Grado de Compactación*, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas.
- E.6.** En cualquier momento, la Secretaría puede verificar que el material suministrado cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de cualquiera de ellos.



N-CMT-1-03/02

LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PARTE: 1. MATERIALES PARA TERRACERÍAS

TÍTULO: 03. Materiales para Subrasante

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad de los materiales que se utilicen en la construcción de la capa subrasante de las terracerías.

B. DEFINICIÓN

Los materiales para la capa subrasante son los suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima de la cama de los cortes, de la capa subyacente o del cuerpo de un terraplén cuando ésta última no se construya, para servir de desplante a un pavimento.

La clasificación de los suelos a que se refiere esta Norma, se describe en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

MANUALES	DESIGNACIÓN
Muestreo de Materiales para Terracerías	M-MMP-1-01
Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos	M-MMP-1-02
Contenido de Agua	M-MMP-1-04
Límites de Consistencia	M-MMP-1-07
Compactación AASHTO	M-MMP-1-09

SCT

1 de 5
11/11/02

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-1-03/02

Grado de Compactación	M-MMP-1-10
Valor Soporte de California (CBR) y Expansión en Laboratorio	M-MMP-1-11

D. REQUISITOS DE CALIDAD

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa subrasante, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirán con lo que se indica a continuación, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt).

- D.1. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea igual a un (1) millón de ejes equivalentes o menor, el material cumplirá con las características granulométricas y con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de veinte (20) centímetros.
- D.2. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea de un (1) millón a diez (10) millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de treinta (30) centímetros.
- D.3. Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes, la capa subrasante será motivo de diseño especial.
- D.4. Si la capa subrasante se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en las Fracciones D.1. o D.2. de esta Norma, según corresponda, cuando el material del terreno de cimentación no cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 1, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

E. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES PARA SUBRASANTE

- E.1. Cuando el material para subrasante sea producto de los cortes, se podrá transportar utilizando tractores o motoescrepas.

2 de 5
11/11/02

SCT



NORMAS

N-CMT-1-03/02

TABLA 1.- Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante

Característica	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación ^[2] ; %	100 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

E.2. Cuando el material para subrasante sea extraído de bancos o sea necesario almacenarlo para su posterior utilización en la obra, se tendrá cuidado en su transporte y almacenamiento, con el propósito de evitar la alteración de sus características, atendiendo los siguientes aspectos:

E.2.1. El material se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal propósito. Cuando en dicho sitio no se cuente con un firme, previamente a su utilización se deberá:

- Remover la materia vegetal y limpiar la superficie.
- Conformar, nivelar y compactar la superficie, dejando una sección transversal uniforme que permita el drenaje.

E.2.2. Los materiales constituidos por partículas de diferentes tamaños que se almacenen en los depósitos, tienden a segregarse, por lo que será necesario que al cargar el material para llevarlo al frente de trabajo, se tome desde la parte baja del depósito.

E.2.3. Los materiales se cargarán y transportarán al frente de trabajo, en vehículos con cajas cerradas o protegidas con

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-1-03/02

lonas, que impidan la contaminación del entorno o que se derramen.

F. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales para subrasante por parte de la Secretaría, se hará considerando lo siguiente:

F.1. El encargado de elaborar el estudio geotécnico o del banco, es el responsable de determinar, a nivel estudio, que el material cumpla con los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material establecido en el proyecto, en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

F.2. En el caso de que el Contratista de Obra seleccione el material o el banco, él será el responsable de asegurar que el material cumpla con los requisitos de calidad indicados en esta Norma, considerando lo indicado en la Fracción anterior. El Contratista de Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su propio laboratorio o por un laboratorio externo aprobado por la Secretaría.

F.3. Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad del material en la ejecución de la obra, el Contratista de Obra, por cada doscientos (200) metros cúbicos o fracción del material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias para que aseguren que cumple con el límite líquido y el índice plástico señalados en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante el procedimiento de prueba contenido en el Manual M-MMP-1-07, *Límites de Consistencia*. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos mencionados en esta Fracción.

F.4. Además de lo señalado en la Fracción anterior, el Contratista de Obra, por cada quinientos (500) metros cúbicos o fracción del



NORMAS

N-CMT-1-03/02

material de un mismo tipo, extraído de un corte o un banco, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con todos los valores establecidos en esta Norma, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-1-01, *Muestreo de Materiales para Terracerías* y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos.

- F.5. Una vez tendidas y compactadas las capas subrasantes, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren el cumplimiento del grado de compactación establecido en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, en el número y con la periodicidad indicada por los mismos, mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-1-10, *Grado de Compactación*, entregando a la Secretaría los resultados de dichas pruebas.
- F.6. En cualquier momento, la Secretaría puede verificar que el material suministrado cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de cualquiera de ellos.



N-CMT-4-02-001/11

LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PARTE: 4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS

TÍTULO: 02. Materiales para Subbases y Bases

CAPÍTULO: 001. Materiales para Subbases

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad que cumplirán los materiales que se utilicen en la construcción de la capa de subbase para pavimentos asfálticos.

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la subrasante, para formar una capa de apoyo para la base de pavimentos asfálticos.

Estos materiales, según el tratamiento que recibieron, pueden ser:

B.1. MATERIALES NATURALES

Son las arenas, gravas y limos, así como rocas muy alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria y que, por cumplir con los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, no requieren de tratamiento mecánico alguno para ser utilizados.

B.2. MATERIALES CRIBADOS

Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria y que para hacerlos utilizables, requieren de un tratamiento mecánico de cribado, con el equipo adecuado, para eliminar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en esta Norma y satisfacer la composición granulométrica.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-001/11

B.3. MATERIALES PARCIALMENTE TRITURADOS

Son los poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser disgregados y que para ser utilizables, requieren un tratamiento mecánico de trituración parcial y cribado, con el equipo adecuado, para aprovechar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en esta Norma y satisfacer la composición granulométrica.

B.4. MATERIALES TOTALMENTE TRITURADOS

Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

B.5. MATERIALES MEZCLADOS

Son los que se obtienen mediante la mezcla de dos o más de los materiales a que se refieren las Fracciones B.1 a B.4, en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en esta Norma.

B.6. En cada caso la elección del tratamiento más conveniente corresponderá al Contratista de Obra, asegurándose que se cumplan los requisitos de calidad de esta Norma.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Subbases y Bases	N-CTR-CAR-1-04-002
Construcción de Subbases o Bases Hidráulicas	N-CSV-CAR-4-02-004
Criterios Estadísticos de Muestreo	M-CAL-1-02
Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base	M-MMP-4-01-001
Granulometría	M-MMP-4-01-003
Límites de Consistencia	M-MMP-4-01-006
Valor Soporte de California (CBR)	M-MMP-4-01-007
Equivalente de Arena	M-MMP-4-01-008
Desgaste Los Ángeles	M-MMP-4-01-009
Compactación AASHTO	M-MMP-4-01-010
Grado de Compactación	M-MMP-4-01-011



NORMAS

N-CMT-4-02-001/11

D. REQUISITOS DE CALIDAD PARA SUBBASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

El material natural, cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado, que se emplee en la construcción de subbases para pavimentos asfálticos, cumplirá con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

D.1. El material tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 1 y se muestran en la Figura 1, considerando que el tamaño máximo de sus partículas no será mayor de veinticinco (25) por ciento del espesor de la subbase, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 2 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho coma dos (8,2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL).

TABLA 1.- Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos

Malla		Porcentaje que pasa ^[1]	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [2]	$\Sigma L > 10^6$ [2]
75	3"	100	100
50	2"	85 - 100	85 - 100
37,5	1½"	75 - 100	75 - 100
25	1"	62 - 100	62 - 100
19	¾"	54 - 100	54 - 100
9,5	¾"	40 - 100	40 - 100
4,75	Nº4	30 - 100	30 - 80
2	Nº10	21 - 100	21 - 60
0,85	Nº20	13 - 92	13 - 45
0,425	Nº40	8 - 75	8 - 33
0,25	Nº60	5 - 60	5 - 26
0,15	Nº100	3 - 45	3 - 20
0,075	Nº200	0 - 25	0 - 15

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% del espesor de la subbase.

