



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ACATLÁN

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE
PAVIMENTOS RIGIDOS



T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
JOSE ANTONIO MARTIN HERNANDEZ SANTOS

ASESOR: ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA

FEBRERO, 2000





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.



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLÁN"
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

SR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ SANTOS.
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.
PRESENTE.

En atención a su solicitud presentada con fecha de 13 de diciembre de 1963, me complace que esta Jefatura de Programa aprobó el tema que propuso, para que lo desarrolle como profesional de INGENIERO CIVIL.

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS".

INTRODUCCION

1. PANORAMA GENERAL DE LA UTILIZACIÓN DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS.
2. DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE ACUERDO A SU UTILIZACION.
3. TRABAJOS PREVIOS Y MATERIALES.
4. CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS
5. ADOQUINES DE CONCRETO Y AVANCES TECNOLÓGICOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.

CONCLUSIONES.

Asimismo fue designado como asesor de tesis el ING. FERNANDO FAVELA LOZOYA, piense en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio de tiempo mínimo de seis meses, como requisito básico para sustentar examen profesional en la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprime en cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Esta comunicación deberá publicarse en el interior del trabajo profesional.

ATENTAMENTE.
" POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU "
Acatlán Edo. de México a 24 de febrero del 2000.

Jefe del Programa

Ing. Enrique del Castillo Fragoso



ENEP-ACATLÁN
JEFATURA DEL
PROGRAMA DE INGENIERÍA

A mis Padres

Sr. José Antonio Hernández Cruz
Sra. María del Pilar Santos Aguirre.

Con todo mi cariño, agradecimiento y respeto.

A mi esposa.

Sandra Ramírez Vázquez

La compañera de mi vida

Porque debemos ser uno solo, frente a los
favores y desafíos de la fortuna.

A mis Hijos

María Fernanda Hernández Ramírez.
José Pablo Hernández Ramírez

Espero que este trabajo sea motivo de superación para ustedes y recuerden que las metas y los objetivos que uno se fija se alcanzan en base al ser tenaz en el trabajo así como en el estudio

A los Ing. Fernando Favela Lozoya.
Ing. Jorge Uriarte García.
Ing. Armando Hernández Trejo.

Por su gran apoyo para la realización de esta tesis.

A la Escuela Nacional de Estudios
Profesionales Acañan.

A mi Universidad Nacional Autónoma de
México, mi agradecimiento profundo.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RÍGIDOS"

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RÍGIDOS"

I N D I C E

INTRODUCCION	2
OBJETIVOS	4
Objetivo General	
Objetivo por Capítulo	
CAPITULO I PANORAMA GENERAL DE LA UTILIZACION DE LOS PAVIMENTOS RIGIDOS.....	5
I.1 Uso de los pavimentos rígidos en México y en otros países.....	5
I.2 Ventajas y desventajas	8
I.3 Pavimentos de concreto en ciudades.....	11
CAPITULO II DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS EN CARRETERAS.....	24
II.1 <i>Análisis y procedimiento de Diseño</i>	24
II.2 Diseño del espesor y período de vida del diseño de pavimentos.....	38
II.3 Ejemplos ilustrativos.....	41
CAPITULO III TRABAJOS PREVIOS Y MATERIALES.....	47
III.1 Elaboración de subrasante, terracería y subbases	47
III.2 Propiedades y prueba de los materiales para asegurar su calidad	57
III.3 Propiedades del concreto y proporcionamiento de los materiales.	71
CAPITULO IV CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS.....	79
IV 1. Descripción y Selección del Equipo Para Fabricación y Colocación del Concreto.....	79
IV.2. Colocación, Compactación y Curado del Concreto Hidráulico... ..	86
IV.3. Descripción, Construcción y Sellado de los Diferentes Tipos de Juntas... ..	90
CAPITULO V ADOQUINES DE CONCRETO Y AVANCES TECNOLOGICOS EN PAVIMENTOS RIGIDOS.....	106
V.1 Panorama Actual.....	106
V.2 Adoquines de concreto para tránsito ligero y pesado.....	109
V 3. Avances Tecnológicos en Pavimentos	119
CONCLUSIONES.....	133
INDICE DE TABLAS, GRAFICAS Y FIGURAS.....	136
REFERENCIAS.....	138

INTRODUCCION

Las vías de comunicación han influido enormemente en el desarrollo de todos los países del mundo, por su importancia social, política y económica; permitiendo, con las excelencias de la facilidad del transporte, la prosperidad de las sociedades dentro de las necesidades del mundo moderno

Socialmente consideradas las vías de comunicación traen como consecuencia el acercamiento de los grupos sociales aislados y dispersos por los accidentes del terreno.

Económicamente se ha visto cómo las vías de comunicación ensanchan el comercio, extienden la industria y hacen crecer la vida económica

En la vida moderna no puede sostenerse con eficacia la sociedad, si no cuenta con una red adecuada de vías de comunicación

Desde 1925, fecha en la que inició la construcción de sus carreteras, México no ha dejado de aumentar su red de carreteras, ya por motivos económicos, ya para aprovechar las ventajas del turismo internacional o ya por motivos de carácter puramente nacional.

Por tal motivo, una de las alternativas a utilizar en México son los pavimentos rígidos, que hasta ahora han sido muy poco utilizados en comparación con otro tipo de pavimentos como los flexibles.

El pavimento es una estructura constituida por varias capas de materiales, que tiene por objeto permitir el tránsito de vehículos en forma cómoda, segura y eficiente, con un costo mínimo

Los pavimentos de concreto hidráulico o pavimentos rígidos, como también se les designa, difieren de los pavimentos de asfalto o pavimentos flexibles; primero en que poseen una resistencia considerable a la flexión, y segundo, en que son afectados grandemente por los cambios de temperatura.

Se considera un pavimento rígido, aquél cuyo elemento fundamental resistente sea una losa de concreto hidráulico; en cualquier otro caso, se considera el pavimento flexible. Los pavimentos de concreto hidráulico están sujetos a los esfuerzos siguientes:

- a) Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos
- b) Esfuerzos directos de compresión y acortamiento causados por las cargas de las ruedas
- c) Esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas de las ruedas
- d) Esfuerzos de compresión y tensión causados por la expansión y contracción del concreto.
- e) Esfuerzos de compresión y tensión debidos a la combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura

En virtud de estar los pavimentos rígidos sujetos a los esfuerzos ya anotados, es notorio que para que éstos cumplan en forma satisfactoria y económica la vida útil que de ellos se espera, es necesario que su proyecto esté basado en los factores siguientes:

- a) Volumen, tipo y peso del tránsito a servir en la actualidad y en un futuro previsible
- b) Valor relativo de soporte y características de la subrasante.
- c) Clima de la región
- d) Resistencia y calidad del concreto a emplear

Si en el proyecto de estos pavimentos no se toma en cuenta alguno de los puntos mencionados, el pavimento no será económico. Así, por ejemplo, si los espesores de las losas de concreto son muy elevados, es decir, si su capacidad de carga es superior a la que realmente soporta, su comportamiento será satisfactorio, pero su costo de construcción será excesivo. Por el contrario, si los espesores son menores que los requeridos para las cargas que soportará su vida de servicio, tendrá un costo de conservación muy alto y por lo tanto antieconómico y con un comportamiento poco satisfactorio.

La utilización del concreto hidráulico para pavimentos está extendido en todas las ramas de la construcción, principalmente en los países desarrollados, ya sean caminos, aeropuertos, fábricas, obras portuarias, obras hidráulicas, urbanizaciones, etc.

Continuamente se están requiriendo mayores volúmenes de pavimentos de concreto hidráulico, ante todo en áreas expuestas a excesivo desgaste o materiales corrosivos.

El pavimento de concreto hidráulico puede soportar excelentemente todas las condiciones de tráfico intenso pesado, materiales químicos corrosivos y dañinos en relación a otros tipos de pavimentos, sin afectar su calidad y durabilidad. Sin embargo, como el concreto hidráulico es de sencillo manejo, muchos constructores abusan de los procedimientos de colocación inadecuado, obteniendo como resultado pavimentos de mala calidad y de poca durabilidad.

Un pavimento de concreto hidráulico que se ha construido respetando y cumpliendo con las especificaciones, prácticamente no tendrá costos adicionales de conservación o mantenimiento durante su vida de proyecto.

La poca utilización de estos pavimentos se debe a diferentes causas, tales como inversión inicial elevada, poco conocimiento del proceso constructivo y la poca tecnología que se tenía. Sin embargo, en los últimos 20 años la industria de la pavimentación con concreto ha progresado considerablemente en la construcción de carreteras.

Por considerar a los pavimentos rígidos como una de las alternativas más viables (por sus características), para la construcción de carreteras, el presente estudio se enfoca a fomentar su utilización en México.

Otro tipo de pavimentos que mencionaremos por sus características son los adoquines de concreto. La utilización de estos adoquines ofrece mayores ventajas que otros tipos de acabado de pavimento, ya que desde el punto de vista estético lucen mejor, se adaptan fácilmente a trazos complicados, tienen una larga duración y no se ven afectados por los derrames de aceite.

Ahora bien, en áreas propensas a hundimientos diferenciales del terreno, como son las zanjas rellenadas o los terrenos recuperados, los adoquines presentan la peculiaridad de poder ser levantados, y la mayoría de ellos podrá volver a usarse.

Por último, creemos que en México, a través de los avances tecnológicos en los equipos, se aumenta la determinación de los contratistas y la competitividad de los costos, la pavimentación con concreto gozará de un incremento en la participación del mercado durante las próximas décadas.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

OBJETIVOS

Objetivo General

Presentar una alternativa para la pavimentación a base de la utilización de una estructura rígida empleando el concreto hidráulico, mismo que permite bajos costos de conservación y una vida útil de por lo menos 20 años. Actualmente se tienen muchos problemas con los pavimentos en México, ya sea en ciudades o carreteras, por lo que se requieren otras alternativas que mejoren la calidad del servicio.

Objetivos particulares

CAPITULO I PANORAMA GENERAL DE LA UTILIZACION DE LOS PAVIMENTOS RIGIDOS.

Dar a conocer el desarrollo de pavimentos rígidos en nuestro país, mostrando algunos aspectos en otras naciones, presentando las ventajas y desventajas que se tienen entre pavimentos rígidos y flexibles, mostrando el diseño y construcción de pavimentos rígidos en ciudades para estimular su aplicación.

CAPITULO II DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS EN CARRETERAS.

Dar a conocer el diseño de pavimentos rígidos en carreteras con el propósito de encontrar el mínimo espesor que implique el costo anual más bajo posible, incluyendo tanto el costo inicial como los costos de conservación presentando los factores que intervienen y ejemplos ilustrativos.

CAPITULO III TRABAJOS PREVIOS Y MATERIALES.

Informar de los trabajos previos a la colocación del concreto hidráulico, como son las terracerías, subrasante y subbases mostrando las características de los suelos y los medios para mejorarlos e indicando las propiedades de los materiales y sus pruebas para asegurar su calidad. También se presentan proporcionamientos de materiales como guía para obtener una buena calidad.

CAPITULO IV CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS

Describir los equipos para la fabricación y colocación del concreto y así tener alternativas para la selección de los mismos.

Conocer la colocación, compactación y curado del concreto hidráulico y la descripción de los diferentes tipos de juntas, el diseño y construcción de las mismas para asegurar la capacidad estructural y la uniformidad de la superficie de rodamiento al más bajo costo anual posible.

CAPITULO V ADOQUINES DE CONCRETO Y AVANCES TECNOLOGICOS EN PAVIMENTOS RIGIDOS.

Mostrar otras alternativas de pavimentos rígidos como lo son los adoquines de concreto, su panorama actual y uso en otros países así como su diseño y construcción para tránsito ligero y pesado. Otro avance es el concreto compactado con rodillos como una de las alternativas más usada en varios países como Australia, Canadá, Estados Unidos y España entre otros.

CAPITULO I

PANORAMA GENERAL DE LA UTILIZACION DE LOS PAVIMENTOS RIGIDOS

I.1. USO DE LOS PAVIMENTOS RIGIDOS EN MÉXICO

El uso de pavimentos rígidos en México ha sido muy limitado siendo Presidente de la República el Gral. Abelardo Rodríguez, se inicia la construcción de pavimentos de concreto hidráulico en el Distrito Federal. Se pavimentaron importantes calles de la ciudad de México, como San Juan de Letrán y la Av. Juárez, y también se construye la primera carretera de concreto del país, para comunicar Villa Obregón con el Desierto de los Leones (1933 - 1934), con una longitud de 23 km. y un costo aproximado de 800,000 00 (OCHOCIENTOS MIL PESOS 00/100 M.N.) la que aún se encuentra en buenas condiciones de servicio

En el año de 1993 se realizó la rehabilitación del pavimento del libramiento Ticomán en el estado de Morelos con una longitud de 8.35 km, con la tecnología del sistema Whitetopping, que consiste en la construcción de una sobrecarpeta de concreto hidráulico sobre un pavimento asfáltico existente.

Actualmente se realiza la rehabilitación de la autopista México-Querétaro con este mismo sistema WT Colocando una sobrecarpeta de concreto hidráulico de 30 cms de espesor.

En los aeropuertos del país el uso de este tipo de pavimentos es más frecuente, ya que los 56 aeropuertos principales con que cuenta la red aeroportuaria, los pavimentos rígidos se han utilizado en aproximadamente el 50% de ellos, integral o parcialmente, aunque las especificaciones de rodamiento difieren de las utilizadas en carreteras y ciudades

La utilización de este tipo de pavimentos es mayor en las ciudades, con un uso frecuente en calles, estacionamientos, pisos, patios industriales, fábricas e industrias.

En Guadalajara, por ejemplo, el incremento en este tipo de estructuras ha sido muy acelerado, ya que actualmente la ciudad en su zona metropolitana, tiene 2.5 millones de habitantes, en comparación con el año 1960 que contaba con casi un millón de habitantes, esto representa un crecimiento extraordinario. Se cuenta con 21.5 millones de metros cuadrados de calles en total, de las cuales 17.0 millones están pavimentadas, de éstos el 59% corresponde a pavimentos de concreto hidráulico, y este porcentaje aumenta día a día.

Países como Canadá, Inglaterra, Australia, Francia y los Estados Unidos entre otros, comenzaron la construcción de pavimentos de concreto durante los años veintes y treintas, los cuales se han venido estudiando desde entonces. Instituciones como la Portland Cement Association (PCA), Transportation Research Board, el American Concrete Institute, AASHTO, y algunas otras en los Estados Unidos se han dedicado continuamente al estudio del comportamiento de pavimentos bajo diferentes características.

A principio de los años veintes, se realizó la prueba de camino de Bates Illinois (USA) donde propusieron procedimientos de diseño de espesores, en la misma década, en Pittsburg, Pennsylvania se comparó en una prueba de caminos, el pavimento sencillo con el pavimento reforzado, el cual no mostró ventajas especiales a favor del reforzado, en los años treinta la mayoría de los pavimentos de concreto fueron diseñados con refuerzo de malla y alguna combinación de juntas de expansión y de contracción.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

En la década de 1930 se construyó la primera gran autopista que conectaría a dos grandes ciudades: la autopista de Pennsylvania. Esto abrió una nueva fuente de financiamiento para la pavimentación, cobrándoles a los usuarios peaje, en vez de financiar la pavimentación de fondos públicos.

Hasta principio de los años cuarentas, se consideraba que la subrasante no ejercía efectos importantes sobre el diseño y el comportamiento de pavimentos, el concreto se colaba sobre la terracería existente o sobre el terreno, sin prestar atención especial al diseño del suelo, prácticamente se desconocía la tecnología e ingeniería de suelos. El tránsito era relativamente ligero y por lo mismo, las fallas del pavimento no eran tan frecuentes como para representar un problema de importancia, por lo que al incrementarse el tránsito, y con el avance de los estudios de la mecánica de suelos cambió radicalmente el diseño. Se continuó con la realización de caminos de prueba, Illinois (1946) y Ohio (1947), donde se realizaron, entre otros estudios, mediciones detalladas del bombeo y comportamiento de pavimentos.

A fines de los años cuarentas, se desarrolló en California el uso de subbases granulares iratadas con cemento. Países como Inglaterra, Francia, y algunos Estado de la Unión Americana, como California, Florida, Utah y Georgia, adoptaron bases de concreto pobre. Durante la Segunda Guerra Mundial, algunas instituciones como el Bureau of Public Roads fomentaron el pavimento sin acero para aumentar la disponibilidad de acero para la guerra, tuvieron buenos resultados. Años más tarde, esta misma institución, en conjunto con los Estados de Illinois, Nueva Jersey, Texas y California, se agrupan para construir cuatro secciones para probar el pavimento de concreto continuamente reforzado, todas se comportaban bastante bien (la mayoría aún está en servicio).

En 1949, se desarrolló la primera pavimentadora de cimbra deslizante. El procedimiento se utilizó por primera vez en un camino rural de Iowa, donde se demostró que la capacidad de un pavimento de concreto de 110 mm de espesor, soportaba un tránsito normal, de las granjas a los mercados de distribución durante casi 30 años, actualmente varios condados de Iowa cuenta con casi 6,500 kilómetros de pavimento de 15 cm de espesor construido, con pavimentadora deslizante.

La tecnología en construcción de pavimentos rígidos comenzó a tener mayor desarrollo en la década de los 50 y 60's, ya que la industria en los Estados Unidos estaba interesada en las oportunidades que ofrecía el sistema interestatal y en la gran cantidad de nuevos aeropuertos que se construyeron debido a los viajes en jet. Con este nuevo tipo de construcción, la tecnología empezó a florecer y tanto los ingenieros como los operadores dieron un nuevo giro a su trabajo, ya que el rendimiento y la rapidez para construir eran la orden del día. La pavimentación de un kilómetro por día tan codiciada y con frecuencia tan difícil de alcanzar, se convirtió en una norma. La atención se dirigió completamente a la capacidad para pavimentar grandes volúmenes.

Varios países europeos y las dependencias militares de Estados Unidos se interesaron a finales de los años cincuenta en la posibilidad de utilizar pavimentos reforzados, tanto en caminos como en aeropuertos. En el Reino Unido, Francia, Bélgica, Suiza, Alemania y Holanda, se hicieron muchas investigaciones y se construyeron muchos pavimentos experimentales.

En Estados Unidos, la Marina y los Cuerpos de Ingenieros construyeron secciones de prueba y las sometieron a tránsito acelerado y, posteriormente construyeron proyectos a escala natural para pistas de taxi en la Base Biggs de la fuerza aérea y en la estación aeronaval de Le Moore en California, las que todavía están en servicio.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Por otro lado, en Brasil, en 1977, se presentó un trabajo sobre el diseño de una pista presforzada que ya ha sido terminada. Recientemente se construyeron cuatro proyectos de carreteras en Estados Unidos, así como un nuevo recubrimiento de concreto presforzado fue construido en 1981 en el aeropuerto internacional O HARE de Chicago.

Los países europeos aparentemente han perdido interés en los pavimentos presforzados para carreteras, ya que desde 1962 no han construido ninguno. Sin embargo, el interés por los pavimentos presforzados para aeropuertos ha sido muy elevado, particularmente en Alemania.

Así, algunos países y Estados de USA han empleado extensamente los pavimentos de concreto, construyendo muchos kilómetros de pavimentos con diferentes métodos de diseño sencillo, reforzados, continuamente reforzado o presforzado, cualquiera tendrá un buen comportamiento si la subrasante, la subbase, las juntas y el acero, se han considerado apropiadamente en el diseño y si se ha pronosticado bien el tránsito operado.

En los Estados Unidos se utiliza aproximadamente el 22% del cemento que consume el país, en pavimentación y transportación.

Como se puede concluir, los pavimentos de concreto hidráulico han tenido mayor uso y auge en países desarrollados, esio por las características económicas de estos países.

1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En este capítulo analizaremos algunas de las ventajas y desventajas de los pavimentos rígidos, comparándolos en algunos casos con los pavimentos flexibles.

- * La diferencia principal entre estos pavimentos, es la forma en la cual distribuyen las cargas sobre el terreno de soporte. Los rígidos, a causa de su módulo de elasticidad alto y su rigidez, tienden a distribuir la carga sobre un área del suelo insignificante, por lo que gran parte de la capacidad estructural del pavimento es proporcionada por la losa de concreto en sí misma. Por otro lado, los pavimentos flexibles funcionan con el principio del sistema de capas para obtener la capacidad estructural de soporte de cargas de los mismos, debiendo tener la capa más resistente y de más alta calidad en la superficie.
- * Dichas ventajas y desventajas constituyen los factores de selección. Podemos definir dos criterios de selección entre pavimentos rígidos y flexibles, el estructural y los costos, éstos agrupan los siguientes factores:

ESTRUCTURAL	COSTOS
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Capacidad estructural del pavimento/terreno de soporte ➤ Vida útil ➤ Mantenimiento y conservación ➤ Factores regionales ➤ Materiales 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Financiamiento ➤ Inversión inicial/mediana y largo plazo ➤ Mantenimiento/reconstrucción ➤ Resistencia a los agentes contaminantes ➤ Limitaciones de construcción ➤ Materiales

- * Cabe mencionar que los factores para decisión listados pueden influir terminantemente con uno solo. Actualmente el criterio ha sido gobernado por factores de costo
- * Se ha comprobado que tanto el factor capacidad estructural de un pavimento ligado directamente al terreno natural de soporte y su comportamiento, son factores terminantes en forma aislada para la decisión en la selección del diseño de pavimentos rígidos o flexibles
- * Para el cálculo de la capacidad estructural del pavimento, se requiere de un conocimiento detallado del tipo de resistencia, propiedades características y drenaje natural de terreno de soporte
- * Por ejemplo, si sobre un terreno natural con capacidad de soporte pobre y cuyos componentes son materiales altamente reactivos (por ejemplo, arcillas expansivas) se coloca una losa de concreto rígida muy resistente, el comportamiento del suelo al modificarse sus condiciones naturales, puede llegar a deteriorar al pavimento aceleradamente.
- * El factor vida útil para la decisión de un pavimento rígido o flexible teóricamente no debería ser determinante, puesto que un pavimento rígido o flexible bien diseñado, bien construido y cumpliendo especificaciones totalmente, no debiera presentar problemas ni reducciones a lo largo de su servicio en vida útil, sin embargo se ha observado en algunos casos que aunque el proyecto fue adecuado, su índice de servicio actual y terminal es menor en el caso de pavimentos flexibles, que en el caso de pavimentos rígidos
- * El mantenimiento es un factor de vital importancia para la selección del pavimento, ya que todo pavimento, cualesquiera que sea su clase y categoría requiere forzosamente de mantenimientos preventivos y correctivos con el objeto de alcanzar su vida útil,

proporcionando un servicio adecuado y seguro. Se estima que el mantenimiento de un pavimento rígido, a lo largo de su vida útil, es menor y resulta menos costoso que el de un pavimento flexible, por lo que este factor resulta menos costoso y pudiera ser determinante en la preferencia de un pavimento rígido contra un pavimento del tipo flexible.

- * En lo que respecta al factor regional, en México generalmente no se tiene mucho problema con climas extremos que estén sujetos a fuertes variaciones naturales, dependiendo de las temperaturas existentes en la región. Agentes naturales, como pudieran ser, nevadas, temperaturas muy altas o muy bajas. Es conveniente analizar en los estudios preliminares la susceptibilidad que podrían tener los dos tipos de pavimentos, para así determinar la factibilidad y conveniencia de emplear unos u otros materiales.
- * El financiamiento pudiera influir en el criterio de decisión, tal sería el caso de un financiamiento externo en el que se aprobara originalmente un diseño de pavimento rígido, aunado a costos iniciales mayores; dependiendo las tasas de interés del préstamo otorgado, el factor decisión financiamiento puede influir en los costos a largo plazo y determinar que fuera más conveniente el erogar una inversión inicial menor, como lo es el pavimento flexible.
- * El criterio de selección en función del costo en nuestro país, ha obedecido generalmente al presupuesto inicial disponible, y debido a los escasos recursos de que se dispone para estas obras de infraestructura, los pavimentos usualmente fueron diseñados y construidos con concreto asfáltico.
- * Considerando que el pavimento de tipo flexible requiere de un mantenimiento mayor y más frecuente, y en ciertos casos su rehabilitación y construcción parcial o total, es tiempo de cambiar radicalmente el criterio y pensar que lo barato resulta caro a largo plazo, puesto que a lo largo de la vida útil del pavimento y debido al mantenimiento más frecuente y al alto costo en esta época, aunque el rígido fuera más caro inicialmente, a largo plazo resultaría más económico. Sin embargo, este criterio no debiera ser mandatorio en ciertas regiones de nuestro país, debido a los tipos de suelo, pues hay otros factores que en forma aislada o en interacción con otros pudieran hacer que el factor de decisión costo no sea el mandatorio.
- * Los agentes contaminantes, como el derrame de combustibles, deterioran aceleradamente cualquier pavimento, presentando mucha mayor resistencia a estos agentes el pavimento de concreto hidráulico.
- * Es común detectar erosión en el pavimento flexible por la vegetación en los acotamientos, debido a una mala conservación y en donde la vegetación adyacente materialmente carcome al pavimento, no observándose este tipo de efecto en pavimentos hidráulicos.
- * Entre las limitaciones de construcción más frecuentes que se pueden mencionar, están la carencia o existencia de bancos de ciertos materiales que componen las estructuras de un pavimento rígido o flexible, ya que la disponibilidad y las distancias de acarreo afectan directamente los costos globales.
- * Con respecto al diseño, la mayoría de los pavimentos de concreto presentan excavaciones mínimas (usualmente se usa sobre la base existente), requiere de menores estándares de iluminación, su resistencia aumenta con la edad, la garnición y la cuneta se integran.
- * También debe considerarse el envejecimiento de los materiales componentes del pavimento, en especial los de la superficie de rodamiento.
- * El pavimento flexible usualmente está más expuesto al envejecimiento que el rígido y los efectos de repeticiones de cargas en el flexible deterioran con el tiempo más aceleradamente los componentes.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Otros factores adicionales que determinan la elección del tipo de pavimento Se Muestran en la Tabla I :

TABLA I - FACTORES ADICIONALES QUE DETERMINAN LA ELECCION DEL TIPO DE PAVIMENTO

CONCEPTO	RIGIDO	FLEXIBLE
CALIDAD DE RODAMIENTO	Mayores problemas en el acabado superficial. Las juntas entre losas suelen ser fuentes permanentes de problemas. Este inconveniente se atenúa notoriamente en losas con acero de refuerzo, al aumentarse sensiblemente el espaciamiento entre juntas, así como también teniendo una adecuada supervisión en la construcción de juntas.	Mayor facilidad para lograr una mejor superficie de rodamiento.
FUNCIONALIDAD	Bajo altos niveles de tránsito, este pavimento llega a ser más ventajoso. La falla más común se manifiesta por agrietamiento, los cuales no suelen afectar la funcionalidad.	Cuando el tránsito es intenso, suele ser común la formación de baches y roderas que afectan seriamente la funcionalidad de pavimento.
AGRIETAMIENTO	Es más probable que en este caso se presenten grietas no controladas sin embargo, éstas suelen ser de poca trascendencia.	El agrietamiento suele influir mayormente en el comportamiento del pavimento.
TEMPERATURA	La temperatura provoca expulsión del sello, descascamiento, levantamiento por dilatación.	Se provoca reblandecimiento, inestabilidad y florado.
RESISTENCIA AL DERRAPAMIENTO	En ambos tipos de pavimentos se requiere adoptar medidas especiales para disponer de una superficie antiderrapante. Sin embargo, la textura superficial del pavimento rígido suele ser más estable que la del flexible.	
FACILIDAD DE REPARACION	Requiere alta especialización, pero las reparaciones pueden hacerse uniformes, nítidas con facilidad.	Es relativamente sencilla, sin embargo, en caminos de alto tránsito la operación del mismo se ve seriamente afectada.
VISIBILIDAD	En general la visibilidad es mejor que en el pavimento flexible.	
DURABILIDAD	Substancialmente mayor que la del pavimento flexible.	
CONSTRUCCION POR ETAPAS	No aplicable para este tipo de pavimentos, a menos que se recurra a capas bituminosas.	Muy favorable.
CONFIABILIDAD	En condiciones críticas o particularmente difíciles, ofrece mayores garantías que el flexible.	

1.3 PAVIMENTO DE CONCRETO EN CIUDADES

El incremento de población de nuestro país, ha traído como consecuencia el crecimiento desmesurado de las áreas urbanas, así como la planeación y construcción de nuevos centros urbanos

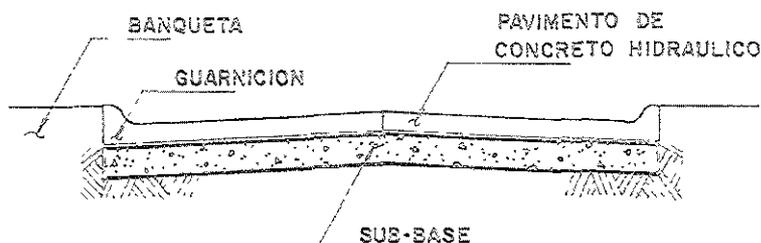
Uno de los puntos que destacan dentro de los servicios municipales, es la pavimentación de calles y avenidas, no solo, por la importancia que en sí revista desde el punto de vista urbanístico, sino por el monto de la inversión inicial requerida y sobre todo, por el correspondiente al costo de conservación y mantenimiento, el exceso de este último, que requieren los pavimentos inadecuados (tales como bacheo y aplicación periódica de capas de sellos), constituye una fuga innecesaria del dinero de los impuestos, que ahoga económicamente al Municipio, restringiendo las inversiones necesarias en otros renglones.

Los pavimentos de concreto se diseñan considerando tanto el factor económico, como un largo periodo de vida útil. Los factores relacionados con el diseño, para lograr el costo anual más bajo posible son:

1. Clasificación de calles y de tránsito (incluyendo su volumen y los pesos por eje).
2. Diseño del espesor.
3. Vida de diseño.
4. Calidad de concreto.
5. Resistencia de la subrasante y sus características.
6. Diseño geométrico
7. Juntas
8. Especificaciones de construcción.

A continuación en la figura No. 1 se muestra una sección tipo de pavimento rígido

FIGURA 1. SECCION TIPICA DE PAVIMENTO RIGIDO EN CALLES.



CLASIFICACION DE CALLES Y TRANSITO

- Se deben realizar estudios exhaustivos sobre tránsito, y así obtener la información necesaria para el diseño de pavimentos municipales, posteriormente se establece un sistema de clasificación de calles; las cuales de características similares tienen esencialmente la misma

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

densidad de tránsito y la misma intensidad de carga por eje. Se utilizan las siguientes clasificaciones de calles:

- o **Calles residenciales ligeras.**- No son de gran longitud, sus ramales pueden ser cerradas o retornos, dan servicio a tránsito generado por unas cuantas casas o lotes (20 ó 30). Los volúmenes de tránsito son bajos, menores de 200 vehículos por día (vpd), de 1% a 2% de tránsito comercial pesado (camiones de dos ejes y seis ruedas o mayores). Los camiones que utilicen estas avenidas deberán tener una carga máxima sobre eje Tándem de 16.3 ton y de 9 ton sobre eje sencillo.
- o **Calles residenciales.** - Con características similares a las calles residenciales ligeras, pero dan servicio a más casas (60 a 140), incluyendo a aquellas que se encuentran en calles cerradas. En ciudades con un patrón de urbanización del tipo rejilla, el tránsito consiste generalmente de vehículos que sirven a los hogares, y ocasionalmente algún camión pesado. Los Volúmenes de tránsito varían de 300 a 700 vdp, con un 1% a 2% de tránsito comercial pesado por día.
- o **Calles colectoras residenciales.**- Estas, reciben todo el tránsito de las calles residenciales de un área y lo distribuyen a los sistemas de calles mayores. Pueden ser de gran longitud y dan servicio a 140 y 300 hogares o más, y tener volúmenes de 700 y 1500 vpd, con 1% a 2% de tránsito comercial pesado.
- o **Calles colectoras.**- Son las que sirven a varios ramales y pueden tener varios kilómetros de longitud. Pueden servir a rutas de autobuses y a maniobras de camiones de una determinada área, aunque no lo hagan a través de rutas. Los volúmenes de tránsito varían de 2,000 a 6,000 vpd, con 3% a 5% de tránsito comercial pesado. Los camiones que utilicen estas avenidas deberán tener una carga máxima sobre eje Tándem de 17.2 ton y de 10.8 ton máxima sobre eje sencillo.
- o **Arterias.** - Siguen a movimientos mayores de tránsito en áreas metropolitanas que no cuentan con servicio de vías rápidas y llevan tránsito hacia vías rápidas donde sí existen éstas. Las rutas de autobuses y camiones, así como las rutas federales y estatales numeradas, van comúnmente sobre arterias. Podemos dividir a las arterias para propósito de diseño en arterias menores, arterias y arterias mayores, dependiendo del tipo de capacidad de tránsito.
- o **Vías rápidas.** - Se diseñan para mover grandes volúmenes de tránsito a velocidades relativamente altas, para las que se justifican diseños extensos y métodos que se verán más adelante.
- o **Calles comerciales.**- Estas calles constituyen una categoría especial. Proporcionan acceso a tiendas y al mismo tiempo, sirven al tránsito en los distritos céntricos de negocios, se congestionan frecuentemente y las velocidades de tránsito son bajas. Sin embargo, sus volúmenes de tránsito son relativamente altos con un porcentaje bajo de paso de camiones.
- o **Calles industriales.**- Dan acceso a las áreas o parques industriales, el volumen total de tránsito puede estar en los rangos más bajos, pero el porcentaje de camiones con ejes pesados es relativamente grande.
- o Estas clasificaciones de calles, no tienen forzosamente que corresponder a las clasificaciones empleadas en cualquier área metropolitana. Se dan a conocer para indicar en forma general los volúmenes y los pesos por eje de los vehículos que se utilizan, se resumen en la tabla No. 2, los valores son razonables, pero deberán compararse y afinarse con el conocimiento de los patrones locales de tránsito.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA No. 2
Clasificación de calles

Clasificación de calle	Vpd o TDA ambos sentidos	Lotes No.	Vehículos comerciales pesados, 2 ejes, 6 ruedas y mayores		Espesor normal del pavimento de concreto (cm).	Máxima carga por eje (toneladas)	
			%	Número al día		Tándem	Sencillo
Residencial Ligera	200	20-30	1-2	3-5	12.7-15.2	16.3	9
Residencial	300-700	60-140	1-2	6-11	12.7-15.2	16.3	9
Colector Residencial	700-1,500	140-300	1-2	11-23	15.2-17.8	16.3	9
Colector	2,000-6,000		3-5	80-240	15.2-17.8	17.2	10.8
Arteria menor	3,000-7,000		10	300-700	17.8	20.8	15.9
Arteria	6,000-13,000		6-7	360-780	20.3	25.4	13.6
Arteria Mayor	14,000-28,000		5	700-1400	20.3-22.8	29.4	18.1
Comercial	11,000-17,000		3-5	440-680	20.3	25.4	13.6
Industrial	2,000- 4,000		15-20	350-700	22.8	29.4	18.1

DISEÑO DE ESPESOR

Para elaborar un diseño completo es necesario conocer las cargas por eje de vehículos pesados que se esperan durante el periodo de vida de diseño, así como la resistencia a la tensión por flexión del concreto hidráulico y el valor de soporte de la subrasante.