[2] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

D.2. La curva granulométrica del material por emplear, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-003, *Granulometría*, tendrá una forma semejante a la de las curvas que se muestran en la Figura 1 de esta Norma, sin cambios bruscos de pendiente. La relación entre el porcentaje en masa que pase la malla con abertura de cero coma cero setenta y

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-001/11

cinco (0,075) milímetros (Nº200) al que pase la malla con abertura de cero coma cuatrocientos veinticinco (0,425) milímetros (Nº40) no será mayor de cero coma sesenta y cinco (0,65).

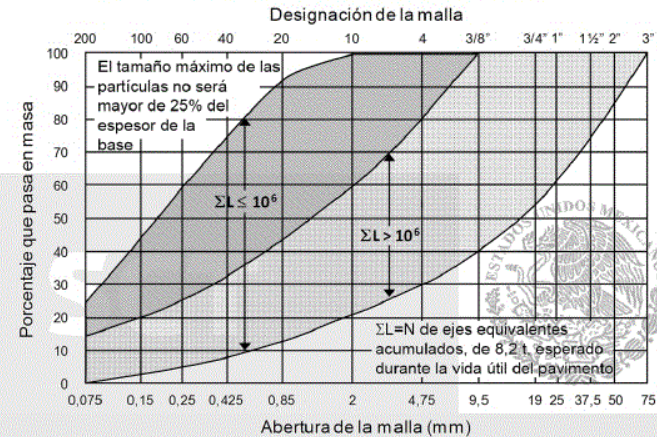


FIGURA 1.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos

TABLA 2.- Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo	10	6
Valor Soporte de California (CBR) ^[2,3] , mínimo	50	60
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	30	40
Desgaste Los Angeles ^[2] , máximo	50	40
Grado de compactación ^[2,4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

NORMAS

N-CMT-4-02-001/11

- D.3. Si la granulometría del material obtenido en un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico, no cumple con los requisitos establecidos en esta Norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción adecuada para que cumpla con dichos requisitos, en ningún caso es aceptable mezclar con materiales finos que agreguen plasticidad a la mezcla. Una vez establecido el proporcionamiento, el Contratista de Obra será el responsable de los procedimientos de mezclado de los materiales, para garantizar la homogeneidad de los mismos, evitando su segregación o degradación.

E. ALMACENAMIENTO

Con el propósito de evitar la alteración de las características de los materiales antes de su utilización en la obra, se tendrá cuidado en su almacenamiento, atendiendo los siguientes aspectos:

- E.1. El material cuando sea natural o una vez tratado mecánicamente, se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal uso. Cuando dicho sitio no cuente con un firme, previo a su utilización:
- Se removerá la materia vegetal y se limpiará la superficie;
 - se conformará, nivelará y compactará la superficie dejando una sección transversal uniforme que permita el drenaje y
 - se colocará, compactará y mantendrá sobre el terreno, una capa de quince (15) centímetros de espesor como mínimo, utilizando el mismo material por almacenar, para evitar la contaminación del material que se coloque encima.
- E.2. Durante el almacenamiento se evitará la circulación de vehículos sobre los montículos de materiales, pero en caso de que esto sea estrictamente necesario, se colocará un camino de tablas para evitar la contaminación y degradación del material o bien se usará una banda transportadora.
- E.3. Para evitar que se mezclen los diferentes materiales de distintos montículos, estos estarán lo suficientemente alejados uno del otro o separados entre sí por barreras colocadas con tal propósito.
- E.4. Cuando el material no vaya a usarse por un periodo prolongado, será recomendable cubrirlo con lonas para protegerlo de la intemperie.

SCT

5 de 7
08/12/11

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-001/11

F. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales por parte de la Secretaría, se hará teniendo en cuenta lo siguiente:

- F.1. El responsable del estudio geotécnico del banco, determinará a nivel de estudio, que el material cumple con las características y los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material requerido en el proyecto, probando muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma, e indicará en cada caso, el tratamiento mecánico a que deba sujetarse el material.
- F.2. En caso de que el Contratista de Obra seleccione el banco, será responsable de demostrar que el material cumple con las características y los requisitos de calidad señalados en esta Norma, con base en lo indicado en la Fracción anterior y de realizar, cuando proceda, el estudio para su tratamiento mecánico y obtener la aprobación por parte del Residente. El Contratista de Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su laboratorio o por un laboratorio externo, aprobados por la Secretaría.
- F.3. Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad del material, el Contratista de Obra, por cada doscientos (200) metros cúbicos o fracción del material pétreo de un mismo tipo, extraído del banco y, en su caso, una vez tratado mecánicamente, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con la granulometría y el equivalente de arena, indicados en esta Norma, y entregará a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos mencionados en esta Fracción.

6 de 7
08/12/11

SCT



NORMAS

N-CMT-4-02-001/11

- F.4. Además de lo señalado en la Fracción anterior, el Contratista de Obra, por cada dos mil (2 000) metros cúbicos o fracción del material pétreo de un mismo tipo, extraído del banco y, en su caso, una vez tratado mecánicamente, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con todos los valores establecidos en esta Norma, y entregará a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos.
- F.5. Una vez tendida y compactada la capa de la subbase, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren que el material cumple con los contenidos de grava, arena y finos propios de la granulometría que corresponda, determinados mediante el procedimiento simplificado que se indica en el Manual M-MMP-4-01-003, *Granulometría* y con el equivalente de arena, según lo señalado en esta Norma, probando muestras obtenidas al azar, en promedio cada trescientos (300) metros del tramo tendido y compactado, mediante un procedimiento basado en tablas de números aleatorios, conforme a lo indicado en el Manual M-CAL-1-02, *Criterios Estadísticos de Muestreo*, así como con el grado de compactación establecido en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, de acuerdo con lo indicado en la Fracción H.3. de la Norma N-CTR-CAR-1-04-002, *Subbases y Bases* o en la Fracción H.2. de la Norma N-CSV-CAR-4-02-004, *Construcción de Subbases o Bases Hidráulicas*, según sea el caso, mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-011, *Grado de Compactación* y entregará a la Secretaría los resultados de dichas pruebas.
- F.6. En cualquier momento, la Secretaría podrá verificar que el material suministrado cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de alguno de ellos.



N-CMT-4-02-002/11

LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PARTE: 4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS

TÍTULO: 02. Materiales para Subbases y Bases

CAPÍTULO: 002. Materiales para Bases Hidráulicas

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad que cumplirán los materiales que se utilicen en la construcción de bases hidráulicas de pavimentos asfálticos y de pavimentos de concreto hidráulico.

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la subbase o la subrasante, para formar una capa de apoyo para una carpeta asfáltica, para una capa de rodadura asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico.

Estos materiales, según el tratamiento que recibieron, pueden ser:

B.1. MATERIALES CRIBADOS

Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria y que para hacerlos utilizables, requieren de un tratamiento mecánico de cribado, con el equipo adecuado, para eliminar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en esta Norma y satisfacer la composición granulométrica.

B.2. MATERIALES PARCIALMENTE TRITURADOS

Son los poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-002/11

disgregados y que para hacerlos utilizables, requieren un tratamiento mecánico de trituración parcial y cribado, con el equipo adecuado, para aprovechar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en esta Norma y satisfacer la composición granulométrica.

B.3. MATERIALES TOTALMENTE TRITURADOS

Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

B.4. MATERIALES MEZCLADOS

Son los que se obtienen mediante la mezcla de dos o más de los materiales a que se refieren las Fracciones B.1. a B.3., en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en esta Norma.

B.5. En cada caso la elección del tratamiento más conveniente corresponderá al Contratista de Obra, asegurándose que se cumplan los requisitos de calidad de esta Norma.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Subbases y Bases	N-CTR-CAR-1-04-002
Construcción de Subbases o Bases Hidráulicas	N-CSV-CAR-4-02-004
Criterios Estadísticos de Muestreo	M-CAL-1-02
Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base	M-MMP-4-01-001
Granulometría	M-MMP-4-01-003
Límites de Consistencia	M-MMP-4-01-006
Valor Soporte de California (CBR)	M-MMP-4-01-007
Equivalente de Arena	M-MMP-4-01-008
Desgaste Los Ángeles	M-MMP-4-01-009
Compactación AASHTO	M-MMP-4-01-010
Grado de Compactación	M-MMP-4-01-011
Partículas Alargadas y Lajeadas	M-MMP-4-01-016



NORMAS

N-CMT-4-02-002/11

D. REQUISITOS DE CALIDAD PARA BASES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

El material cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado, que se emplee en la construcción de bases para pavimentos asfálticos o para pavimentos de concreto hidráulico, cumplirá con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

D.1. El material para la base hidráulica será cien (100) por ciento producto de la trituración de roca sana, cuando el tránsito esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes acumulados de ocho coma dos (8,2) toneladas; cuando ese tránsito sea de uno (1) a diez (10) millones, el material contendrá como mínimo setenta y cinco (75) por ciento de partículas producto de la trituración de roca sana y si dicho tránsito es menor un (1) millón, el material contendrá como mínimo cincuenta (50) por ciento de esas partículas.

D.2. Cuando inmediatamente después de la construcción de la base se coloque una carpeta de concreto hidráulico, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecieron en la Tabla 1 y se muestran en la Figura 1, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 2 de esta Norma.

TABLA 1.- Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
37,5	1½"	100
25	1"	70 - 100
19	¾"	60 - 100
9,5	¾"	40 - 100
4,75	N°4	30 - 80
2	N°10	21 - 60
0,85	N°20	13 - 44
0,425	N°40	8 - 31
0,25	N°60	5 - 23
0,15	N°100	3 - 17
0,075	N°200	0 - 10

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-002/11

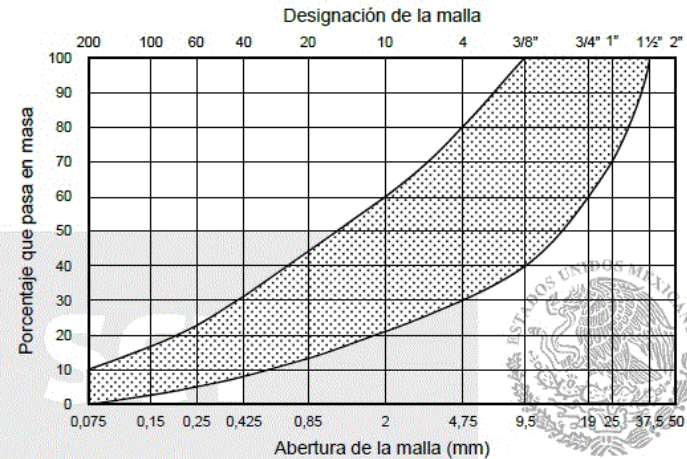


FIGURA 1.- Zona granulométrica recomendable de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico

TABLA 2.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de concreto hidráulico

Característica	Valor %
Límite líquido ^[1] , máximo	25
Índice plástico ^[1] , máximo	6
Equivalente de arena, mínimo ^[1]	40
Valor Soporte de California (CBR), mínimo ^[1,2]	80
Desgaste Los Angeles, máximo ^[1]	35
Partículas alargadas y ladeadas, máximo	40
Grado de compactación ^[1,3] , mínimo	100

[1] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[2] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

NORMAS

N-CMT-4-02-002/11

D.3. Cuando inmediatamente después de la construcción de la base se coloque una carpeta de mezcla asfáltica de granulometría densa, ya sea en caliente o en frío, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 3 y se muestran en la Figura 2, considerando que el tamaño máximo de sus partículas no será mayor de veinte (20) por ciento del espesor de la base, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 4 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho coma dos (8,2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL).

TABLA 3.- Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa

Malla		Porcentaje que pasa ^[1]	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [2]	$\Sigma L > 10^6$ [2]
75	3"	100	100
50	2"	85 - 100	85 - 100
37,5	1½"	75 - 100	75 - 100
25	1"	62 - 100	62 - 90
19	¾"	54 - 100	54 - 83
9,5	¾"	40 - 100	40 - 65
4,75	N°4	30 - 80	30 - 50
2	N°10	21 - 60	21 - 36
0,85	N°20	13 - 44	13 - 25
0,425	N°40	8 - 31	8 - 17
0,25	N°60	5 - 23	5 - 12
0,15	N°100	3 - 17	3 - 9
0,075	N°200	0 - 10	0 - 5

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% del espesor de la base.
 [2] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

D.4. Cuando sobre la base que se construya se coloque solamente un tratamiento asfáltico superficial, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 5 y se muestran en la Figura 3, considerando que el tamaño máximo

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-002/11

de sus partículas no será mayor de veinte (20) por ciento del espesor de la base, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 4 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho coma dos (8,2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL).

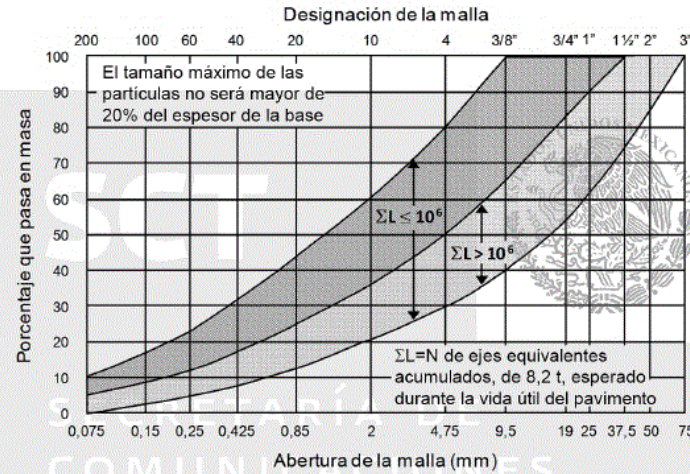


FIGURA 2.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para bases de pavimentos con carpetas de mezcla asfáltica de granulometría densa

D.5. La curva granulométrica del material por emplear, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-003, *Granulometría*, tendrá una forma semejante a la de las curvas que se muestran en las Figuras 1 a 3 de esta Norma, según sea el caso, sin cambios bruscos de pendiente. La relación entre el porcentaje en masa que pase la malla con abertura de cero coma setenta y cinco (0,075) milímetros (N°200) al que pase la malla con abertura de cero coma cuatrocientos veinticinco (0,425) milímetros (N°40) no será mayor de cero coma sesenta y cinco (0,65).

NORMAS

N-CMT-4-02-002/11

TABLA 4.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido ^[2] , máximo	25	25
Índice plástico ^[2] , máximo	6	6
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	40	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[2, 3] , mínimo	80	100
Desgaste Los Angeles ^[2] , máximo	35	30
Partículas alargadas y lajeadas ^[2] , máximo	40	35
Grado de compactación ^[2, 4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

TABLA 5.- Requisitos de granulometría de los materiales para bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial

Malla		Porcentaje que pasa ^[1]	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [2]	$\Sigma L > 10^6$ [2]
75	3"	100	100
50	2"	85 - 100	85 - 100
37,5	1½"	75 - 100	75 - 100
25	1"	62 - 100	62 - 90
19	¾"	54 - 100	54 - 83
9,5	¾"	40 - 83	40 - 65
4,75	N°4	30 - 67	30 - 50
2	N°10	21 - 50	21 - 36
0,85	N°20	13 - 37	13 - 25
0,425	N°40	8 - 28	8 - 17
0,25	N°60	5 - 22	5 - 12
0,15	N°100	3 - 17	3 - 9
0,075	N°200	0 - 10	0 - 5

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% del espesor de la base.