METODO DE DISEÑO

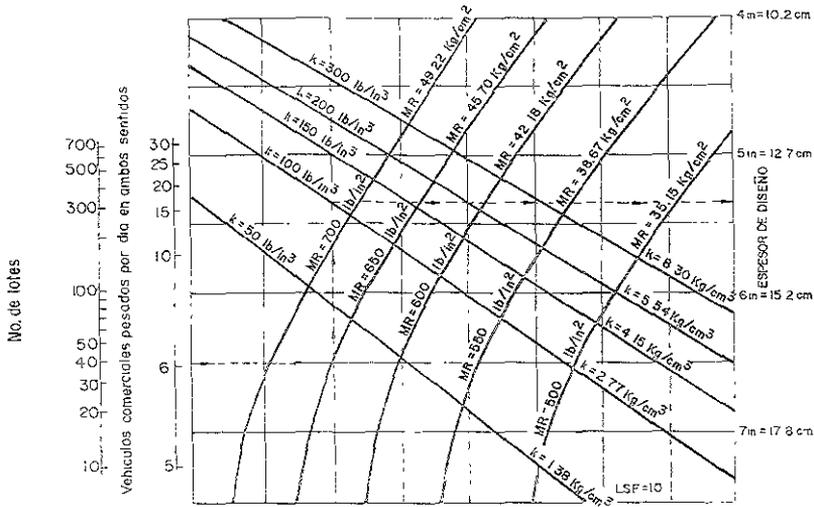
Para realizar un diseño completo se proporcionan una serie de seis gráficas de diseño. Fueron desarrolladas para una clasificación de calles, como se indica a continuación. Gráfica 1 y 2 para calles residenciales ligeras, residenciales y colectoras residenciales.

- ⇒ Gráfica 3 para colectores.
- ⇒ Gráfica 4 para arterias menores.
- ⇒ Gráfica 5 para arterias y calles comerciales.
- ⇒ Gráfica 6 para arterias mayores y calles industriales

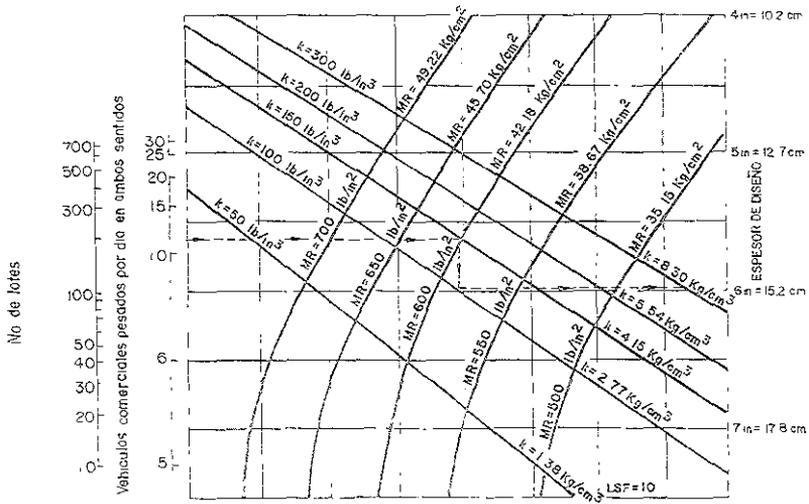
Utilizando la gráfica correspondiente, se procede de la siguiente manera.

1. Encontrar si los pesos máximos por eje, que se muestran en la Tabla No. 2, corresponden a los que operan en la localidad. Los valores de la Tabla No. 2 son razonables, pero probablemente son más pesados que los que se prevén generalmente.
2. Decidir acerca del periodo de vida de diseño de la calle.
3. Estimar el porcentaje medio por día de vehículos comerciales pesados que podrían circular en ambos sentidos durante la vida del diseño. Si no se cuenta con esta información, se deberá hacer un conteo del tránsito de camiones pesados. Si no se hace ningún conteo, se puede usar la información sobre tránsito de la Tabla No. 2 como guía. Una alternativa en el caso de calles residenciales consiste en estimar el número de lotes o casas ubicadas en la zona donde la calle dará servicio.

TESIS PROFESIONAL
 "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"



Gráfica No1 Gráfico de diseño del espesor para calles residenciales y colectores residenciales para un periodo de 35 años



Gráfica No2 Gráfico de diseño del espesor para calles residenciales y colectores residenciales para un periodo de 50 años

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

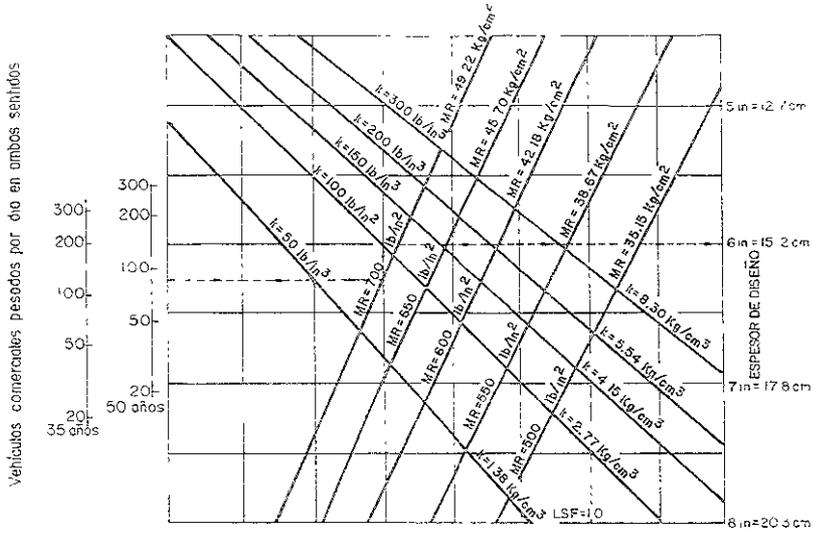


Gráfico No 3 Gráfica de diseño del espesor para calles colectoras para periodos de diseño de 35 y 50 años

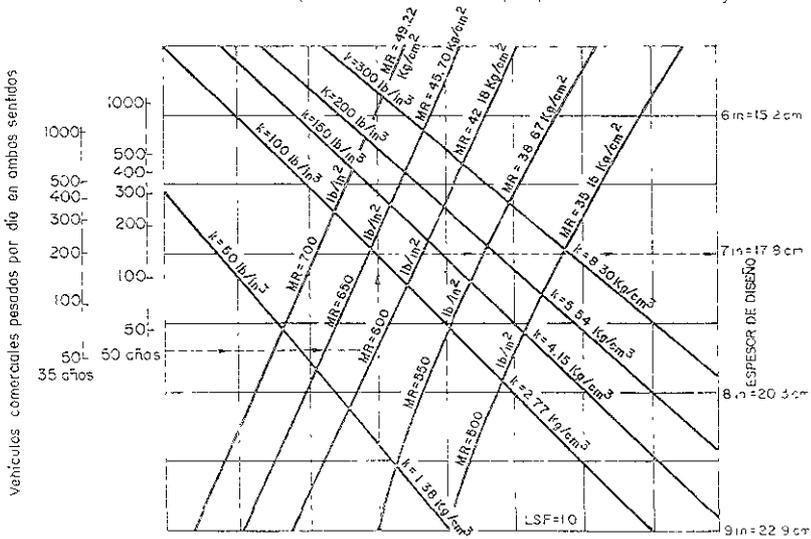


Gráfico No 4 Gráfica de diseño del espesor para arboles menores para periodos de diseño de 35 y 50 años

- 4 Normalmente se utiliza para el diseño el módulo de ruptura (MR) del concreto, a los 28 días de edad.
- 5 El valor soporte de la subrasante se expresa por medio del módulo de reacción "A" Este módulo de la subrasante se determina mediante pruebas de placa. Así mismo, se puede estimar a partir de pruebas de correlación, o puede obtenerse de las guías que se dan en la sección (características y resistencia de la subrasante)
6. Utilizando la gráfica de diseño se entra por el lado izquierdo con el dato de tránsito (vcppd), y se proyecta una línea horizontal hacia la línea MR. Enseguida se continúa verticalmente hasta encontrar la línea del valor de "k", y horizontalmente se llega a la escala que da el espesor de la losa. (La línea punteada en cada gráfica es un ejemplo).

Cabe mencionar que en rutas mayores con carriles múltiples se debe considerar la distribución de vehículos comerciales en cada carril. Para calles con dos carriles en cada sentido, es razonable suponer que de 85% al 92% de los vehículos comerciales transitarán por el carril derecho

PERIODO DE VIDA DE DISEÑO

Un pavimento de concreto se puede diseñar para el periodo de vida que se desee. Conociendo el tránsito, frecuentemente resulta difícil predecir ciertos cambios en el mismo

El tránsito futuro puede tener influencia considerable en el diseño de calles densamente transitadas, y generalmente tienen escaso significado en el tránsito de calles residenciales y poco transitadas. Para los diseños que aquí se presentan, se pueden utilizar periodos de vida del diseño de 35 a 50 años. Es común utilizar un periodo de cincuenta años como base en el diseño de pavimentos especialmente para calles clasificadas como residenciales, ya que rara vez se someten a reorganización o realineación

CARACTERISTICAS Y RESISTENCIA DE LA SUB-RASANTE

Las presiones existentes debajo del pavimento de concreto son muy leves y se distribuyen sobre áreas relativamente extensas, debido a su rigidez y a una capacidad de carga notables. Esta cualidad del concreto de distribuir cargas pesadas, hace innecesario construir subrasantes resistentes de gruesas capas de piedra triturada o grava. En vista de lo anterior, se pueden construir pavimentos de concreto económicos, que tendrán un buen comportamiento en casi todos los suelos.

La subrasante debe estar compuesta por suelo con material y densidad uniforme para obtener un comportamiento satisfactorio en el pavimento.

Cuando se encuentra durante la construcción zonas blandas, éstas deberán excavar y recompactarse con el mismo tipo de material que se encuentra en la subrasante adyacente, ya que si simplemente se retaca material granular extra sobre la zona blanda no podremos obtener un soporte uniforme

Cuando se tiene una subrasante uniforme se puede lograr una reducción sustancial de la contracción excesiva y la ondulación producida por los suelos expansivos, mediante un control adecuado de la humedad y la densidad durante la construcción. La compactación de suelos

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

expansivos con humedad arriba de la óptima de 1 a 3 puntos (en porciento), como lo señala el método estándar AASHTO, mantiene los cambios de volumen dentro de un mínimo.

También reduce la acción diferencial de congelación en los climas nortefños. Se debe poner especial cuidado en compactar el relleno alrededor de los tubos de drenaje, instalaciones de drenaje y otras estructuras permanentes en el área pavimentada. No debe permitirse que la subrasante se seque antes de construir el pavimento.

El valor de soporte de la sub-rasante se expresa como valores de "k", o módulo de reacción de la sub-rasante, y se determina mediante pruebas de placas o mediante correlación con otros valores de soporte (Tabla No. 3). Para el diseño de calles generalmente se utilizan los siguientes valores de "K" (Tabla No. 4)

Aunque en la mayoría de las calles metropolitanas no se requieren subbases en los pavimentos de concreto. En el caso de pavimentos de vías rápidas o arterias por las que transite una cantidad grande de camiones pesados (entre 100 y 200 vcppd en ambos sentidos ó más), se necesitan subbases para evitar que el material fino de la subrasante sea extraído por bombeo.

DISEÑO GEOMETRICO

La práctica común en los nuevos ramales indican que las instalaciones de servicio se coloquen a la derecha del ramal, fuera del área pavimentada para facilitar el mantenimiento y la instalación de nuevos servicios. Se deben evaluar las necesidades presentes y futuras; y tomar provisiones para satisfacerlas. La planeación previa puede evitar que en el futuro se tengan que levantar secciones pavimentadas para aumentar las instalaciones de drenaje.

TABLA No. 3 CORRELACIONES APROXIMADAS ENTRE LOS VALORES DE SOPORTE DE LOS SUELOS

													VALOR DE RESIDENCIA "R"																								
			20			30			40			50			55			60																			
													MÓDULO DE REACCION DE LA SUB RASANTE - k pci por pulgada																								
			100			150			200			250			300			400			500			600			700			800							
													VALOR SOPORTE CBR																								
2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100																		

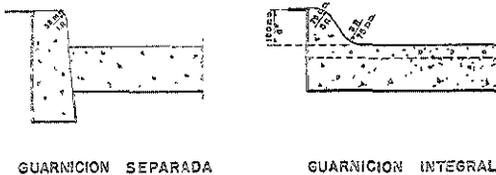
TABLA No. 4 VALORES DE K

k	k	Tipo de Suelo	Calificación.
kg / cm ³	lb/in ³		
2.77	100	limos y arcillas	satisfactorio
5.54	200	suelos arenosos	bueno
8.30	300	grava arenosa	excelente

Una de las formas más prácticas y económicas de construir pavimentos de concreto para las calles metropolitanas, es hacerlas con la guarnición integral como se muestra en la figura 2. Se

construye junto con el pavimento en una sola operación, llevando a cabo todo el trabajo de concreto simultáneamente. Las guarniciones integrales se pueden construir casi con cualquier sección transversal que se desee

FIG. 2 GUARNICIONES TÍPICAS



La construcción de guarniciones integrales ofrecen al diseñador un factor de seguridad adicional, debido al engrosamiento de la sección de la orilla que forma la guarnición. Las tensiones y deflexiones en la orilla del pavimento se reducen, aumentando por consiguiente la capacidad estructural del pavimento. Las ventajas inherentes y la economía de la construcción integral de la guarnición hacen recomendable su consideración para pavimentos de calles metropolitanas.

Los anchos de las calles varían de acuerdo al tránsito que van a soportar. El ancho mínimo que se recomienda, excepto en casos poco comunes, es de 7.5 m, con una pendiente transversal máxima de 2 cm por metro. Es deseable que los anchos y pendientes transversales de un mismo carril sean constantes.

Normalmente, los carriles de tránsito tienen un ancho de 3.05 a 3.66 metros. No se recomiendan carriles con un ancho superior a 3.66 metros, porque la experiencia demuestra que los conductores tienden a rebasar en carriles anchos, ocasionando accidentes.

Los carriles de estacionamiento tienen normalmente un ancho de 2.13 a 2.44 metros. Un carril de 2.13 metros se utiliza en los lugares donde predominan los automóviles de pasajeros. el carril de 2.44 metros es para dar acomodo a camiones. No se recomiendan carriles de estacionamiento de 1.83 metros de ancho. En las grandes avenidas, los carriles de estacionamiento tienen un ancho de 3.05 a 3.66 metros y también se pueden usar como carriles de tránsito o retorno.

En las calles en las que se prohíbe estacionarse, generalmente se destina un carril de 0.61 metros de ancho a lo largo de la guarnición, como espacio no transitable.

JUNTAS

Las juntas deben diseñarse cuidadosamente y construirse de manera que se asegure su buen funcionamiento. Con excepción de las juntas de construcción, que dividen el trabajo de pavimentación en jornadas convenientes, las juntas en pavimentos de concreto se usan para mantener la tensión dentro de los límites de seguridad y evitar la formación de grietas irregulares.

Las juntas longitudinales se colocan para controlar el agrietamiento longitudinal. Generalmente se espacian para hacerlas coincidir con las marcas de los carriles a intervalos de 2.44 a 3.66 metros. El espaciamiento de las juntas no deberá ser mayor de 3.96 metros, a menos que la experiencia local haya demostrado que los pavimentos se desempeñan satisfactoriamente. La profundidad de las juntas longitudinales deberá ser por lo menos igual a la cuarta parte del espesor del pavimento más 1.25 cm

La mayoría de los pavimentos con guarnición integral de las calles metropolitanas, se sostienen mediante el relleno detrás de las guarniciones, lo que elimina la necesidad de usar juntas fijadores longitudinales hechas con varillas o tornillos de tensión

Las juntas transversales de contracción se usan para controlar el agrietamiento transversal. Las juntas de contracción liberan (1) esfuerzos de tensión que ocurren cuando las losas se contraen y (2) esfuerzos de alabeo causados por diferenciales de temperatura y contenidos de humedad dentro de la losa. La mayoría de las juntas de contracción se construyen por medio de aserrado después de que el concreto endurece, ya sea moldeado a mano, o insertando un material prefabricado dentro del concreto plástico. La selección del método se basa, generalmente, en las condiciones ambientales que prevalecen durante la construcción, en las características del agregado, y los costos de operación. En cualquier caso, la profundidad de las juntas en las calles metropolitanas deberá ser igual a la cuarta parte del espesor del pavimento.