[2] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-002/11

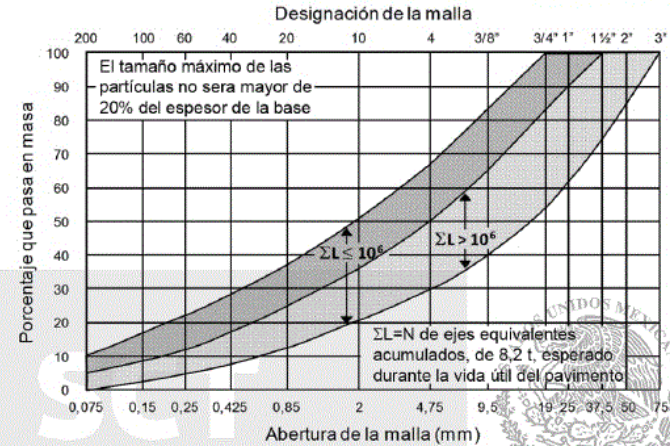


FIGURA 3.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para bases de pavimentos con solamente un tratamiento asfáltico superficial

D.6. Si la granulometría del material obtenido en un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico, no cumple con los requisitos establecidos en esta Norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción adecuada para que cumpla con dichos requisitos, en ningún caso es aceptable mezclar con materiales finos que agreguen plasticidad a la mezcla. Una vez establecido el proporcionamiento, el Contratista de Obra será el responsable de los procedimientos de mezclado de los materiales, para garantizar la homogeneidad de los mismos, evitando su segregación o degradación.

E. ALMACENAMIENTO

Con el propósito de evitar la alteración de las características de los materiales antes de su utilización en la obra, se tendrá cuidado en su almacenamiento, atendiendo los siguientes aspectos:

E.1. El material, una vez tratado mecánicamente, se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal uso. Cuando dicho sitio no cuente con un firme, previo a su utilización:

NORMAS

N-CMT-4-02-002/11

- Se removerá la materia vegetal y se limpiará la superficie;
 - se conformará, nivelará y compactará la superficie dejando una sección transversal uniforme que permita el drenaje y
 - se colocará, compactará y mantendrá sobre el terreno, una capa de quince (15) centímetros de espesor como mínimo, utilizando el mismo material por almacenar, para evitar la contaminación del material que se coloque encima.
- E.2.** Durante el almacenamiento se evitará la circulación de vehículos sobre los montículos de materiales, pero en caso de que esto sea estrictamente necesario, se colocará un camino de tablas para evitar la contaminación y degradación del material o bien se usará una banda transportadora.
- E.3.** Para evitar que se mezclen los diferentes materiales de distintos montículos, estos estarán lo suficientemente alejados uno del otro o separados entre sí por barreras colocadas con tal propósito.
- E.4.** Cuando el material no vaya a usarse por un periodo prolongado, será recomendable cubrirlo con lonas para protegerlo de la intemperie.

F. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales por parte de la Secretaría, se hará teniendo en cuenta lo siguiente:

- F.1.** El responsable del estudio geotécnico del banco, determinará a nivel de estudio, que el material cumple con las características y los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material requerido en el proyecto, probando muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma, e indicará en cada caso, el tratamiento mecánico a que deba sujetarse el material.
- F.2.** En caso de que el Contratista de Obra seleccione el banco, será responsable de demostrar que el material cumple con las características y los requisitos de calidad señalados en esta Norma, con base en lo indicado en la Fracción anterior y de

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-002/11

realizar, cuando proceda, el estudio para su tratamiento mecánico y obtener la aprobación por parte del Residente. El Contratista de Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su laboratorio o por un laboratorio externo, aprobados por la Secretaría.

- F.3.** Durante el proceso de producción, con objeto de controlar la calidad del material, el Contratista de Obra, por cada trescientos (300) metros cúbicos o fracción del material pétreo de un mismo tipo, extraído del banco y una vez tratado mecánicamente, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con la granulometría y el equivalente de arena, indicados en esta Norma, y entregará a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos mencionados en esta Fracción.
- F.4.** Además de lo señalado en la Fracción anterior, el Contratista de Obra, por cada tres mil (3000) metros cúbicos o fracción del material pétreo de un mismo tipo, extraído del banco y una vez tratado mecánicamente, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumple con todos los valores establecidos en esta Norma, y entregará a la Secretaría los resultados de dichas pruebas. Las pruebas se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos.
- F.5.** Una vez tendida y compactada la capa de la base, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren que el material cumple con los contenidos de grava, arena y finos propios de la granulometría que corresponda, determinados mediante el procedimiento simplificado que se indica en la Norma M-MMP-4-01-003, *Granulometría* y con el equivalente de arena, según lo señalado en esta Norma, probando muestras obtenidas

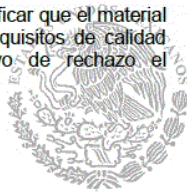


NORMAS

N-CMT-4-02-002/11

al azar, en promedio cada doscientos (200) metros del tramo tendido y compactado, mediante un procedimiento basado en tablas de números aleatorios, conforme a lo indicado en el Manual M-CAL-1-02, *Criterios Estadísticos de Muestreo*, así como con el grado de compactación establecido en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, de acuerdo con lo indicado en la Fracción H.3. de la Norma N-CTR-CAR-1-04-002, *Subbases y Bases* o en la Fracción H.2. de la Norma N-CSV-CAR-4-02-004, *Construcción de Subbases o Bases Hidráulicas*, según sea el caso, mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-011, *Grado de Compactación*, y entregará a la Secretaría los resultados de dichas pruebas.

- F.6. En cualquier momento, la Secretaría podrá verificar que el material suministrado cumpla con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de alguno de ellos.



SCT
SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



N-CMT-4-02-003/04

LIBRO: CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PARTE: 4. MATERIALES PARA PAVIMENTOS

TÍTULO: 02. Materiales para Subbases y Bases

CAPÍTULO: 003. *Materiales para Bases Tratadas*

A. CONTENIDO

Esta Norma contiene los requisitos de calidad que cumplirán los materiales que se utilicen en la construcción de bases de pavimentos asfálticos y de pavimentos de concreto hidráulico, tratadas químicamente para modificar su comportamiento mecánico e hidráulico.

B. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Son materiales granulares que no cumplen con alguno de los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-02-002, *Materiales para Bases Hidráulicas* o que, por razones estructurales, requieren la incorporación de un producto que modifica alguna de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes, mejorando su comportamiento mecánico e hidráulico, para ser colocados sobre la subbase o la subrasante y formar una capa de apoyo para una carpeta asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico.

Estos materiales, según el producto que se utilice en su tratamiento, se clasifican como:

- B.1. Materiales modificados con cal. Cuando se les incorpora de dos (2) a tres (3) por ciento en masa, de cal, para modificar su plasticidad o reducir el efecto de la materia orgánica en los suelos.
- B.2. Materiales modificados con cemento. Cuando se les incorpora de tres (3) a cuatro (4) por ciento en masa, de cemento Portland, para modificar su plasticidad o incrementar su resistencia.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

- B.3. Materiales estabilizados con cemento. Cuando se les incorpora de ocho (8) a diez (10) por ciento en masa, de cemento Portland, para obtener una resistencia a la compresión simple a los veintiocho (28) días de edad, no menor de dos coma cinco (2,5) megapascuales (25 kg/cm²) e incrementar su rigidez, reduciendo así el efecto de la fatiga sobre la carpeta o mejorando el apoyo de las losas de concreto hidráulico.
- B.4. Materiales estabilizados con asfalto. Cuando se les incorpora, mediante una emulsión o un asfalto rebajado, de tres (3) a cuatro (4) por ciento en masa, de cemento asfáltico, para mejorar su comportamiento y el efecto de la plasticidad.
- B.5. Base de mezcla asfáltica (*Base negra*). Cuando a los materiales se les incorpora, en caliente o en frío, de cuatro (4) a cinco (5) por ciento en masa, de cemento asfáltico, para formar una capa de concreto asfáltico magro.
- B.6. Base de concreto hidráulico magro o de baja resistencia. Cuando a los materiales se les incorpora el cemento Portland necesario para obtener una resistencia a la compresión simple a los veintiocho (28) días de edad, de catorce coma siete (14,7) megapascuales (150 kg/cm²) a diecinueve coma seis (19,6) megapascuales (200 kg/cm²) y transformar un pavimento flexible en un pavimento rígido, como es el caso de concretos compactados con rodillo o de la recuperación en frío de pavimentos asfálticos y su base hidráulica.

C. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con los siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Capas Estabilizadas	N-CTR-CAR-1-04-003
Recuperación en Frío de Pavimentos Asfálticos ..	N-CSV-CAR-4-02-001
Construcción de Subbases o Bases Estabilizadas	N-CSV-CAR-4-02-005
Construcción de Subbases y Bases de Concreto Compactado con Rodillo	N-CSV-CAR-4-02-006
Calidad del Cemento Portland	N-CMT-2-02-001
Materiales para Bases Hidráulicas	N-CMT-4-02-002
Cal para Estabilización de Suelos	N-CMT-4-03-001
Calidad de Materiales Asfálticos	N-CMT-4-05-001



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto	M-MMP-2-02-058
Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base	M-MMP-4-01-001
Granulometría.....	M-MMP-4-01-003
Contenido de Agua	M-MMP-4-01-004
Límites de Consistencia	M-MMP-4-01-006
Equivalente de Arena	M-MMP-4-01-008
Desgaste Los Ángeles	M-MMP-4-01-009
Compactación AASHTO	M-MMP-4-01-010
Contenido de Materia Orgánica	M-MMP-4-01-012
Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos No Plásticos	M-MMP-4-01-014
Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos Plásticos	M-MMP-4-01-015
Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	M-MMP-4-04-005
Desprendimiento por Fricción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	M-MMP-4-04-009
Cubrimiento con Asfalto Mediante el Método Inglés de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	M-MMP-4-04-010
Viscosidad Saybolt-Furol en Materiales Asfálticos	M-MMP-4-05-004
Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa	M-MMP-4-05-034
Contenido de Cemento Asfáltico en Mezclas	M-MMP-4-05-038
Contenido de Agua en Mezclas Asfálticas	M-MMP-4-05-039
Contenido de Disolventes en Mezclas Asfálticas	M-MMP-4-05-040
Pérdida de Estabilidad por Inmersión en Agua de Mezclas Asfálticas	M-MMP-4-05-042

D. REQUISITOS DE CALIDAD PARA MATERIALES MODIFICADOS CON CAL, MODIFICADOS CON CEMENTO O ESTABILIZADOS CON CEMENTO, PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales modificados con cal, modificados o estabilizados con cemento, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

- D.1. La cal o el cemento Pórtland que se utilicen para la modificación o estabilización, cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en las Normas N-CMT-4-03-001, *Cal para Estabilización de Suelos* o N-CMT-2-02-001, *Calidad del Cemento Pórtland*.
- D.2. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, cuando se utilice cemento Pórtland en la modificación o estabilización, éste será ordinario (Tipo CPO).
- D.3. El material por modificar con cal o con cemento Pórtland, o por estabilizar con cemento Pórtland, cumplirá con los requisitos de granulometría que correspondan, entre los indicados en la Norma N-CMT-4-02-002, *Materiales para Bases Hidráulicas*, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa y no tendrá un contenido de materia orgánica tal que, al ser probado conforme al procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-01-012, *Contenido de Materia Orgánica*, produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3. En caso contrario se tratará con cal para reducir la actividad de la materia orgánica y cumplir con el valor antes anotado.
- D.4. El material una vez modificado con cal o con cemento Pórtland, cumplirá con el límite líquido, el índice plástico, el equivalente de arena, el Valor Soporte de California (CBR) y el Desgaste Los Ángeles, que correspondan entre los indicados en la Norma N-CMT-4-02-002, *Materiales para Bases Hidráulicas*.
- D.5. La resistencia a la compresión simple del material una vez estabilizado con cemento Pórtland, a los veintiocho (28) días de edad, determinada en especímenes cilíndricos con una relación altura/diámetro no menor de uno (1), compactados dinámicamente al cien (100) por ciento respecto de la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M-MMP-4-01-010, *Compactación AASHTO* o al grado de compactación que indique el proyecto o señale la Secretaría y probados mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-2-02-058, *Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto*, será la establecida en el proyecto o la que indique la Secretaría, pero nunca inferior que dos coma cinco (2,5) megapascales (25 kg/cm²).



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

D.6. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, los materiales una vez modificados o estabilizados, con cal o con cemento Pórtland, se compactarán al cien (100) por ciento respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M-MMP-4-01-010, *Compactación AASHTO*.

E. REQUISITOS DE CALIDAD PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO, PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales estabilizados con asfalto, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

- E.1. El producto asfáltico que se utilice en la estabilización cumplirá con los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, según su tipo.
- E.2. El material por estabilizar con asfalto cumplirá con los requisitos de granulometría que correspondan, entre los indicados en la Norma N-CMT-4-02-002, *Materiales para Bases Hidráulicas*, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa. Tendrá un desprendimiento por fricción menor de veinticinco (25) por ciento y un cubrimiento con asfalto mayor de noventa (90) por ciento, determinados conforme a lo indicado en los Manuales M-MMP-4-04-009, *Desprendimiento por Fricción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas* y M-MMP-4-04-010, *Cubrimiento con Asfalto Mediante el Método Inglés de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, respectivamente y no tendrá un contenido de materia orgánica tal que, al ser probado conforme al procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-01-012, *Contenido de Materia Orgánica*, produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3; en caso contrario se tratará con cal para reducir la actividad de la materia orgánica y cumplir con el valor antes anotado.
- E.3. Para estabilizar los materiales no plásticos, como las arenas, se mezclarán con la cantidad de producto asfáltico necesaria para obtener una estabilidad mínima de cero coma sesenta y cuatro (0,64) kilonewton, determinada mediante el procedimiento indicado en el Manual M-MMP-4-01-014, *Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos No Plásticos*.
- E.4. Para estabilizar los materiales plásticos que tengan valores de límite líquido y equivalente de arena fuera de los límites indicados

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

en la Norma N-CMT-4-02-002, *Materiales para Bases Hidráulicas*, se mezclarán con la cantidad de producto asfáltico necesaria para cumplir con los requisitos de calidad indicados en la Tabla 1 de esta Norma, determinados mediante el procedimiento indicado en el Manual M-MMP-4-01-015, *Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos Plásticos*.

TABLA 1.- Requisitos de calidad de los materiales plásticos estabilizados con productos asfálticos

Característica*	Valor
Estabilidad; kg, mínimo	180
Expansión; %, máximo	2
Absorción; %, máximo	5

* Determinada mediante el procedimiento indicado en el Manual M-MMP-4-01-015, *Determinación del Contenido de Asfalto para Estabilizar Suelos Finos Plásticos*

E.5. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, los materiales una vez estabilizados con producto asfáltico, se compactarán al cien (100) por ciento respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M-MMP-4-01-010, *Compactación AASHTO*.

F. REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PARA BASE DE MEZCLA ASFÁLTICA (BASE NEGRA) PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales que se empleen en la construcción de bases de mezcla asfáltica (bases negras), cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

- F.1. El producto asfáltico que se utilice cumplirá con los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-05-001, *Calidad de Materiales Asfálticos*, según su tipo.
- F.2. El material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 2 y se muestran en la Figura 1, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho coma dos (8,2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL).