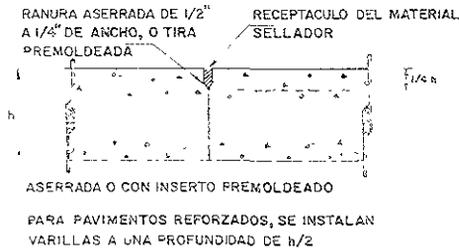
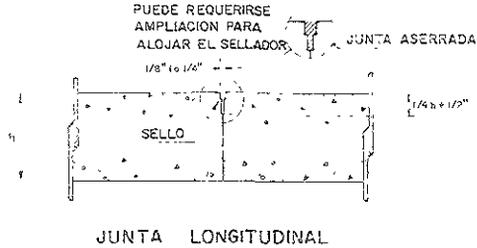
La malla de acero o varilla, como normalmente se emplea solo sirve para proteger las orillas, de la grietas. Las cantidades de acero que se emplean en esta práctica, no aumentan notoriamente la resistencia estructural del pavimento. Si las juntas transversales de contracción se espacian adecuadamente, no aparecerá agrietamiento intermedio, y la distribución de acero se deberá omitir. Por lo tanto, es necesario determinar el espaciamiento de las juntas de contracción que controle el agrietamiento. Generalmente, éste es de 4.57 a 6.1 metros. La mejor guía es la experiencia obtenida en calles que se encuentran en servicio

La necesidad de contar con dispositivos de transferencia de carga en las juntas de contracción, depende de las condiciones de la sub-rasante y del servicio al que esté destinado el pavimento. No se necesitan barras lisas en pavimentos residenciales u otras calles de tránsito ligero, pero se pueden necesitar en arterias diseñadas para soportar los volúmenes y pesos del tránsito de camiones

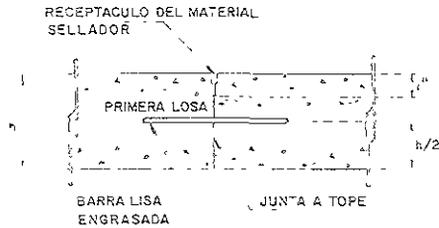
Cuando se espacian correctamente las juntas transversales de contracción, no se necesitan juntas de expansión, excepto en objetos fijos e intersecciones asimétricas, teniendo en cuenta que:

1. El pavimento se construye con materiales de características de expansión normales
2. Las juntas de expansión se espacian a intervalos cortos que evitarán la formación de grietas intermedias.
3. El pavimento se construye cuando la temperatura ambiente está por arriba del punto congelamiento

Si el pavimento se construye en clima frío, o si se utiliza material de característica expansivas anormales, se hacen necesarias las juntas expansivas espaciadas a intervalos de 183 a 244 metros



JUNTA TRANSVERSAL



JUNTA DE CONSTRUCCION

FIG. 3 JUNTAS CONSTRUCTIVAS

ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCION

No importa que tan meticulosamente se diseñe una estructura, no podrá desempeñar la función que de ella se pretende a menos que se tomen todas las precauciones en su construcción para asegurar la calidad de mano de obra en el resultado final. Para esto se necesitan las especificaciones correctas. Pero las especificaciones no son suficientes si no se apoyan adecuadamente con una supervisión competente.

CALIDAD DE CONCRETO

Los esfuerzos críticos en pavimentos de concreto se deben a la flexión más que a la compresión, la resistencia a la flexión (expresada como MR) se utiliza en el diseño, bajo condiciones promedio, el concreto con un MR de 38.5 Kg/cm² a 49 Kg/cm² a 28 días, es el más económico.

Es esencial que la mezcla tenga una relación paja de agua-cemento, un contenido de cemento adecuado, suficientes cantidades de aire incluido y un curado apropiado.

Las cantidades de aire incluido que se necesitan para obtener un concreto resistente al interperismo varían con el tamaño máximo de los agregados. Se recomiendan los siguientes porcentajes:

TAMAÑO MAXIMO DE LOS AGREGADOS (cm)	AIRE INCLUIDO (%)
3.81	5 ± 1
1.90 ó 2.54	6 ± 1
0.95 ó 1.27	7.5 ± 1

Además de hacer más resistente el pavimento de concreto al interperismo, las cantidades de aire incluido se recomiendan mientras el concreto se encuentra en estado plástico, mejorándolo en los siguientes aspectos:

1. Prevención de la segregación
2. Aumento de la trabajabilidad
3. Reducción del sangrado.
4. Reducción de la cantidad de agua necesaria, para una trabajabilidad satisfactoria

Debido a estos beneficios y esenciales efectos, tanto en concreto plástico como endurecido, la inclusión de aire se debe incorporar a todos los diseños de las mezclas de pavimentos de concreto.

Por último, podemos decir que en esencia un pavimento urbano es distinto al de una carretera o aeropista, sin embargo, los parámetros que intervienen en el diseño acusan diferencias importantes que deben tomarse en cuenta apropiadamente. Por ejemplo, el tránsito, aún cuando los vehículos son iguales a los carreteros, su distribución suele ser bastante diferente. De ahí la necesidad de llamar la atención en este punto sobre la necesidad de que reunamos esfuerzos para obtener la información necesaria para la solución racional de este problema, ya que hasta la fecha no existe ningún organismo coordinador de este tipo de información.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Es público y notorio que nuestros pavimentos urbanos (con algunas excepciones, como regla general se encuentran en muy malas condiciones, ya que su vida útil suele ser muy reducida, lo cual debe preocuparnos seriamente a los ingenieros, ya que quizás somos los profesionales que mayor influencia y responsabilidad tenemos en este aspecto. Son múltiples las causas de esta situación; quizás las más importantes sean las siguientes:

1. **Falso concepto de la economía.** Queremos a toda costa construir pavimentos baratos, sin caer en la cuenta de esto, como regla general, conduce a una actitud nefasta, aún cuando en apariencia tratamos de justificarnos aduciendo falta de recursos económicos, lo cual no deja de ser un falso razonamiento.
2. **Cierta falta de conciencia en la importancia que tiene la aplicación de la tecnología apropiada,** tanto en el proyecto como en la construcción del mismo. A menudo los pavimentos son construidos sin ningún estudio previo, siguiendo el juicio personal de algún ingeniero, no siempre suficientemente calificado, o incluso de algún subprofesional que aplica su propia intuición.
3. **En los mejores casos,** cuando se llega a disponer de un proyecto adecuado, el control de calidad durante la obra suele dejar mucho que desear, con el consiguiente demérito.

CAPITULO II

DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS EN CARRETERAS

II.1 ANALISIS Y PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

El propósito del diseño es el mismo que en otras estructuras ingenieriles: encontrar el mínimo espesor que implique el costo anual más bajo posible, incluyendo tanto el costo inicial, como los costos de conservación.

Por lo tanto, se requiere un diseño racional de espesores, que equilibre adecuadamente el costo inicial y los costos de conservación.

BASES PARA EL DISEÑO

Los métodos de diseño de espesores que se presentan aquí son, el de la asociación de cemento Portland de E.U.A. (PCA) y el modificado, basado en los conocimientos derivados de las siguientes fuentes.

- 1 Estudios teóricos del comportamiento de losas de pavimentos, realizados por H.M. Westergaard, G. Pickett y otros investigadores.
- 2 Pruebas en modelos y a escala natural, como las pruebas de Arlington, llevadas a cabo por la oficina de caminos públicos de E.U.A. (burdeau of Public Roads) y las pruebas efectuadas en los laboratorios de la Asociación de Cemento Portland de los Estados Unidos (P.C.A.)
- 3 Pavimentos experimentales sometidos a tránsito controlado, tales como los tramos de prueba de (Bates Test Road), de Maryland Roads Test) de la AASHO (aasho road Test) y la carretera de prueba de Pittsburg, California. (Pittsburg, Calif Test Highway).
- 4 El comportamiento de pavimentos construidos normalmente, sujetos a tránsito normal mezclado

ESFUERZOS ORIGINADOS POR LAS CARGAS

Las anchuras de los carriles tienen efectos importantes en los esfuerzos producidos por el tránsito pesado y en los diseños de espesores para absorber estos esfuerzos. En los carriles de los pavimentos de los años 1920, se usaban generalmente anchuras de 9 pies (2.70 m) y de hecho, todo el tránsito pesado circulaba a lo largo de la orilla exterior del pavimento. Esfuerzos críticos se presentan cuando las ruedas de los camiones pasaban por las esquinas formadas por las juntas transversales y las orillas exteriores del pavimento, bajo la acción de esta carga en la esquina, el pavimento funciona como una viga de cantiliver, de forma triangular, con los máximos esfuerzos de flexión en la parte superior de la losa, a lo largo de la bisectriz del ángulo de la esquina

Sin embargo, con el aumento de la anchura de carril, de 9 a 12 pies (2.70 a 3.60 m), el tránsito se ha desplazado hacia el interior, alejándose de las esquinas y orillas exteriores de las losas. Con el tránsito moviéndose en el interior de las losas, la ubicación de los esfuerzos críticos ha cambiado, de la esquina exterior, a la orilla de la punta transversal

La figura No. 4 muestra las relaciones de los esfuerzos debidos a las cargas, con la distribución del tránsito a través de los pavimentos con anchuras de carriles de 12 pies.

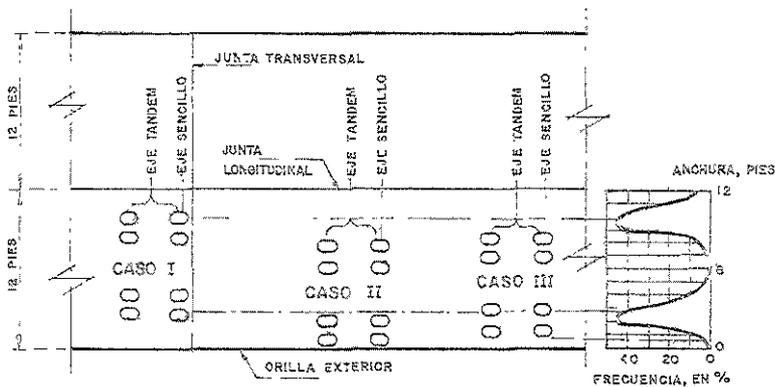
TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

El caso I muestra las cargas en eje sencillo y en eje Tándem, en las orilla de la punta transversal. Los esfuerzos máximos de flexión se presentan en la parte inferior de la losa y son paralelos en la orilla de la junta. Las cargas de los ejes están colocados en el punto de mayor repetición de carga como se ilustra en el diagrama de distribución de frecuencias del tránsito, a la derecha de la Fig. No. 4.

El caso II es para ejes sencillo y en Tándem en la orilla exterior del pavimento. Los ejes son perpendiculares a la orilla y el área de contacto de la rueda exterior, coincide con la orilla del pavimento. Para este caso II, los esfuerzos máximos de flexión se presentan en la parte inferior de la losa y son paralelos a la orilla exterior del pavimento. Estos esfuerzos son un poco mayores que los que corresponden a la posición del caso I, especialmente para cargas en eje sencillo. Sin embargo como se muestra en el diagrama de frecuencias del tránsito, en la Fig. No. 4 las aplicaciones de carga, para la posición del caso II, son muy raras.

El caso III es el mismo que el II, solo que las cargas están a 6 pulg. Hacia adentro de la orilla exterior. Los esfuerzos en la orilla, para la posición del caso III, son mucho menores que los correspondientes a cualquiera de los casos I ó II.

FIGURA 4 POSICIONES DE LAS CARGAS Y DISTRIBUCION DEL TRANSITO.



Los esfuerzos para cargas en ejes sencillos o en Tándem correspondientes a las posiciones de los casos I, II y III, fueron determinados por medio de las cartas de influencia desarrolladas por el Dr. Gerald Pickett y Gordon K. Ray.

Los resultados de los cálculos de esfuerzos, mediante las cargas de influencia, para las tres posiciones de la carga, así como los datos sobre la distribución del tránsito señalados en la Fig. No. 4 nos indican que:

1. El caso I da esfuerzos mayores a los del caso II, cuando las cargas de eje sencillo están a más de 3 pulgadas de la orilla exterior del pavimento. Como resultado de esto, el caso I, da esfuerzos máximos en el 99.9% del tránsito de cargas en ejes sencillos.

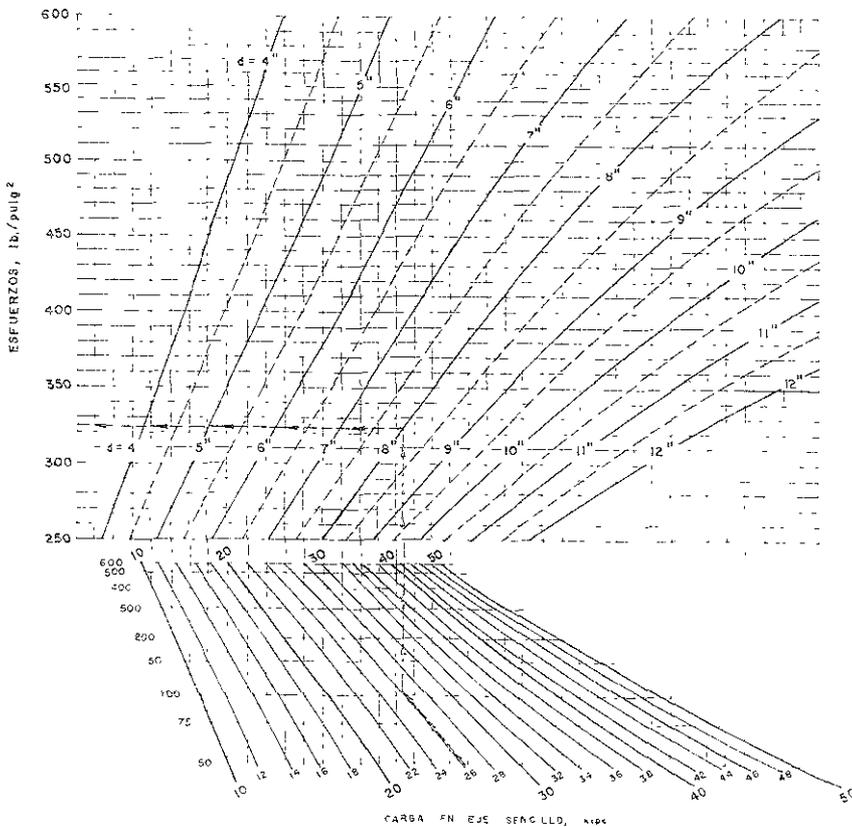
TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

- 2 El caso I da esfuerzos mayores a los del caso II, cuando los ejes en Tándem están a más de 2" de la orilla exterior del pavimento. Como consecuencia de esto, el caso I da esfuerzos máximos en el 99.9% del tránsito en ejes en Tándem.
- 3 El incremento de los esfuerzos para la fracción del 1% del tránsito en o cerca de la orilla exterior del pavimento, no tiene efecto en el diseño de espesores.

Las cartas de diseño correspondiente al caso I, para cargas en ejes sencillos y en Tándem son dos: una es para cargas en ejes sencillos de 10 a 50 kips (1 kip = 1000 libras). (Gráfica No. 7)

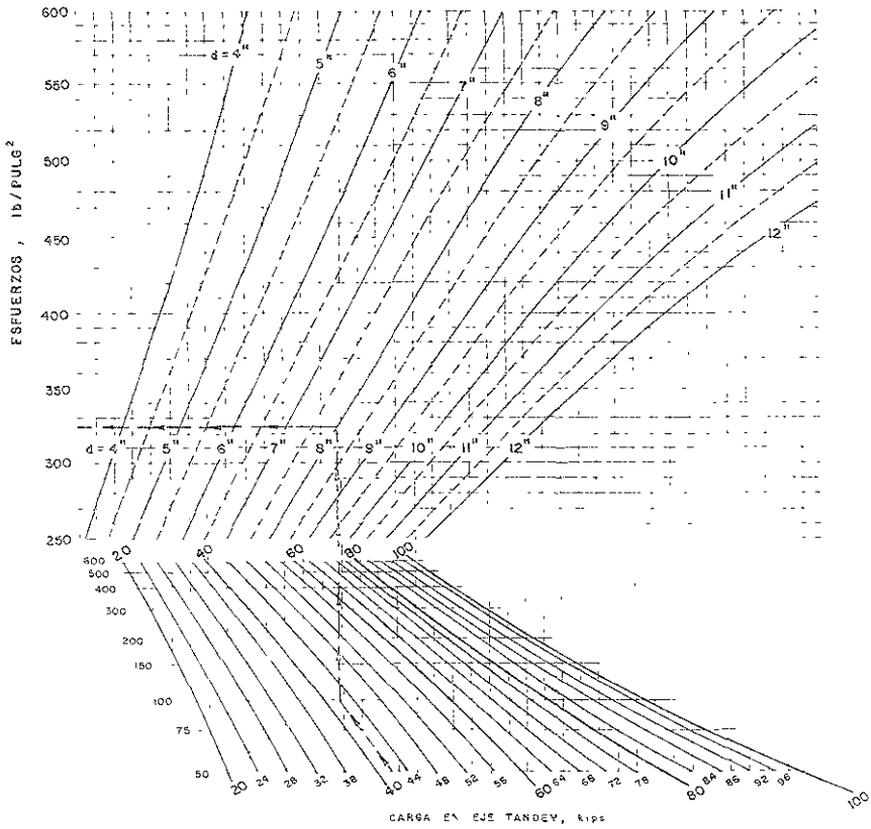
La otra carta es para cargas en eje Tándem de 20 a 100 kips (Gráfica No. 8). Ambas cartas cubren valores de k de 50 a 500 lb/pulg³ (psi), esfuerzos de 250 a 600 lb/pulg² (psi) y espesores de losa de 4 a 12 pulgadas. (El manejo de las cartas se muestra en las mismas por líneas punteadas, con flechas.)