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

TABLA 2.- Requisitos de granulometría del material pétreo para bases de mezcla asfáltica (bases negras)

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
37,5	1½"	100	100
25	1"	90 – 100	90 - 100
19	¾"	76 – 100	76 - 100
9,5	¾"	42 – 100	42 - 100
4,75	Nº4	24 – 100	24 - 70
2	Nº10	10 – 90	10 - 27
0,85	Nº20	5 – 65	5 - 14
0,425	Nº40	4 – 47	4 - 10
0,25	Nº60	2 – 35	2 - 8
0,15	Nº100	1 – 25	1 - 7
0,075	Nº200	0 – 15	0 - 6

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

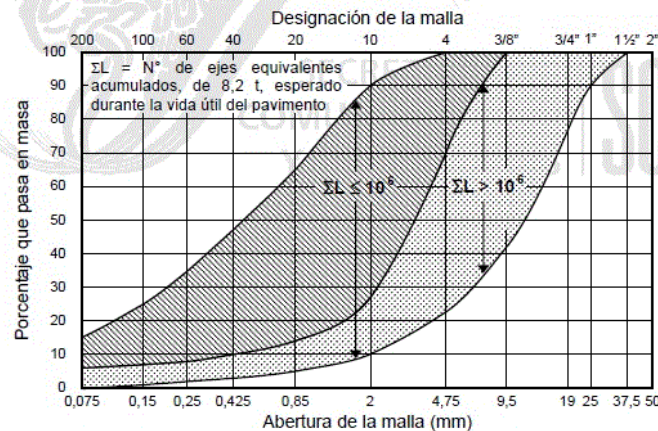


FIGURA 1.- Zonas granulométricas recomendables del material pétreo para bases de mezcla asfáltica (bases negras)

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

TABLA 3.- Requisitos de calidad del material pétreo para bases de mezcla asfáltica (bases negras)

Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo	6	6
Contenido de agua ^[2] , máximo	1	1
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	40	50
Partículas alargadas y lajeadas ^[2] , máximo	50	40
Desgaste Los Ángeles ^[2] , máximo	30	30
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; máximo ^[2]	25	25

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

- F.3. La curva granulométrica del material pétreo, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-003, *Granulometría*, tendrá una forma semejante a las de las curvas que se muestran en la Figura 1 de esta Norma, sin cambios bruscos de pendiente.
- F.4. El tamaño máximo permisible del material pétreo no será mayor de treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros (1½") ni de dos tercios (⅔) del espesor de la capa de base asfáltica compacta.
- F.5. Cuando la base de mezcla asfáltica se diseñe mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-05-034, *Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa*, de acuerdo con la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho coma dos (8,2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 4 y con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) indicado en la Tabla 5 de esta Norma.
- F.6. Cuando en la elaboración de la base de mezcla asfáltica se utilice cemento asfáltico, el mezclado en caliente se hará a la temperatura más baja posible que permita obtener una mezcla y cubrimiento del material pétreo uniformes, pero lo suficientemente alta para disponer del tiempo requerido para su transporte, tendido

NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

y compactación. En general, la temperatura de mezclado será la que, en la gráfica de Viscosidad-Temperatura, previamente obtenida para el cemento asfáltico que se utilice, corresponda a una viscosidad Saybolt-Furol de ochenta y cinco (85) más menos diez (± 10) segundos, determinada mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-05-004, *Viscosidad Saybolt-Furol en Materiales Asfálticos*. Los materiales pétreos se calentarán a la temperatura de mezclado más diez (10) grados Celsius.

TABLA 4.- Requisitos de calidad para bases de mezcla asfáltica diseñadas mediante el método Marshall

Características	Valor	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb), mínimo	4 410 (990)	6 860 (1 540)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2 - 4,5 (8 - 18)	2 - 4 (8 - 16)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 8	3 - 8

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

TABLA 5.- Vacíos en el agregado mineral (VAM) para bases de mezcla asfáltica diseñadas mediante el método Marshall

Tamaño máximo del material pétreo utilizado en la mezcla		Vacíos en el agregado mineral (VAM) %; mínimo
mm	Designación	
4,75	N°4	18
6,3	¼"	17
9,5	⅜"	16
12,5	½"	15
19	¾"	14
25	1"	13
37,5	1½"	12

F.7. Cuando en la elaboración de la base de mezcla asfáltica se utilice emulsión asfáltica, ésta será de rompimiento medio o lento y cuando se utilice asfalto rebajado, éste será de fraguado rápido. La temperatura de las emulsiones asfálticas al momento del

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

mezclado, será de cinco (5) a cuarenta (40) grados Celsius; en el caso de asfaltos rebajados, será de sesenta (60) a ochenta (80) grados Celsius. Para obtener un buen cubrimiento de los materiales pétreos, es conveniente realizar el mezclado en planta.

- F.8. No se aplicarán los materiales asfálticos cuando la temperatura ambiente sea menor de cinco (5) grados Celsius, cuando esté lloviendo o haya amenaza de lluvia o cuando la velocidad del viento impida que la aplicación con petrolizadora sea uniforme.
- F.9. Los contenidos de cemento asfáltico, de agua y de disolventes en las bases asfálticas ya compactadas, determinados de acuerdo con los procedimientos descritos en los Manuales M-MMP-4-05-038, *Contenido de Cemento Asfáltico en Mezclas*, M-MMP-4-05-039, *Contenido de Agua en Mezclas Asfálticas* y M-MMP-4-05-040, *Contenido de Disolventes en Mezclas Asfálticas*, respectivamente, quedarán dentro de los límites fijados en la Tabla 6 de esta Norma.

TABLA 6.- Contenidos de cemento asfáltico, agua y disolventes en la base de mezcla asfáltica (base negra)

Material asfáltico empleado en la elaboración de la base de mezcla asfáltica	Tolerancia en el contenido de cemento asfáltico (CA) [1] %	Contenido de agua libre permitido [2] %	Relación de disolventes a cemento asfáltico en masa valor K
Cemento asfáltico	CA \pm 0,05	1	0
Emulsión asfáltica sin disolventes	CA \pm 0,1	---	0
Emulsión asfáltica con disolventes	CA \pm 0,1	---	0,05 a 0,08
Asfaltos rebajados	CA \pm 0,1	1	0,05 a 0,08

[1] CA corresponde al contenido de cemento asfáltico determinado en el diseño de la mezcla, en por ciento respecto a la masa del material pétreo.

[2] Respecto a la masa de la mezcla asfáltica.

F.10. Las temperaturas mínimas convenientes para el tendido y compactación de la base de mezcla asfáltica, serán determinadas mediante la curva *Viscosidad-Temperatura* del material asfáltico que se utilice, pero no será menor a la que corresponda a una viscosidad Saybolt-Furol de ciento cuarenta (140) más menos



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

quince (± 15) segundos, determinada mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-05-004, *Viscosidad Saybolt-Furol en Materiales Asfálticos*.

F.11. El espesor máximo de la base de mezcla asfáltica que se tienda será aquel que el equipo sea capaz de compactar, de tal forma que la diferencia entre los grados de compactación de los tres (3) centímetros superiores y de los tres (3) centímetros inferiores, sea menor de uno (1) por ciento o igual. Si es necesario, la base de mezcla asfáltica se construirá en dos o más capas.

F.12. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, las bases de mezcla asfálticas se compactarán como mínimo al noventa y cinco (95) por ciento de su masa volumétrica máxima obtenida mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-05-034, *Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa*.

G. REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PARA BASE DE CONCRETO HIDRÁULICO MAGRO O DE BAJA RESISTENCIA, PROVENIENTES DE UN BANCO

Los materiales que se empleen en la construcción de bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

G.1. Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, el cemento Portland que se utilice será ordinario (Tipo CPO) y cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Norma N-CMT-2-02-001, *Calidad del Cemento Portland*.

G.2. El material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 7 y se muestran en la Figura 2, y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 8 de esta Norma.