GRAFICA 7.- CARTA DE DISEÑO PARA CARGAS EN EJE SENCILLO, CASO I.



TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

GRAFICA 8.- CARTA DE DISEÑO PARA CARGAS EN EJE TANDEM, CASO I.



ESFUERZOS DE ALABEO

Después de que un pavimento de concreto ha endurecido está sujeto a esfuerzos causados por los gradientes de temperatura y humedad en el propio concreto. En la parte inferior de un pavimento de concreto, los cambios diarios en la temperatura y en la humedad se limitan a rangos bastante estrechos. Sin embargo, la superficie expuesta del pavimento está sujeto a variaciones diarias bastante fuertes en la temperatura y la humedad. Por la noche, la parte superior del pavimento generalmente está más fría que la parte de abajo. De esto resulta que la parte superficial tiende a contraerse, alabeando la losa y levantando sus orillas. Esta tendencia a contraerse y el alabeo resultante hacia arriba, son hasta cierto punto contrarrestados por el peso de la losa. La restricción al alabeo produce esfuerzos de tensión en la parte superior de la losa y esfuerzos de compresión en la parte inferior de la misma.

Durante el día el patrón de esfuerzos a menudo se invierte. La superficie del pavimento generalmente está más caliente que la parte de abajo. Esto hace que la superficie tienda a expandirse y a alabear la losa con los bordes hacia abajo. La expansión y el alabeo resultante hacia abajo son restringidos por la superficie de apoyo, produciendo tensión en la parte inferior y compresión en la parte superior de la losa. (El término "alabeo" se usa también en la tecnología de pavimentos para describir los efectos de los cambios volumétricos diferenciales en materiales de capa subrasante que contienen suelos arcillosos expansivos).

Las diferencias en la humedad de las partes superior e inferior de la losa, producen esfuerzos similares aunque probablemente menos severos; una humedad baja causa contracción y una humedad alta produce expansión. Determinar la influencia que tienen en el diseño de los pavimentos, los esfuerzos producidos por el alabeo restringido es complicado, debido a que los cambios diferenciales de temperatura y humedad producen muchas veces efectos opuestos. Sin embargo, se sabe que los esfuerzos de tensión debidos al alabeo restringido constituyen un factor muy importante en producir grietas transversales adicionales, entre las grietas iniciales causadas por la contracción del concreto. Los esfuerzos por alabeo restringido también dan lugar a grietas longitudinales en pavimentos construidos sin juntas longitudinales debidamente espaciadas.

Afortunadamente, los problemas que se han presentado en los estudios teóricos y experimentales de los esfuerzos de alabeo, no han impedido el desarrollo de diseños adecuados de juntas que contrarresten los efectos del alabeo restringido.

Estos diseños se han derivado de estudios de comportamiento de pavimentos. Los registros de servicio de pavimentos sin juntas, descritos anteriormente, muestran que la combinación de los efectos de las cargas del tránsito y de los esfuerzos por alabeo restringido, son la causa de grietas longitudinales irregulares, a lo largo de las proximidades del centro de línea en pavimentos con anchos mayores de 12 a 16 pies, construidos sin juntas longitudinales. Estas combinaciones de cargas y esfuerzos de alabeo también dan lugar a grietas transversales adicionales entre las grietas producidas inicialmente por la contracción del concreto. (En pavimentos de carreteras y de calles, el espaciamiento entre las juntas longitudinales, dependerá del espesor de las losas y de los requerimientos de servicio. En pavimentos de aeropistas, con espesores mayores de 11 pulgs., una anchura de losa de 25 pies controlará generalmente el agrietamiento longitudinal).

TRANSITO

El número y el peso de los ejes cargados, que se esperan durante la vida de diseño, son factores importantes para la determinación de espesores de los pavimentos de concreto.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Un método para obtener los daños del tránsito que se necesitan para el diseño de espesor, consiste en usar las tasas de crecimiento anual del mismo y los factores de proyección correspondientes. La Tabla No 5 muestra las relaciones entre las tasas de crecimiento anual, los factores de proyección a 20 años y el promedio pesado de los factores de proyección a 40 años. Puede observarse que los valores correspondientes a los promedios pesados, son ligeramente mayores que los factores de proyección a 20 años. No obstante, la diferencia rara vez será lo suficientemente grande para afectar el diseño de espesores efectuado con los factores de proyección.

Los aspectos que influyen en las tasas de crecimiento del tránsito y sus factores de proyección correspondientes son:

- 1.- Tránsito atraído o desviado. Es el incremento en el tránsito existente, debido a un mejoramiento del camino actual
- 2.- Crecimiento normal del tránsito. Es el incremento debido al aumento en el número y uso de los vehículos de motor.
- 3.- Tránsito generado. Es el incremento en los viajes de los vehículos de motor, que no se había tenido si no se realizara el mejoramiento de la obra
- 4.- Desarrollo del tránsito. Es el incremento ocasionado por cambios en el uso de la tierra, que se deben principalmente a la construcción de la nueva obra.

Debido a que los cuatro componentes del crecimiento del tránsito se trasladan y no están claramente definidos, frecuentemente no es posible determinar cómo influye cada uno de ellos en el propio crecimiento del tránsito, para una obra específica. Los efectos combinados darán lugar a tasas de crecimiento anual de cerca de 2, hasta 6%, pero pueden ser mayores en casos especiales.

TABLA No. 5

TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL DEL TRANSITO Y FACTORES DE PROYECCION CORRESPONDIENTES		
Tasa de Crecimiento Anual del Tránsito %	Factor de Proyección a 20 Años (*)	Promedio Pesado del Factor de Proyección a 40 Años (*)
1	1.2	1.2
1 ½	1.3	1.3
2	1.5	1.5
2 ½	1.6	1.7
3	1.8	1.9
3 ½	2.0	2.2
4	2.2	2.5
4 ½	2.4	2.8
5	2.7	3.2
5 ½	2.9	3.6
6	3.2	4.1

* BASADO EN TABLAS DE INTERÉS COMPUESTO PARA $(1+r)^n$, EN DONDE r = TASA DE CRECIMIENTO ANUAL Y n = NUMERO DE AÑOS

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Los estudios de planeación de los departamentos de carreteras son fuentes de conocimiento muy útiles, en relación con el crecimiento del tránsito y sus factores de proyección

Cuando hay duda acerca de la tasa de crecimiento del tránsito puede ser conveniente emplear para el diseño un valor de la tasa más bien alto. Esto es especialmente cierto para rutas entre ciudades o para carreteras urbanas, en donde un elevado desarrollo de las poblaciones puede dar lugar a una tasa de crecimiento del tránsito mayor de la prevista

Las tasas de crecimiento altas para carreteras urbanas, no se aplican a caminos rurales de 2 carriles donde la función principal es el uso de la tierra y el servicio a las propiedades colindantes. Sus tasas de crecimiento del tránsito, pueden ser menores de 2% anual (factor de proyección a 20 años, de 1.5).

Un método de estimar el tránsito para diseño de espesores de pavimentos de concreto hidráulico se basa en la capacidad práctica, que es el máximo número de vehículos por carril y por hora que pueden pasar por un punto dado, bajo las condiciones prevaicientes del camino y del tránsito, sin una demora irrazonable o restringida libertad de maniobrar. Las condiciones prevaicientes incluyen: composición del tránsito, velocidades de los vehículos, clima, alineamiento, perfil, número y anchura de carriles y tipo de la zona.

El término "capacidad práctica" y la capacidad de diseño son numéricamente iguales y esencialmente tienen el mismo significado. Las capacidades de diseño para distintas carreteras de varios carriles, aparecen resumidas en la tabla No. 6

Para obtener la capacidad de carreteras de varios carriles, es necesario convertir los vehículos de pasajeros, por hora Tabla No. 6, a tránsito promedio diario en ambas direcciones (TPD). Para carreteras de varios carriles con flujo de tránsito ininterrumpido, se emplea la fórmula siguiente:

$$TPD = \frac{100 P}{100 + cmh(j-1)} \times \frac{5000 N}{KD} \quad (\text{fórmula I}).$$

en la que

P = Vehículos de pasajeros, por carril y por hora, según la tabla No. 6

N = Número de carriles (total, en ambas direcciones).

Cmh = Porcentaje de camiones, para los valores máximos horarios.
(Cmh = 2/3 TPDC).

J = Número de vehículos de pasajeros, equivalentes a un camión

= 4, en terreno montañoso

= 2, en terreno plano.

K = Volumen Horario de Diseño (VHD), expresado como un porcentaje de TPD

= 15%, para autopistas rurales.

= 12% en autopistas urbanas.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

C = camiones, inclusive solamente unidades sencillas con más de 4 llantas y todas las combinaciones. (no incluye Panels, Pickups, ni otras unidades sencillas con sólo 4 llantas).

D = Porcentaje del tránsito en la dirección que es mayor durante las horas de máximos (de 50 a 75%).

= 67%, para autopistas rurales.

= 60%, para autopistas urbanas.

(la obtención de algunos parámetros se tratan más adelante).

TABLA NO. 6

CAPACIDADES DE DISEÑO PARA CARRETERAS DE VARIOS CARRILES.	
Tipo de Carreteras	Capacidad de diseño, vehículos de pasajeros (*), por carril de 12 pies (3.66 m.) y por hora.
Autopista urbanas con total control de los accesos (50 a 55 km/p/h)	1 500
Autopista sub-urbanas con tal control en los accesos (55 a 65 km/o/h.)	1 200
Autopistas rurales con total o parcial control en los accesos	1 000
Carreteras rurales importantes, con moderadas interferencias por cruces e incorporaciones.	700-900
Carreteras rurales importantes, con considerables interferencias por cruces e incorporaciones.	500-700

* Incluye también panels, Pickups y otros vehículos comerciales de 4 llantas, que funcionan como transporte de pasajeros, en términos de capacidad de tránsito.

Los datos del TPD obtenidos mediante la fórmula anterior o mediante los factores de proyección, son utilizados para obtener el volumen total de vehículos por hora en una dirección, mediante la fórmula No. 2.

$$V_{ph} = \frac{\text{TPD de diseño}}{(\text{No. de Sentidos}) (24 \text{ hrs})} \quad \text{Fórmula No. 2}$$

Para la capacidad de diseño de carreteras de 2 carriles, los factores más importantes son (1), el porcentaje de la longitud total de la obra, en donde la distancia de visibilidad es menor de

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

⇒ Panels y pickups	353
⇒ Otras unidades simples de 4 llantas	76

Por lo tanto para cada estación nos quedaría:

$$\begin{aligned} \text{Est} &= 1645 - (353+76) = 1216 \\ \text{TPDC} &= \frac{1216}{9494} \times 100 = 13\% \end{aligned}$$

Otra de las formas es incluyendo los porcentajes de cada uno de los vehículos contando en la estación de medición de carga, para cada clase de carretera ejemplo:

⇒ Total de unidades simples y combinaciones	21 70
⇒ Panels y pickups	3.83
⇒ Otras unidades simples de 4 llantas	0 92

Total de vehículos de pasajeros	78.30
Total de vehículos	100.00

de estos datos se obtiene:

$$\text{TPDC} = 21.70 - (3.83+0.92) = 17\%$$

Por otro lado la información sobre distribución de cargas por eje, en el tránsito de camiones se requiere para calcular los números de ejes sencillos y en Tándem de diversos tonelajes, que se esperan durante la vida de diseño del pavimento. Cuando se hacen estudios especiales del tránsito, generalmente son adecuados los datos obtenidos de mediciones de carga. Cuando estos datos no son adecuados y cuando no se hacen estudios especiales se pueden emplear los registros de mediciones de carga, para calcular las cargas por eje durante la vida de diseño.

Las cargas por eje aparecen agrupadas usualmente en incrementos de 2000 Lb, para varios tipos de unidades sencillas y combinaciones.

Los datos que aparecen bajo el encabezado "Ejes por 1000 vehículos" en la tabla No. 8, están en forma conveniente para calcular la distribución de cargas por ejes que se usa en el método estándar.

Para obtener los "ejes por cada 1000 camiones" (COL. 3) de la misma tabla, se aumentan los valores obtenidos para ejes por 1000 vehículos. Mediante la relación de todas las unidades simples y combinaciones entre el número de camiones, como se muestra en el siguiente ejemplo.

Total de unidades simples y combinaciones	22189
Panels y pickups	3912
Otras unidades de cuatro llantas	942

$$\text{No. de camiones} = 22189 - (3912 + 942) = 17,335$$

$$\frac{22189}{17335} = 1.28$$

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA NO. 3

NUMERO DE EJES DURANTE LA VIDA DE DISEÑO METODO ESTANDAR DE DISEÑO DE LA P.C.A.			Cargas por eje durante la vida de diseño
Grupos de Cargas por Ejes (*) Kips.	Ejes por cada 1000 vehiculos (**)	Ejes por cada 1000 camiones	Diseño 1
(1)	(2)	(3)	(4)
Sencillo			
28-30	15	.19	3 100
26-28	15	.19	3 100
24-26	.30	.38	6 200
22-24	7 80	10 00	163 200
20-22	30.60	39 20	639 740
18-20	85 60	109.70	1 790 300
16-18	115 00	147 20	2 402 300
Tándem			
52-54	15	19	3 100
50-52	.15	.19	3 100
48-50	1 45	1 86	30 360
46-48	1.45	1.86	30 360
44-46	2 30	2.95	40 180
42-44	7.20	9 22	150 470
40-42	8.20	10.50	171 360
38-40	11 90	15.20	248 060
36-38	12.80	16 40	267 650
34-36	19.50	25.00	408 000
32-34	24 40	31 30	510 870
30-32	43 20	55 30	902 500
Totales	Vehículos 22 189	Camiones 17 335	Camiones 16 320 000

* LOS GRUPOS DE LA PRESENTE TABLA, SE PROPORCIONAN EN GRUPOS DE NO MÁS DE 2 kips. (2000 lb).

** VEHÍCULOS SIGNIFICA TODAS LAS UNIDADES SIMPLES Y LAS COMBINACIONES

El valor obtenido mediante la relación, multiplicado por los obtenidos para ejes por cada 1000 vehículos se dan en la Tabla No. 8 Columna 3. Las columnas 4, 5 y 6 de esta tabla dan repeticiones de varias cargas en eje sencillo y en eje Tándem, que se esperan para una vida de diseño del pavimento de 40 años.

Por otra parte el único cambio importante que implica el método modificado con la asociación de cemento Portland, con relación al método estándar es que el primero, para obtener los datos de cargas por eje que se necesitan para el diseño, requiere de un estudio de clasificación de los vehículos. Los pasos que se deben seguir para aplicar el método modificado son los siguientes

- 1 - Se hace un conteo de clasificación de vehículos para la obra de que se trata, durante 24 horas y en uno o más días de la semana.

Las clases de vehículos que se cuenta son:

- a) - Unidades simples de camiones con 2 ejes
- b) - Unidades simples de camiones con 3 ejes.
- c).- Todas las combinaciones con 3 ejes
- d).- Todas las combinaciones con 4 ejes.
- e) - Todas las combinaciones con 5 ejes o más
- f).- Todos los otros vehículos (todos los vehículos de pasajeros, más panels, pickups y cualquier unidad simple comercial de 4 llantas)

- 2.- El conteo de clasificación durante las 24 horas, se ajusta para obtener los valores diarios promedio para que este ajuste sea confiable debe ser llevado a cabo por la sección de planeación de los departamentos de carreteras.
- 3.- Se calculan las proyecciones a 20 años, para las cinco clases de camiones.
- 4.- Las proyecciones a 20 años se emplean para calcular el número de camiones, de cada una de las 5 clases, durante una vida de diseño de 40 años.
- 5.-La distribución de cargas por eje, para las distintas clases de camiones, se calcula con datos de una o más estaciones medidoras.
- 6 - Los valores obtenidos en el paso anterior se emplean para calcular el número de cargas por eje esperadas durante la vida de diseño.
- 7.- El espesor del pavimento se calcula utilizando las formas y el procedimiento descritos en el método estándar

CAPA SUBRASANTE.

El buen apoyo que de la capa subrasante al pavimento de concreto y a la subbase, cuando ésta se usa, es el segundo factor de diseño de importancia, la capacidad de soporte de la capa subrasante y la subbase, se estima en términos del módulo de reacción k. Este valor se obtiene mediante la aplicación de una carga (en lb/pulg²) aplicada sobre una determinada área (generalmente una placa de 30 pulg. De diámetro), dividida entre la deflexión en pulgadas para esa carga, o la carga total en libras, dividida entre el volumen total desplazado en pulg. 3. En la tabla No. 3 del capítulo 1.3. se muestra la relación aproximada entre las clasificaciones de suelos, los valores de soporte y de resistencia, así como también el módulo de reacción de la capa subrasante.

El uso de subbases con el único propósito de incrementar los valores de k, generalmente no es económico. Pero cuando ésta es necesaria, se tendrá un incremento en el valor de k, que se empleará en el diseño de espesores. Si la subbase es de material granular no tratado, el incremento aproximado de k puede tomarse de la Tabla No. 9, para obras importantes el cambio en el valor de k puede determinarse haciendo una prueba de placa de un tramo con subbase, construido con especificaciones correspondientes a la obra de que se trate.

Para cargas pesadas es muy usual subbases tratadas con cemento Portland, diseñadas para resistencias a la compresión a 7 días, no menores de 300 Lb/pulg.² (21 kg/cm²). Valores de diseño de k, para subbases tratadas con cemento Portland, se dan en la Tabla No. 10

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA No. 9

EFECTO DE LA SUBBASE NO TRATADA, EN LOS VALORES DE K, Lb/pulg.³

Valor de k de la capa subrasante	Valor de K en la subbase			
	4"	6"	9"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	430
300	320	330	370	430

TABLA No. 10

VALORES DE K DE DISEÑO, PARA SUBBASES TRATADAS CON CEMENTO PORTLAND.

Valor de k de la capa subrasante, 100 lb/pulg. ³ aproximadamente	
Espesor, pulgs.	Valor de k, Lb/pulg. ³
4	300
5	450
6	550
7	600

MATERIALES

Las propiedades de concreto es otro de los factores de diseño a tomarse en cuenta en este método.

Al deformarse los pavimentos de concreto bajo la acción de las cargas se producen esfuerzos tanto de compresión como de flexión. Sin embargo, los esfuerzos de compresión son demasiado pequeños para influir en el espesor de la losa, por lo que los esfuerzos de flexión que se origina y la resistencia del concreto a la flexión son los datos que se usan en el diseño de espesores.

La resistencia a la flexión del concreto se termina mediante la prueba de módulo de ruptura (MR), realizada generalmente en vigas de 6 x 6 x 30 pulgadas (15 x 15 x 75 cm) Aplicando la carga en los tercios.

Las pruebas de módulo de ruptura se hacen comúnmente a 7, 14, 28 y 90 días. Los resultados de pruebas a 7 y 14 días se comparan con las especificaciones requeridas para control del trabajo y para determinar cuándo pueden abrirse al tránsito los pavimentos. Para el diseño de pavimentos de carreteras se usan los resultados de pruebas de 28 y 90 días. El empleo de las resistencias a los 28 y 90 días para esos fines se justifica porque son muy pocas las repeticiones de esfuerzos que se prestarán durante los primeros 28 a 29 días de vida del pavimento, comparados con los millones de repeticiones de esfuerzos que ocurrirán después.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Otra razón para usar los resultados de pruebas a 28 y 90 días, es que el concreto continúa aumentando su resistencia después de 90 días

Cuando no se cuenta con los datos de pruebas a 90 días, se considera dentro de la seguridad tomar 110% de los valores a 28 días.

Normalmente se utilizan para el diseño de pavimentos los valores del MR a la edad de 28 días.

II.2 DISEÑO DE ESPESOR Y PERIODO DE VIDA DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Para el cálculo del espesor de pavimentos de concreto, es necesario suponer un espesor de tanteo, generalmente los espesores que se utilizan son 9", 8.5", 8", para carreteras de importancia como las interestatales de varios carriles y, 7.5", 7 0" para carreteras de menor importancia como las de tipo rural principal

El espesor de tanteo se deberá variar hasta lograr que sea el adecuado para satisfacer las necesidades de proyecto.

El término "Vida de Diseño", no está sujeto a definición precisa. Algunos ingenieros e instituciones de carreteras consideran terminada la vida de un pavimento, cuando se le coloca la primera sobrecapa. Con base en este concepto, la vida de los pavimentos de concreto puede variar desde 20 años, para obras en que existan algunos defectos de diseño, de materiales o de construcción, hasta más de 50 años, para casos de obras en que no se tienen defectos de esta naturaleza.

Una base más exacta para el análisis ingenieril y del diseño del pavimento, es reconocer que la vida útil de un pavimento de concreto no termina cuando se le coloca la primera o segunda sobrecapa. Por el contrario, el concreto continúa dando servicio como el principal elemento resistente de las cargas, dentro de la estructura del pavimento.

La larga vida del concreto, trabajando como pavimento expuesto directamente a la acción de las cargas o formando parte importante de él (base), justifican la vida de diseño de 40 años, que se toma en el presente trabajo.

Los estudios realizados para el diseño de espesores mostraron la necesidad de utilizar factores de seguridad por cargas (FSC).

Las pruebas que muestran la acción de los vehículos en los pavimentos, tienen también los efectos del impacto en los vehículos de prueba. Sin embargo, existe en la actualidad una evidencia importante que muestra que las cargas por ejes de un camión en movimiento dan lugar a esfuerzos, más pequeños que los que producen cuando el camión está parado. Ya que las cargas en movimiento disminuyen los esfuerzos, en vez de aumentar las factores de impacto empleados para diseñar espesores, pueden clasificarse más exactamente como factores de seguridad por cargas.

El comportamiento en los tramos de prueba de bates, Maryland y de la AASHO, así como el comportamiento de los pavimentos en servicio, apoyan el uso de factores de seguridad adecuados para el diseño de espesores de losas. Se recomiendan los siguientes factores de seguridad por carga.

- 1 Para carreteras interestatales y otras de varios carriles, en las que el tránsito no puede interrumpirse y se tienen fuertes volúmenes de tránsito pesado, factor de seguridad de carga (FSC) = 1.2.
- 2 Para carreteras y calles principales, con volúmenes moderados de tránsito pesado, factor de seguridad por carga (FSC) = 1.1.
3. Para carreteras, calles residenciales y otros tipos de calles, con pequeños volúmenes de tránsito pesado, factor de seguridad por carga (FSC) = 1 0.

Igual que otros materiales de construcción, el concreto hidráulico está sujeto a efectos de fatiga. Ocurre una falla por fatiga en un material, cuando éste se rompe bajo la acción

continúa de cargas repetidas que producen relaciones de esfuerzos menores que la unidad. Ya que los esfuerzos críticos en el concreto son los de flexión, la fatiga debida al esfuerzo de flexión es la que se usa para el diseño de espesores y las relaciones de esfuerzos, son los cocientes entre el esfuerzo de flexión producido en el concreto y el módulo de ruptura del mismo. Por ejemplo, si una carga eje produce en el concreto un esfuerzo de flexión de 500 lb/pulg² y el módulo de ruptura de dicho concreto es de 700 lb/pulg. Se tiene:

$$\text{Relación de esfuerzos} = \frac{500}{700} = 0.71$$

Las investigaciones sobre fatiga a la flexión del concreto han demostrado de cuando la relación descrita disminuye, el número de repeticiones del esfuerzo para producir la falla, aumenta. Estas investigaciones han demostrado también que:

- 1 Cuando la relación de esfuerzos es menor de 0.55, el concreto puede resistir prácticamente un número ilimitado de repeticiones de esfuerzo, sin perder su capacidad para soportar las cargas. Por lo tanto, el concreto tiene un límite de resistencia a la fatiga por flexión, para una relación de esfuerzos de aproximadamente 0.55.
- 2 Repeticiones de cargas, con relaciones de esfuerzos abajo del límite de resistencia, aumentan la capacidad del concreto para soportar cargas con relaciones de esfuerzos mayores que el límite por fatiga, es decir, se mejora la resistencia a la fatiga del concreto.

Los periodos de reposo también aumentan la resistencia a la fatiga por flexión del concreto.

Para fines de diseño de espesores, la relación de esfuerzos para el límite de resistencia del concreto se ha llevado, del valor 0.55, a una relación más conservadora de 0.50. El número permisible de repeticiones de carga, para relaciones de esfuerzos entre 0.50 y 0.85, se muestran en la Tabla No. 11. Estos valores son también conservadores, con respecto a los obtenidos en las investigaciones sobre fatiga a la flexión del concreto.

Teóricamente, la fatiga total usada no debe exceder del 100%. En la práctica, un valor cercano al 100% es apropiado para diseños basados en módulos de ruptura a 28 días, la fatiga consumida puede incrementarse a cerca de 125%. Este incremento toma en cuenta el aumento de resistencia después de 28 días.

El espesor se calcula llevando a cabo las operaciones indicadas en el formato mostrado a continuación (cap II.3) Esta forma, designada como "cálculo del espesor de pavimentos de concretos", se lleva de acuerdo con lo que se indica en la propia forma y con las siguientes instrucciones adicionales:

- 1 Para obtener los datos de las columnas 1 y 6 de la forma se tomarán los datos de tránsito; número de ejes durante la vida de diseño, en grupos de cargas por eje con incrementos de 2000 libras. En la Tabla No. 8, la columna 4 muestra datos del número de ejes durante la vida de diseño obtenidos en base a los diseños mostrados como ejemplos en el siguiente subcapítulo II.3. En la columna 1, usa la máxima carga por eje de cada grupo.
- 2 Multiplique los datos de la columna 1 por el factor de seguridad por carga que se utilizará
- 3 Determine los esfuerzos para la columna 3, de las cartas de diseño para cargas en eje sencillo y en eje Tandem.
- 4 Hallar las relaciones de esfuerzos, para la columna 4, dividiendo cada valor del esfuerzo entre MR del concreto

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA NO. 11

RELACIONES DE ESFUERZOS Y REPETICIONES PERMISIBLES DE CARGA			
Relación de Esfuerzos (*)	Repeticiones Permisibles	Relación de Esfuerzos	Repeticiones Permisibles
0.51	400 000	0.69	2 500
0.52	300 000	0.70	2 000
0.53	240 000	0.72	1 500
0.54	180 000	0.72	1 100
0.55	130 000	0.73	850
0.56	100 000	0.74	650
0.57	75 000	0.75	490
0.58	57 000	0.76	360
0.59	42 000	0.77	270
0.60	32 000	0.78	210
0.61	24 000	0.79	160
0.62	18 000	0.80	120
0.63	14 000	0.81	90
0.64	11000	0.82	70
0.65	8 000	0.83	50
0.66	6000	0.84	40
0.67	4 500	0.85	30
0.68	3 500		

* Esfuerzo debido a las cargas, entre el módulo de ruptura del concreto.

** Repeticiones ilimitadas, para relaciones de esfuerzos de 0.50 ó menos.

5. Determine el número de repeticiones permisibles para la columna 5, de la tabla 11 de relaciones de esfuerzos y repeticiones permisibles de carga.
6. Determine los valores de resistencia a la fatiga, en porciento, para la columna 7, dividiendo el número de repeticiones permisibles.

La resistencia consumida a la fatiga en porcentaje no debe exceder del 125% como ya se mencionó anteriormente.

II.3 EJEMPLOS ILUSTRATIVOS

METODO ESTANDAR DE LA ASOCIACION DE CEMENTO PORTLAND (PCA)

DISEÑO I (A, B, C)

DATOS DEL TRANSITO Y DE LA OBRA:

Carretera Interestatal de 4 carriles

Terreno montañoso, ubicación rural

Vida de diseño = 40 años.

T P D = 8500 vehículos

Factor de proyección: 2.2

T P D C = 13% TPD

T P D de diseño se obtiene por proyección

CALCULOS DEL TRANSITO

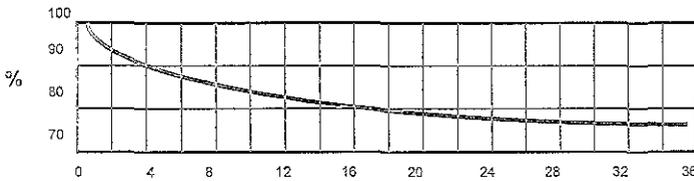
T P D de diseño = $8500 \times 2.2 = 18,700$

T P D C = $18,700 \times 0.13 = 2,430$

Tránsito de camiones en un sentido = $\frac{2430}{2} = 1,215$

vph = $\frac{18,700}{2 \times 24 \text{ hrs.}} = 390$ vehículos por hora

Para 390 vph. El por ciento de camiones en el carril derecho, se obtiene con el apoyo de la siguiente gráfica del estudio del tránsito, teniendo el 92%.



Cientos de vehículos por hora

Fig. 5 Porcentajes de camiones en el carril derecho, para una carretera de 4 carriles, dividida en el centro.

$1215 \times 0.92 \times 365 \times 40 = 16,320,000$ camiones

Valores usados para el cálculo de espesores.

La forma del cálculo del espesor de pavimentos de concreto se llena de acuerdo con lo que se indica en la propia forma y con las instrucciones adicionales mencionadas en el subcapítulo II.2.

DISEÑO I-A

Valor de k de la capa subrasante = 100 lb/pulg³ (supuesto)

Espesor de subbases no tratada = 4 pulg. (supuesto)

Valor de k, combinado (de tabla efecto de la subbase no tratada, en los valores de k, lb/pulg. 3)
= 130 lb/pulg 3

Factor de seguridad por carga = 1.2 (por el tipo de carretera y la intensidad de tránsito)

MR del concreto = 650 lb/pulg 2 (supuesto)

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Espesor de tanteo = 9.0 pulg (supuesto)

CALCULO DE ESPESOR DE PAVIMENTOS DE CONCRETO

Obra. DISEÑO 1-A

Tipo Interestatal Rural- Terreno Montañoso No. de Carriles 4

K de la capa subrasante: 100 pci Subbase 4 Pulg material granular sin tratar

K, combinado: 130 pci Factor de seguridad por carga 1.2 F S. C

PROCEDIMIENTO

- 1.- Llene las columnas 1, 2 y 6, poniendo las cargas por eje en orden decreciente.
- 2.- Suponga un espesor de tanteo. Considere incrementos de 0.5 de pulg.
- 3.- Analice el espesor de tanteo, completando las columnas 3, 4, 5 y 7.
- 4.- Analice otros espesores de tanteo, variando el M.R (*), espesor y tipo de subbase (**)

1	2	3	4	5	6	7
Cargas por Eje	Cargas por eje X FSC	Esfuerzos de trabajo del concreto (GRAFICA 7 Y 8)	Relaciones de esfuerzo (3) / MR	Repeticiones permisibles de la carga. Tabla 11	Repeticiones esperadas de la carga, según análisis del tránsito	Resistencia consumida a la fatiga I (***) col 6 / col 5 por ciento
Kips	Kips	psi		Núm.	Núm.	

Espesor de tanteo: 9.0 pulg. M R(*) 350 psi 1b/pulg² K: 130 psi 1b/pulg³

EJES SENCILLOS

30	36.0	340	0.52	300,000	3100	1
28	33.6	325	0.50	ilimitadas	3100	0
26	31.2		0.50	"	6200	0
24	28.8		"	"	163,200	0
22	26.4		"	"	639,740	0
20	22.0					
18	21.6					

EJES EN TANDEM

54	64.8	382	0.59	42,000	3100	7
52	62.4	368	0.57	75,000	3100	4
50	60.0	358	0.55	130,000	30,360	23
48	57.6	348	0.54	180,000	30,360	17
46	55.2	333	0.51	400,000	48,140	12
44	52.8	318	0.50	ilimitadas	150,470	0
42	50.4		"	"	171,360	0
40	48.0		"	"	248,060	0

TOTAL = 64%

* M R Módulo de ruptura para viga con carga en los tercios

** Para subbase tratadas con cemento Portland resultan valores combinados de K, bastante aumentados.

*** El porcentaje total consumido de resistencia a la fatiga del concreto, no debe exceder de 125%

Comentarios sobre el diseño I-A.

- 1 - Un consumo de fatiga total de 64%, indica que el espesor de 9" es adecuado para las condiciones de diseño.
- 2.- Este diseño tiene una reserva de 36% de la capacidad de fatiga, disponible para otras cargas por eje pesadas, además de las estimadas para el diseño
- 3.- Los comentarios anteriores hacen surgir la pregunta de si un espesor de 8 5". no sería adecuado para este diseño I-A. Los cálculos para este espesor de tanteo, demuestran que no es adecuado, debido a un consumo excesivo de la resistencia por fatiga del concreto. El consumo grandemente aumentado de la resistencia por fatiga, debido a la reducción de 1 / 2 " en el espesor, se comprende cuando se recuerda que:
 - a).- Los esfuerzos debido a las cargas, en los pavimentos de concreto, varían inversamente con el cuadrado del espesor.
 - b).- Cambios relativamente pequeños en el espesor, dan lugar a cambios relativamente grandes en las repeticiones permisibles de las cargas, por fatiga.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

DISEÑO I-B

Mismos datos que el diseño I-A excepto. que:
MR del concreto aumentado a 700 lb/pulg²
Espesor de tanteo reducido a 8.5 pulg.