G.3. La fracción del material pétreo que se retenga en la malla con abertura de cuatro coma setenta y cinco (4,75) milímetros (N°4) tendrá al menos cincuenta (50) por ciento en masa de partículas trituradas, que presenten dos caras fracturadas o más.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

TABLA 7.- Requisitos de granulometría del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
25	1"	100
19	3/4"	87 - 100
9,5	3/8"	55 - 89
4,75	N°4	35 - 69
2	N°10	22 - 54
0,85	N°20	15 - 40
0,425	N°40	10 - 30
0,25	N°60	8 - 23
0,15	N°100	5 - 18
0,075	N°200	3 - 10

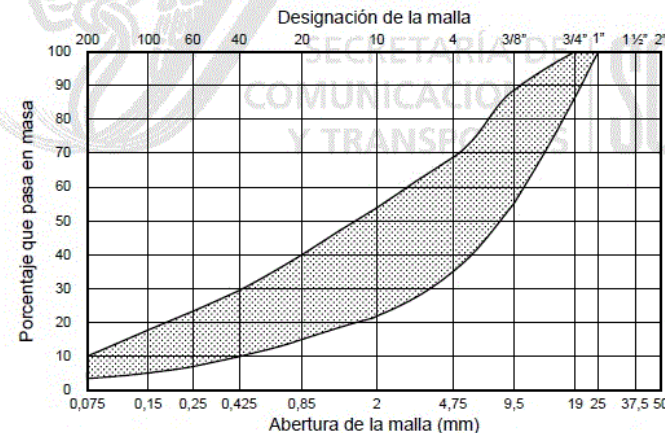


FIGURA 2.- Zona granulométrica recomendable del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

TABLA 8.- Requisitos de calidad del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia

Característica	Valor %
Índice plástico ^[1] , máximo	NP
Equivalente de arena ^[1] , mínimo	50
Desgaste Los Ángeles ^[1] , máximo	30

[2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

- G.4.** Los materiales pétreos nuevos, que no procedan de la recuperación en frío de pavimentos asfálticos, no tendrán un contenido de materia orgánica tal que, al ser probado conforme al procedimiento descrito en el Manual M-MMP-4-01-012, *Contenido de Materia Orgánica*, produzca un líquido más oscuro que la solución normalizada N°3.
- G.5.** Los materiales pétreos se suministrarán fraccionados al menos en dos tamaños, separados por la malla con abertura de cuatro coma setenta y cinco (4,75) milímetros (N°4), si la dosificación del cemento se hace en planta estacionaria. Si el cemento se agrega en el camino, se suministrará en un solo tamaño.
- G.6.** Los materiales pétreos combinados y el cemento Portland, se mezclarán en la proporción necesaria para producir un concreto hidráulico homogéneo, con la resistencia a la compresión simple establecida en el proyecto o aprobada por la Secretaría, de forma que en su estado fresco tenga un revenimiento de cero (0) centímetros. Será responsabilidad del Contratista de Obra determinar el proporcionamiento adecuado en el laboratorio para alcanzar la resistencia de proyecto.
- G.7.** La curva granulométrica de los materiales pétreos mezclados con el cemento Portland en la proporción a que se refiere la Fracción anterior, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-003, *Granulometría*, tendrá una forma continua, ubicada dentro de los límites que se establecen en la Tabla 9 y se muestran en la Figura 3 de esta Norma.

TABLA 9.- Requisitos de granulometría del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, habiendo agregado el cemento Portland

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
25	1"	100
19	¾"	88 - 100
9,5	⅝"	59 - 90
4,75	N°4	41 - 72
2	N°10	29 - 58
0,85	N°20	23 - 45
0,425	N°40	18 - 36
0,25	N°60	16 - 30
0,15	N°100	14 - 25
0,075	N°200	12 - 18

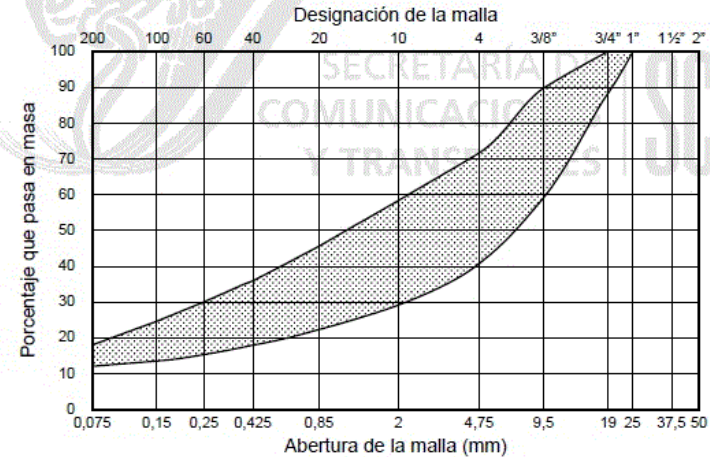


FIGURA 3.- Zona granulométrica recomendable del material pétreo para bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, habiendo agregado el cemento Portland

NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

- G.8.** Salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa, la base de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, una vez agregado el cemento Pórtland, se compactará al cien (100) por ciento respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, conforme a lo indicado en el Manual M-MMP-4-01-010, *Compactación AASHTO*, con el contenido de agua óptimo. La compactación de una sección transversal cualquiera se terminará totalmente en menos de tres (3) horas, desde el instante en que se haya iniciado la incorporación y mezclado del agua para el concreto hidráulico magro o de baja resistencia destinado a esa sección, excepto cuando el proyecto indique o la Secretaría apruebe la utilización de un aditivo retardador de fraguado, en cuyo caso dicha sección se compactará totalmente dentro del plazo de trabajabilidad de la mezcla.
- G.9.** En todo momento se mantendrá húmeda la superficie de la base de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, mediante riegos de agua finamente pulverizada, hasta la colocación de la membrana de curado, si el camino está fuera de operación. En caso contrario se continuará con los riegos durante tres (3) días.
- G.10.** Una vez compactada y curada la base, su resistencia a la compresión simple a los veintiocho (28) días de edad, determinada mediante el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-2-02-058, *Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto*, será la establecida en el proyecto o la que indique la Secretaría.

H. REQUISITOS DE CALIDAD DE MATERIALES PROVENIENTES DE LA RECUPERACIÓN DE PAVIMENTOS EXISTENTES

En general, los materiales obtenidos de la recuperación in-situ de pavimentos existentes, para ser utilizados en una nueva base, estabilizada o no, se corregirán mediante la adición de otros materiales provenientes de banco, de tal manera que cumplan con los requisitos establecidos en esta Norma según el uso a que se destinen. En los casos en que esto no sea posible o económicamente inconveniente, tal situación deberá ser tomada en cuenta en el diseño del pavimento.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

I. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

Con el propósito de evitar la alteración de las características de los materiales antes de su utilización en la obra, debe tenerse cuidado en su transporte y almacenamiento, atendiendo los siguientes aspectos:

- I.1.** Los materiales nuevos por modificar o estabilizar, o el material pétreo nuevo que se emplee en la construcción de bases de mezcla asfáltica o de concreto de baja resistencia, se almacenará en un sitio específicamente destinado para tal uso, considerando lo siguiente:
- I.1.1.** Cuando en el almacén no se cuente con un firme, previamente a su utilización:
- Se removerá la materia vegetal y se limpiará la superficie;
 - se conformará, nivelará y compactará la superficie hasta dejar una sección transversal uniforme que permita el drenaje; y
 - se colocará, compactará y mantendrá sobre el terreno, una capa de quince (15) centímetros de espesor como mínimo, utilizando el mismo material por almacenar, para evitar la contaminación del material que se almacene encima.
- I.1.2.** Durante el almacenamiento se evitará la circulación de vehículos sobre los montículos de materiales, pero en caso de que esto sea estrictamente necesario, se colocará un camino de tablas para evitar la contaminación y degradación del material.
- I.1.3.** Para evitar que se mezclen los diferentes materiales de distintos montículos, estos estarán lo suficientemente alejados uno del otro o separados entre sí por barreras colocadas con tal propósito.
- I.1.4.** Cuando el material no vaya a usarse por un periodo prolongado, es conveniente cubrirlo con lonas para protegerlo de contaminantes y del clima.