CALCULO DEL ESPESOR DE PAVIMENTOS DE CONCRETO
(Use las Cartas de Diseño para Ejes Sencillos y en Tándem, Caso I)

Obra Diseño I-B

Tipo: Interestatal Rural-Terreno Montañoso No. de Carriles: 4.
K, de la Subrasante: 100 pci, Subbase 4 pulg. material granular sin tratar
K, combinado: 130 pci, Factor de seguridad por carga. 1.2 F.S.C.

PROCEDIMIENTO

- 1 - Llene las columnas 1, 2 y 6, poniendo las cargas por eje en orden decreciente.
- 2 - Suponga un espesor de tanteo. Considere incrementos de 0.5 de pulg.
- 3 - Analice el espesor de tanteo, completando las columnas 3, 4, 5 y 7.
- 4.- Analice otros espesores de tanteo, variando el "M.R", espesor y tipo de subbase".

1	2	3	4	5	6	7
Cargas por Eje	Cargas por eje X FSC	Esfuerzos de trabajo del concreto (GRAFICA 7 Y 8)	Relaciones de esfuerzo (3) / MR	Repeticiones permisibles de la carga Tabia 11	Repeticiones esperadas de la carga, según análisis del tránsito	Resistencia consumida a la fatiga I (***) col 6 / col 5 por ciento
Kips	Kips	psi		Núm	Núm	

Espesor de tanteo: 8.5 pulg. M.R.* 700 psi K 130 pci

EJES SENCILLOS

30	36.0	367	0.52	300.000	3 100	1
28	33.6	353	0.50	400.000	3 100	1
26	31.2	328	0.50	Ilimitadas		
24	28.8		"	"		
22	26.4		"	"		

EJES EN TANDEM

54	64.8	413	0.59	42,000	3 100	7
52	62.4	398	0.57	75,000	3 100	4
50	60.0	387	0.55	130,000	30,360	23
48	57.7	375	0.54	180,000	30,360	17
46	55.2	361	0.51	300,000	46,140	16
44	52.8	346	0.50	Ilimitadas	150,470	0
42	50.4		"	"	171,360	0
40	48.0		"	"	248,060	0

TOTAL = 69

* M R Módulo de Ruptura para viga con carga en los tercios

** Para subastes tratadas con cemento portland resultan valores combinados de k, bastante aumentados

*** La resistencia total a la fatiga consumida, no debe exceder de 125%.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Comentarios sobre el Diseño 1-B

- 1 - El cálculo del espesor, muestra que un incremento de 50 lbs/pulg² en el MR del concreto, hace posible reducir el espesor de la losa en 1/2" de 9.0 a 8.5". Si el incremento de 50 lb/pulg² en el MR, pudiera obtenerse con medio saco de cemento, habría una reducción importante en el costo del pavimento. Igualmente importante es el hecho de que con un contenido más alto de cemento, se mejora la durabilidad del pavimento.
- 2.- Este diseño tiene 31% de reserva de resistencia a la fatiga del concreto, que queda disponible para cargas pesadas por ejes, independientemente de las previstas en el análisis del tránsito.
- 3.- Se encontró que una reducción de 1/2" en el espesor, dejándolo en 8", no es conveniente porque implica un elevado consumo de resistencia por fatiga.

DISEÑO 1-C

Mismos datos que Diseño 1-A excepto que.

Espesor de subbase granular tratada con cemento Portland = 4 pulg.

Valor de k, combinado = 300 Lb/pulg³

(de valores de k de diseño, para subbases tratadas con cemento Portland)

Espesor de tanteo reducido a 8.0 pulg.

CALCULO DEL ESPESOR DE PAVIMENTOS DE CONCRETO.

(Use las cartas de Diseño para Ejes Sencillos y en Tándem. Caso !)

Obra: DISEÑO 1-C

Tipo: Interestatal Rural-Terreno Montañoso No. de Carriles: 4

K de la Subrasante: 100 pci, Subbase 4 pulg material granular tratado con cemento.

K, combinando: 300 pci, Factor de seguridad por carga: 1.2 F.S.C.

PROCEDIMIENTO

- 1.- Llene las columnas 1, 2 y 6, poniendo las cargas por eje en orden decreciente.
- 2.- Suponga un espesor de tanteo. Considere incrementos de 0.5 de pulg.
- 3.- Analice el espesor de tanteo, completando las columnas 3, 4, 5 y 7.
- 4.- Analice otros espesores de tanteo, variando el M.R. espesor y tipo de subbase.

1	2	3	4	5	6	7
Cargas por Eje	Cargas por eje X FSC	Esfuerzos de trabajo del concreto (GRAFICA 7 Y 8)	Relaciones de esfuerzo (3) / MR	Repeticiones permisibles de la carga. Tabla 11	Repeticiones esperadas de la carga, según análisis del tránsito	Resistencia consumida a la fatiga (***) col 6 / col 5 por ciento
Kips	Kips	psi		Núm	Núm.	

Espesor de tanteo: 8.0 pulg M.R. 650 PSI k. 300 PCI

EJES SENCILLOS

30	36.0	333	0.52	400,000	3100	1
28	33.6	319	0.50	ilimitadas	3100	0
26	31.2		"	"	6200	0
24	28.8		"	"	163,200	0
22	26.4		"	"	639,740	0

EJES EN TANDEM

54	64.8	357	0.55	130,000	3 100	2
52	62.4	348	0.54	180,000	3 100	2
50	60.0	336	0.52	300,000	30,360	10
48	57.6	325	0.50	ilimitadas	30,360	0
46	55.7	310	0.50	"	48,140	0
44	52.8		"	"	150,470	0
42	50.4		"	"	171,360	0
40	48.0		"	"	248,060	0

TOTAL = 15

* MR Módulo de Ruptura para viga con carga en los tercios

** Para subbases tratadas con cemento Portland resultan valores combinados de k, bastante aumentados.

*** La resistencia total a la fatiga consumida, no debe exceder de 125%

Cálculo de espesores para el Diseño 1-B.

Comentarios sobre el Diseño 1-C.

- 1 - En este diseño, el espesor fue reducido a 8.0", el MR del concreto se bajo nuevamente a 650 lb/pulg² y la subbase se cambió a 4" de material tratado con cemento Portland, teniéndose un valor combinado de k, de 300 lb/pulg³.
- 2.- Del cálculo del espesor, resulta evidente que un espesor de 8.0", es más que suficiente. El diseño 1-C tiene una capacidad para soportar cargas, considerablemente mayor que los diseños anteriores
- 3.- La reserva de 85% en la capacidad de resistencia por fatiga, permite un amplio margen de error en la estimación de las cargas por eje esperadas en la vida del pavimento.
- 4.- Los cálculos para un espesor de 7.5", muestran un consumo de resistencia por fatiga de 122%. Esto indica que el espesor de 7.5" es adecuado, porque un pequeño aumento en el MR, sobre las 650 lb/pug². consideradas para el diseño, reduciría el consumo de resistencia por fatiga a menos del 100%. Sin embargo, puede ser objetable el que se emplee un espesor de 7.5" en una carretera interestatal.

CAPITULO III

TRABAJOS PREVIOS Y MATERIALES

III.1 ELABORACIÓN DE TERRACERÍAS, SUBRASANTE Y SUBBASES

En primer lugar, nos encontramos con el terreno de cimentación, que es una parte de la corteza terrestre, en la cual se apoya la estructura del pavimento, y es afectada por la misma. Generalmente no se presentan problemas cuando está formado por rocas, pero puede presentar problemas importantes cuando se trata de suelos, por lo que debemos conocer sus características.

En los suelos, es importante conocer su resistencia a la erosión e interperismo, permeabilidad, estabilidad volumétrica y química, y su resistencia al esfuerzo cortante. En el caso de las rocas, su inalterabilidad ante agentes atmosféricos, permeabilidad y trabajabilidad

Las operaciones de construcción entre el terreno de cimentación y el pavimento con su subbase, constituyen las terracerías, las cuales son formadas por un conjunto de cortes y terraplenes que proporcionan el apoyo a la estructura del pavimento, sus elementos son el cuerpo del terraplén y la capa subrasante. Sus funciones son: soportar el pavimento en condiciones razonables de resistencia y deformación, proporcionar el nivel necesario a la subrasante y proteger el pavimento, conservando su integridad en todo tiempo

Las terracerías deberán tener una resistencia adecuada para soportar las cargas transmitidas por el pavimento por peso propio y por tránsito, tener resistencia a los factores del medio ambiente que puedan afectar su resistencia, durabilidad, estabilidad volumétrica y química, y principalmente deberá ser económica y funcional.

Los materiales que la componen se clasifican usualmente como

FRAGMENTOS DE ROCA.- Grandes (material comprendido entre 75 cm y 2 m), medianos (entre 20 cm y 75 cm) y chicos (entre 7.6 cm y 20 cm)

GRAVAS.- Material entre 5 mm y 7.6 cm, en donde más de la mitad del mismo se retiene en la malla No. 4 . Se subdivide con respecto a su procedencia natural.

ARENAS.- Grano grueso (varían desde 0.25 mm hasta 2.00 mm). Grano fino (desde 0.02 mm hasta 0.25 mm). Por la forma de las partículas éstas pueden ser: redondas (poco estables), subredondeadas, subangulosas, angulosas (las más estables)

LIMOS.- Material del cual, más de la mitad, pasa la malla No. 200 y exhiben propiedades plásticas. Se subdivide de acuerdo a la cantidad de minerales materia orgánica, así como su plasticidad.

ARCILLAS.- Material cohesivo que presenta propiedades de plasticidad, más de la mitad pasa la No 200. Se subdivide de acuerdo a su cantidad de minerales, materia orgánica, así como su plasticidad.

Es recomendable, en primer lugar, aceptar el material de terracerías tal y como está y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por la calidad del material, de otro modo se tendrá que remover y desechar el suelo del lugar y sustituirlo por un suelo de

características adecuadas, otra alternativa más común, es alterar o cambiar las propiedades del material existente, de tal manera que se obtenga un material que reúna en mejor forma los requisitos impuestos, o cuando menos que la calidad obtenida sea adecuada

TABLA NO. 12 CARACTERISTICAS DE LAS TERRACERIA

CARACTERÍSTICAS	DESEABLE	ADECUADA	TOLERABLE
Tamaño máximo (mm)	76	1,500 ó 0,5 espesor de capa	2,000 ó 0,5 espesor de capa
% malla No. 200	20 máx.	-----	-----
Il (límite líquido) %	40 máx.	50 máx.	60 máx.
I.P. (índice plástico %)	-----	-----	25 máx.
AASHTO(estándar %)	95 mín.	90 mín. o bandeado	90 mín. o bandeado
VRS (%)	30 mín.	20 mín.	10 mín.
Expansión	-----	-----	3

Los métodos de mejoramiento o estabilización más importantes son:

MECÁNICOS	Compactación
FÍSICOS	Confinamiento, consolidación, vibración y mezcla de suelos.
QUÍMICOS	Tratamientos con cemento Portland, asfalto y cal.

En el diseño de la estabilización de un suelo se deben tener muy presentes las variaciones que se esperan lograr en lo que respecta a la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y compresibilidad, ya que se puede presentar el caso de que el mejoramiento de alguna o algunas características en un suelo mediante la estabilización, provoca que otras características resulten en condiciones desfavorables.

El diseño de estabilizaciones con agentes estabilizantes consiste, en primer término, en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo con base en lo cual se determina el tipo y cantidad de agente estabilizante, así como el procedimiento para efectuar la estabilización. En la práctica se tiene, sin embargo, una gran confusión en lo que respecta al diseño de las estabilizaciones, pues es difícil establecer patrones de estabilización de materiales.

El diseño de la estabilización de un suelo es una labor dedicada y en ocasiones requerirá el auxilio de técnicos muy especializados.

En proyectos de poca importancia tal intervención de especialistas puede no ser del todo justificada y es pensando en estos casos que a continuación se presenta el procedimiento sistemático para el diseño de estabilizaciones, empleado por la fuerza aérea de los Estados Unidos

No debe perderse de vista, sin embargo, que el ignorar la naturaleza de los tipos de materiales que contenga el suelo a estabilizar, pueda conducir a serios fracasos. Dicho procedimiento deberá tomarse con las debidas precauciones y limitaciones.

TABLA No. 13 ESTABILIZACION DE TERRACERIAS

COMPONENTE DOMINANTE	ESTABILIZANTE RECOMENDADO	OBJETIVOS
ARENA	Arcilla de baja plasticidad Cemento Portland	Para estabilización mecánica Incrementar el peso volumétrico y la cohesión Incrementar la cohesión
LIMOS	Asfaltos Dependerá del tipo de minerales que contenga	
ALOFANOS	Cal	Acción puzoiónica e incremento de peso volumétrico
CAOLÍN	Arena Cemento Cal	Para estabilización mecánica Para resistencias tempranas Trabajabilidad y resistencia tardía
ILITA	Cemento Cal	Igual al caoíin
MONTMORILONITA	Cal	Reducciones de expansiones y contracciones

El tipo de pavimento regirá la elección del método de estabilización más adecuado. en el caso de los pavimentos rígidos reviste mayor importancia tener subbases con mayor adherencia o unión de partículas para evitar el bombeo

Entre los métodos de mejoramiento el más utilizado en obras de carreteras es la compactación, ésta mejora las características de un suelo, en lo que se refiere a:

- Resistencia mecánica
- Resistencia a los asentamientos bajo cargas futuras
- Impermeabilidad
- Resistencia a la erosión

Los esfuerzos mecánicos empleados en la compactación son una combinación de uno o más de los siguientes efectos:

PRESIÓN ESTÁTICA.- La aplicación de una fuerza por unidad del área. Su acción de compactación de arriba hacia abajo tiene el inconveniente de que la parte superior se compacta primero que la de abajo, por lo que se debe atravesar la parte ya compactada para poder compactar la inferior. Se consume, por lo tanto, mayor energía de compactación.

IMPACTO.- Golpeo con una carga de corta duración, alta amplitud y baja frecuencia.

VIBRACIÓN.- Golpeo con una carga de corta duración, alta frecuencia, baja amplitud. Este tipo de compactación supera en eficiencia a los compactadores estáticos, por lo que últimamente ha tenido mayor desarrollo y prácticamente ha invadido todos los materiales por compactar

Debido a las vibraciones producidas por el equipo sobre el material. la fricción interna de éste desaparece momentáneamente, propiciando el acomodo de las partículas

AMASAMIENTO.- Acción de masado, reorientación de partículas próximas, causando una reducción de vacíos. La compactación por este principio se lleva a cabo de abajo hacia arriba, es decir, las capas inferiores se densifican primero y las superiores posteriormente. Los compactadores por amasamiento más comunes son los rodillos pata de cabra, el cual, al penetrar, ejerce presión hacia todos lados, obligando al agua y/o aire a salir por la superficie, se emplean fundamentalmente en materiales cohesivos.

CON AYUDA DE ENZIMAS.- Mediante la adición de productos enzimáticos en el agua de compactación, se ha pretendido obtener, en combinación con algún otro esfuerzo compactador mecánico, la densificación más rápida de los materiales.

Hay una gran variedad de equipos de compactación, se describen sus características básicas:

RODILLOS METÁLICOS.- Utilizan solamente presión con un mínimo de amasamiento en materiales plásticos. Estas máquinas, por su lentitud y poca profundidad, van perdiendo terreno en la compactación de grandes movimientos de tierra. Se pueden dividir en: planchas Tandem, planchas de tres ruedas.

RODILLOS NEUMÁTICOS.- Son muy eficaces para la compactación de subbases, sus bulbos de presión son semejantes a los de los rodillos metálicos, pero el área de contacto permanece constante, por lo que no se produce el efecto de reducción del bulbo. Los hay de llantas pequeñas y llantas grandes, los primeros generalmente tienen dos ejes en Tandem y el número de llantas puede variar entre 7 y 13, y los otros generalmente son arrastrados por tractor; y pesan de 15 a 50 toneladas, son difíciles de maniobrar y de transportar, por lo que están siendo desplazadas por otros equipos más ligeros y más versátiles.

RODILLOS PATA DE CABRA.- Son ahora raramente usados, excepto para amasamiento y compactación de arcilla, donde la estratificación debe ser eliminada, como en el corazón impermeable de una presa. Estos rodillos son lentos, tienen una gran resistencia al rodamiento, por lo que consumen mucha potencia, su uso está declinando debido a los altos costos que tienen.

RODILLO DE REJA.- Desarrollado para disgregar y compactar rocas poco resistentes a la compresión, rompiéndola y produciendo finos que llevan los vacíos, formando una superficie suelta y estable. En otro tipo de suelos producen efectos de impacto, vibración y amasamiento (según el tipo de suelo y la velocidad de operación). Reducen su eficiencia en materiales plásticos, ya que atascan de material los huecos de la reja.

RODILLO DE IMPACTO.- Diseñado utilizando los mismos principios del rodillo de reja, evitando los problemas de limpieza de éste. Es un rodillo metálico con salientes en forma aproximada de una pirámide rectangular truncada, las cuales no son de la misma altura. Esto de las mismas ventajas del rodillo de reja, pudiéndose limpiar fácilmente. Dichas salientes, por su forma, incrementan su área de contacto con la penetración. El rodillo de impacto ha probado ser uno de los más versátiles y económicos compactadores en terracerías, capaz de compactar eficientemente la mayor parte de los suelos.