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

- 1.2. Para la base de mezcla asfáltica elaborada, con cemento asfáltico, una vez concluido el mezclado en caliente se considerará lo siguiente:
- 1.2.1. La mezcla asfáltica caliente puede ser almacenada por corto tiempo en tolvas metálicas sin orificios, con superficie interior lisa y limpia, pero teniendo en cuenta que la temperatura de la mezcla se reducirá rápidamente. No se permitirá el almacenamiento en pilas o montones, aun cuando estos se cubran con lonas.
- 1.2.1.1. Si se utilizan silos térmicamente aislados, la mezcla asfáltica puede almacenarse hasta por veinticuatro (24) horas sin pérdida de temperatura o sangrado importante.
- 1.2.1.2. De requerirse largos periodos de almacenamiento, se utilizarán silos que incluyan sistemas de calentamiento que permitan mantener la temperatura de la mezcla, pero cuidando que no se presente sangrado u oxidación de ésta.
- 1.2.2. La mezcla asfáltica en caliente se transportará en vehículos con caja metálica con superficie interior lisa, sin orificios y que esté siempre limpia y libre de residuos de mezcla asfáltica, para evitar que la mezcla que se transporte se adhiera a la caja.
- 1.2.3. Antes de cargar el vehículo de transporte, se limpiará su caja y se cubrirá la superficie interior con un lubricante para evitar que se le adhiera la mezcla, utilizando una solución de agua y cal, agua jabonosa o algún producto comercial apropiado. En ningún caso se deben usar productos derivados del petróleo como el diesel, debido a problemas ambientales y posibles daños a la mezcla. Una vez hecho lo anterior, se levantará la caja para drenar el exceso de lubricante.
- 1.2.4. El vehículo de transporte se llenará con varias descargas sucesivas de la mezcla para minimizar la segregación de los materiales pétreos, colocándolas desde los extremos de la caja hacia su centro.
- 1.2.5. Una vez cargado el vehículo de transporte, se cubrirá la mezcla asfáltica con una lona que la preserve del polvo o de otro material contaminante y reduzca la pérdida de calor durante el trayecto.

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

- 1.2.6. El tiempo máximo de transporte dependerá de la pérdida de calor de la mezcla, la que se tenderá y compactará a las temperaturas mínimas determinadas como se indica en la Fracción F.10. de esta Norma.
- 1.2.7. La temperatura de fabricación de la mezcla no deberá incrementarse para lograr que al final de su transporte tenga la temperatura adecuada para el tendido y compactación.
- 1.2.8. El transporte de la mezcla se hará siempre sobre superficies pavimentadas.
- 1.2.9. La longitud del transporte será de sesenta (60) kilómetros como máximo, la que se reducirá un diez (10) por ciento por cada grado de pendiente ascendente, medida como el desnivel de la planta de mezclado y el punto de tiro, dividido entre la longitud de transporte.

J. CRITERIOS PARA ACEPTACIÓN O RECHAZO

La aceptación de los materiales por parte de la Secretaría, se hará considerando lo siguiente:

- J.1. El responsable del estudio geotécnico del banco, determinará a nivel de estudio, que el material cumple con las características y los requisitos de calidad indicados en esta Norma, según el tipo de material requerido en el proyecto, probando muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma, e indicará en cada caso, el tratamiento a que deba sujetarse el material.
- J.2. En caso de que el Contratista de Obra seleccione el banco, será el responsable de demostrar que el material cumple con las características y los requisitos de calidad señalados en esta Norma, con base en lo indicado en la Fracción anterior y de realizar, cuando proceda, el estudio para su tratamiento y obtener la aprobación por parte del Residente. El Contratista de Obra entregará a la Secretaría un certificado de calidad que garantice el cumplimiento de todos los requisitos establecidos en esta Norma, expedido por su laboratorio o por un laboratorio externo, aprobados por la Secretaría.



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

- J.3.** Durante el proceso de producción, con el propósito de controlar la calidad del material al ejecutar la obra, el Contratista de Obra, por cada trescientos (300) metros cúbicos o fracción de material que suministre o recupere en el camino, realizará las pruebas necesarias que aseguren que:
- J.3.1.** El material pétreo de un mismo tipo, para ser modificado con cal o con cemento Portland, estabilizado con cemento Portland o con asfalto, o utilizado en la construcción de bases de mezcla asfáltica o de bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, cuando no proceda de la recuperación en frío de pavimentos asfálticos, cumpla con la granulometría y, en su caso, con el contenido de materia orgánica indicados en esta Norma.
 - J.3.2.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez modificado con cal o con cemento Portland, cumpla con el límite líquido, el índice plástico y el equivalente de arena indicados en esta Norma.
 - J.3.3.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez modificado con cal o con cemento Portland, cumpla con el límite líquido, el índice plástico y el equivalente de arena indicados en esta Norma.
 - J.3.4.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez estabilizado con cemento Portland, cumpla con la resistencia a la compresión simple indicada en esta Norma, en el proyecto o señalada por la Secretaría.
 - J.3.5.** El material pétreo de un mismo tipo, una vez estabilizado con asfalto, cumpla con la estabilidad indicada en esta Norma.
 - J.3.6.** El material pétreo de un mismo tipo, que se emplee en la construcción de bases de mezcla asfáltica (bases negras) o de concreto magro o de baja resistencia, cumpla con la granulometría y el equivalente de arena indicados en esta Norma.
 - J.3.7.** La mezcla asfáltica producida para bases (bases negras), con material pétreo de un mismo tipo, cumpla con el contenido de asfalto indicado en esta Norma.

SCT

19 de 21
15/11/04

CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

N-CMT-4-02-003/04

- J.3.8.** El material pétreo de un mismo tipo, que se emplee en la construcción de bases de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, una vez mezclado con el cemento Portland, cumpla con la granulometría indicada en esta Norma.
- J.3.9.** El concreto hidráulico magro o de baja resistencia, producido con material pétreo de un mismo tipo, cumpla con el revenimiento señalado en esta Norma.
- J.4.** Una vez tendidas y compactadas las capas de base tratada, el Contratista de Obra realizará las pruebas necesarias que aseguren el cumplimiento del grado de compactación y, en su caso, de la estabilidad o la resistencia a la compresión simple, establecidos en esta Norma, en el proyecto o señalado por la Secretaría, de acuerdo con lo indicado en las Cláusulas H. de las Normas N-CTR-CAR-1-04-003, *Capas Estabilizadas*, N-CSV-CAR-4-02-001, *Recuperación en Frío de Pavimentos Asfálticos*, N-CSV-CAR-4-02-005, *Construcción de Subbases o Bases Estabilizadas* y N-CSV-CAR-4-02-006, *Construcción de Subbases y Bases de Concreto Compactado con Rodillo*, según sea el caso.
- J.5.** Además de lo señalado en las Fracciones J.3. y J.4., el Contratista de Obra, por cada tres mil (3 000) metros cúbicos o fracción de material estabilizado con asfalto, de mezcla asfáltica para bases (bases negras) y de concreto hidráulico magro o de baja resistencia, que se hayan producido con un mismo tipo de material pétreo, realizará las pruebas necesarias que aseguren que cumplen con todos los valores establecidos en esta Norma.
- J.6.** Las pruebas a que se refieren las Fracciones J.3. y J.5., se realizarán en muestras obtenidas como se establece en el Manual M-MMP-4-01-001, *Muestreo de Materiales para Revestimiento, Subbase y Base*, y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma. Si el material procede de la recuperación in-situ de pavimentos existentes, se muestreará después de corregido mediante la adición de otro material y mezclado, o inmediatamente después de recuperado si así lo establece el proyecto, para verificar el cumplimiento de las características establecidas en el proyecto.

20 de 21
15/11/04

SCT



NORMAS

N-CMT-4-02-003/04

El Contratista de Obra entregará a la Secretaría los resultados de las pruebas que realice de acuerdo con las Fracciones J.3. a J.5. de esta Norma y será motivo de rechazo por parte de la Secretaría, el incumplimiento de cualquiera de los requisitos establecidos en esas Fracciones.

- J.7. En cualquier momento, la Secretaría podrá verificar que los materiales suministrados para la construcción de bases tratadas, cumplan con cualquiera de los requisitos de calidad establecidos en esta Norma, siendo motivo de rechazo el incumplimiento de alguno de ellos.