RODILLOS VIBRATORIOS.- Estos rodillos funcionan disminuyendo temporalmente la fricción interna del suelo. Utilizados en suelos granulares (gravas y arenas), ya que su resistencia depende principalmente de la fricción interna. La vibración provoca un reacomodo de las

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

partículas del suelo que resulta en un incremento del peso volumétrico. Deben manejarse a velocidades de 25 a 5 km/hr , ya que velocidades mayores no incrementan la producción, y con frecuencia no se obtiene la compactación

SELECCION DE EQUIPO

SUB-BASES
BASES Y CARPETAS

TERRACERIAS

COHESIVOS

SEMI COHESIVOS

NO COHESIVOS

ARCILLAS

LIMOS-ARCILLOSO

LIMOS

ARENAS-LIMOSAS

ARENAS

GRAVAS

ROCAS

0 02

0 074

4.7

75 0

mm

PRESION ESTATICA

AMASAMIENTO

IMPACTO

VIBRACION

A

B

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Así mismo, podemos mencionar que buscando extender ventajas, es común encontrar equipos que utilizan más de una de las características de los diferentes tipos de rodillos.

Los factores que primordialmente influyen en la obtención de una compactación económica son

- Contenido de humedad del material
- Granulometría del material
- Número de pasadas del equipo
- Peso del compactador
- Presión de contacto
- Velocidad del equipo compactador
- Espesor de la capa

Es importante controlar el agua que actúa sobre las terracerías, ya que ésta provoca erosión, tubificación, variaciones volumétricas (expansión, contracción), fuerzas de filtraciones, reducción de la resistencia al esfuerzo cortante y disolución. Por lo que se deberán aplicar métodos de solución del drenaje, como son: cunetas, contracunetas, alcantarillas, lavaderos, bordillos u otras formas que eviten la acción del agua

Como ya se había mencionado, el incremento del tránsito en los últimos años dio como resultado aumentar la calidad del apoyo que se ofrecía a las losas de concreto, se consideraba que la subrasante no ejercía efectos importantes sobre el diseño y el comportamiento de pavimentos, sin embargo, se observaron algunos efectos, como el alabeo del pavimento (juntas elevadas o bajas) causado por la expansión o contracción de suelos altamente expansivos, y principalmente el "bombeo", que se desarrolló en los pavimentos de concreto al incrementarse el peso y el tránsito de camiones. El bombeo es la expulsión forzada de la subrasante mediante el agua que sale por las juntas o grietas, y que puede causar fallas, cavidades debajo del pavimento y agrietamiento del pavimento.

Las recomendaciones resultantes de estas observaciones condujeron al empleo de subbases, tratando de mantener la subrasante con un contenido uniforme de humedad después de la construcción. El emplear subbases granulares para controlar efectivamente el bombeo (las subrasantes granulares con drenaje no se derraman, por lo que no se requieren subbases).

El efecto de levantamiento por heladas ya no es un factor importante en el comportamiento de los pavimentos de concreto. Este se controla exitosamente mediante una cuidadosa construcción de la subrasante y el empleo de subbases granulares relativamente delgadas.

TABLA 14 - CATEGORÍA DE SUBRASANTE

CATEGORÍA	MATERIAL	VRS	k lb/pulg ³
Muy buena	GW, GP, GM, GC SW, SP, SM, SC	10	200
Buena	ML, CL, OL	6 A 10	150 A 200
Mala	MH, CH, OH	3 A 6	100 A 150

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA 15.- CARACTERISTICAS DE LA SUBRASANTE

CARATERISTICA	DESEABLE	ADECUADA	TOLERABLE
Tamaño máximo (mm)	75	75	75
% Malla No 200	25 máx.	35 máx.	---
WI (%)	30 máx	40 máx	50 máx.
I P. (%)	10 máx.	20 máx	25 máx
AASHO (%) estándar	100 min.	100+2	100+2
VRS (%)	30 MIN.	15 MIN.	15 MIN.

En lugares donde existen rocas se han encontrado severos agrietamientos diagonales de losas causados por rocas localizadas demasiado cerca de la parte inferior de la losa, por lo que se debe retirar esta clase de materiales y colocar una capa de material normal de subbase directamente debajo del pavimento, para contar con un apoyo más uniforme

Hoy en día se usa en casi todos los pavimentos una subbase, ésta consiste de una o más capas de materiales granulares, muchas veces estabilizadas, cuyas principales funciones son:

1. Proporcionar apoyo uniforme a la losa de concreto.
2. Ayuda a prevenir expansiones y contracciones excesivas en suelos volumétricamente inestables.
3. Incrementar la capacidad portante de los suelos de apoyo, respecto a la que es común en las terracerías y capa subrasante
- 4 Ayudar a controlar levantamiento diferencial por congelamiento.
- 5 Evitar el bombeo de suelos finos.

Estudios hechos anteriormente obtuvieron como resultado que las subbases granulares podrían ser benéficas para el comportamiento del pavimento, bajo ciertas condiciones.

En rutas de tránsito pesado se observó que aunque eran deseables subbases granulares de más elevada calidad, las subbases delgadas se comportan tan bien como las gruesas y que el drenaje inadecuado produce deterioro en las subbases de granulometría libre. La compactación irregular de subbases granulares durante la construcción ocasiona problemas que conducen a un control más cuidadoso de la densidad en las obras.

Las arenas de tamaño uniforme muestran, bajo tránsito, ser susceptibles a movimientos, por lo que usualmente se especifican materiales bien graduados.

También se han desarrollado subbases granulares tratadas con cemento, que detienen el bombeo y proporcionan excelente apoyo al pavimento

En años recientes se han adoptado bases de concreto pobre debajo del pavimento de concreto para asegurarse contra la erosión de la subbase. En este concreto se utilizan agregados disponibles localmente y un menor volumen de cemento que el concreto tradicional

Existen suelos volumétricamente inestables. Estos pueden causar distorsiones al pavimento en cualquiera de los siguientes casos:

- a) Cuando se compactan del lado seco o se les deja secar antes de cubrirlos con el pavimento. La expansión posterior puede causar levantamiento de juntas e inversión de la pendiente transversal

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

- b) Cuando están muy húmedos antes de cubrirlos con el pavimento, su construcción puede dejar sin apoyo las orillas de las losas, o aumentar la pendiente transversal
- c) Cuando susceptibles de expansión y contracción estacional pueden causar protuberancias u ondulaciones.
- d) Lo anterior puede causar cambios bruscos en la construcción y expansión de la subrasante.

Lo anterior puede ocurrir preferentemente en regiones áridas o semiáridas, o en regiones con estación seca bien definida, aunque también ocurre cuando los suelos muestran altos índices plásticos y altos límites líquidos.

La expansión puede controlarse mediante sobrecarga. La expansión disminuye con la profundidad.

En todas las subbases uno de los principales factores que la deterioran es el agua. Una subbase saturada se daña miles de veces más rápido que una que no contenga agua.

Los pavimentos bien drenados han resultado más económicos, es recomendable usar subbases con colectores transversales y longitudinales, emplear agregados de 1" a 1/4" (mín 1/4", máx. 1 1/2") y usar gravas duras trituradas.

Si el pavimento sufre cargas pesadas repetidas y exceso de agua se tendrá que drenar. Por lo tanto, se tendrá que cuidar la geometría y pendientes para optimizar drenaje, realizar proyecto del subdrenaje y programar el mantenimiento del subdrenaje (tuberías, salidas, etc.)

Los elementos que se asientan a continuación y que se verán en el siguiente subcapítulo son necesarios para definir las características de los materiales para subbases, y deberán sujetarse a los requisitos de calidad, muestreo, prueba y bases de aceptación establecidos:

- Determinación de la humedad
- Determinación de la densidad
- Determinación del peso volumétrico
- Determinación de la composición granulométrica
- Prueba de compactación del suelo
- Prueba estándar de valor relativo de soporte (portier y modificado)
- Prueba de valor cementante

Los materiales para subbases deberán cumplir los requisitos indicados en la siguiente tabla, por lo que, además, se muestra la gráfica de composición granulométrica.

TABLA No. 16 CARACTERÍSTICAS DE LAS SUBBASES

CARACTERÍSTICAS	DESEABLE	TOLERABLE
Tamaño máximo (mm)	38	51
% < malla No. 200	15 máx	25 máx.
Zona granulométrica	1 y 2	1 a 3
LI (%)	25 máx	30 máx.
I.P (%)	6 máx	10 máx
E.A (%)	40 mín.	30 mín
AASHTO modif. (%)	100 mín.	100 mín
VRS (%)	50 mín	30 mín

Además de cumplir los siguientes requisitos, según la clasificación del material en zonas según granulometría.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA No 17 CARACTERISTICAS DE LAS SUBBASES SEGÚN SU GRANULOMETRIA

Características	Zonas según su granulometría		
	1	2	3
Con tracción lineal (%).	4.5 máx.	3.5 max	2.0 máx
Valor cementante para materiales angulosos kg/cm2	3.5 min	3.0 min	2.5 min
Valor cementante para materiales redondeados kg/cm2.	5.5 min	4.5 min	3.5 min.

Como se observa, se busca una subbase friccionante, con excelente estabilidad volumétrica y baja deformabilidad, aunque el requerimiento de resistencia, medido por el VRS, resulte menor que lo que hoy se exige. El espesor de esta capa seguramente no debe ser menor de 15 cm.

Para la preparación de la subbase se deberá tener cuidado que los niveles de ésta estén dentro de las tolerancias que marcan las especificaciones. Una falla en los niveles puede causar serios trastornos al avance del trabajo para la etapa de colocación del pavimento de concreto hidráulico que siempre se traducen en costos adicionales no recuperables para el constructor. Si los niveles quedan bajos habrá que rellenar la depresión con material de base, dándole el tratamiento adecuado para renivelar y llegar a niveles de proyectos. En el caso que los niveles estén altos, habrá que recortar uno o más centímetros, que se requieran para la renivelación, y siempre se recorta más volumen debido a las características del material de subbase que normalmente contiene agregado de tamaño de 1 1/2". Como resultado, cuando fallan los niveles de la subbase generalmente se sustituye el volumen faltante con concreto hidráulico, esto en costos es del orden de 10 veces superior al de subbase hidráulica. Para evitar estos costos adicionales se hacen las siguientes recomendaciones:

- Antes de iniciar el trabajo de colocación de losas de concreto, deberán hacerse los ajustes en niveles de la subbase, ya sea recorte o adicionar material, reconstruir zonas defectuosas para quedar dentro de especificaciones
- En el caso de usar equipos de tendido con formas deslizantes, deberán dejarse el ancho de la subbase 80 cm mayor a cada lado al ancho de proyecto de pavimentación.
- Cuando se usen formas de cimbra fija en la operación de pavimento, el ajuste de los niveles de la subbase puede hacerse montando del equipo de recorte sobre las formas que han sido alineadas y niveladas previamente o hacerlo manualmente. En caso de usar equipo de nivel automático guiado sobre un cable previamente nivelado, puede caminarsse sobre la subbase.
- Para ajustar niveles finales en subbases de suelo cemento, tendrá que hacerse la operación de afinado antes de que se produzca el endurecimiento inicial, o sea, 3 ó 4 horas después de colado.
- Como operación final, deberán volverse a onecar los niveles de proyecto, así como las compactaciones en zonas que se vieron afectadas por recortes o rellenos.
- En caso de estar especificando un material impermeable sobre la subbase, deberá colocarse este material para su protección

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

- En caso de permitir el tráfico sobre la subbase recibida, habrá que hacerlo con mucha precaución para no dañarla, si se aliera la superficie de la subbase habrá que compactarla antes de proceder a colocar el concreto del pavimento.

Procedimiento de construcción para estabilización de bases.

- a) Subrasante compactada y conformada, con la superficie ligeramente húmeda.
- b) Elaboración de la mezcla de suelo, cemento y agua (wopt + 2%), en planta continua, en proporción volumétrica o en peso
- c) Acarreo de la mezcla en camiones con lona protectora.
- d) Extendido en el lugar, con motoconformadora.
- e) Aplicación complementaria de agua.
- f) Compactación inicial (pata de cabra o támara)
- g) Escarificación y conformación.
- h) Aplicación complementaria de agua.
- y) Compactación final (rodillos neumáticos o metálicos lisos)

III.2 PROPIEDADES Y PRUEBAS DE LOS MATERIALES PARA ASEGURAR SU CALIDAD

La observación de los materiales deberá provenir de fuentes con capacidad de producir materiales con la calidad y la cantidad requerida, además deben de cumplir con los requisitos de las especificaciones y encontrarse en un área cercana a la obra para no tener gastos extra en fletes

Se recomienda que los materiales reúnan las especificaciones siguientes, a menos que las condiciones locales indiquen la necesidad de efectuar alguna modificación.

En trabajos pequeños puede justificarse sólo una cantidad limitada de muestreo y prueba, pero en obras mayores es importante utilizar un control de calidad basado en conceptos estadísticos. El programa requerirá que el contratista, los abastecedores de los materiales o el producto sean responsables del control del producto y que el propietario sea el responsable de su aceptación. Esto requiere que el productor, el abastecedor o el contratista muestren y prueben el producto a fin de controlar los materiales que están siendo utilizados, de tal manera que cumplan con los requisitos especificados y los materiales empleados, así como el concreto resultante sea de calidad uniforme. Por ejemplo: Debido a que es difícil y costoso sustituir un concreto de mala calidad y dado que no existen aún pruebas adecuadas que puedan definir totalmente las propiedades requeridas en el concreto después de su endurecimiento, se puede elegir entre muestrear y probar el concreto plástico a medida que se elabora y antes de su incorporación a la obra, o muestrear y probar cualquiera de los materiales que lo constituyen.

El muestreo para inspección o pruebas preliminares debe solicitarse al productor.

Debe enfatizarse mucho la importancia de un muestreo adecuado. Si éstos se realizan sin cuidado y exactitud, las pruebas no proporcionarán la información correcta y no son representativos del material muestreado. Se deben fijar procedimientos de muestreo adecuado, que conduzca a obtener la máxima información posible respecto a la naturaleza y magnitud de la variabilidad de los materiales.

SUELOS

Las propiedades de los suelos se obtienen por métodos de investigación y pruebas de laboratorio. Se presentan los más usuales en obras de pavimentos rígidos.

Para la realización de un proyecto durante la ejecución de una obra de pavimentación, es necesario conocer datos sobre las propiedades físicas del suelo que hayan de considerarse en sus análisis.

Es recomendable establecer programas preliminares de exploración y muestreo, debe procurarse adquirir una información preliminar suficiente respecto al suelo, que con ayuda de pruebas de clasificación permita formarse una idea clara de los problemas que se han de esperar en cada caso particular. Posteriormente se deben realizar una serie de pruebas definitivas necesarias para la obtención del cuadro completo de datos de proyecto.

En general, los principales tipos de sondeo son.

- A. Exploratorios
- B. Definitivos
- C. Geofísicos

Los métodos exploratorios se subdividen en:

A.1 POZOS A CIELO ABIERTO - Consiste en excavar un pozo de dimensiones tales, que pueda bajar una persona y examinar los diferentes estratos de suelo en su estado natural. No es usual realizar este tipo de excavaciones a grandes profundidades debido al encarecimiento.

En estos pozos se pueden tomar muestras alteradas o inalteradas de los diferentes estratos que se hayan encontrado.

A.2 PERFORACIONES CON POSTEADORA, BARRENOS HELICOIDALES Y CUCHARAS ESPECIALES - Con este tipo de perforaciones se extraen muestras completamente alteradas. Existen gran variedad de este tipo de herramientas, en algunos casos se conecta al extremo de una tubería de perforación.

A.3 PENETRACIÓN ESTÁNDAR.- Es probablemente el más usado en México en sondeos exploratorios, ya que rinde mejores resultados prácticos y proporciona información más útil en torno al subsuelo. El equipo necesario consta de un muestreador especial o penetrómetro estándar, normalmente de media caja que se enrosca al extremo de la tubería de perforación. El método consiste en hacerlo penetrar a golpes por un martinete de 63.5 kg. que cae desde 76 cm, contando el número de golpes necesarios para lograr una penetración de 30 cm. Esta prueba permite correlacionar en el campo y en el laboratorio, la compacidad y el ángulo de fricción interna en arenas y el valor de la resistencia a la compresión simple en arcillas, principalmente.

MATERIALES PETREOS

Los puntos básicos que deben considerarse para seleccionar los bancos, entre otros, son los siguientes:

- a) **CALIDAD.**- Es uno de los requisitos más importantes que deben tomarse en cuenta al seleccionar un banco de materiales pétreos para pavimentación, ya que deberán cumplir con las normas establecidas para el tipo de obra que se vaya a ejecutar, más un cierto margen de seguridad.
- b) **ACCESIBILIDAD.**- Es otro de los factores importantes, ya que de no tomarse en cuenta se pueden llegar a tener fracasos económicos de importancia si se fijan bancos inaccesibles o de muy difícil acceso.
- c) **FACILIDAD DE EXPLOTACIÓN.**- Este punto tiene influencia directa tanto en el aspecto económico, como en el cumplimiento de los programas de obra. Por tal motivo, se deberá evitar localizar bancos en zonas montañosas, en las cuales no se tengan sitios apropiados para la instalación del equipo, para la explotación, tratamiento, maniobras y almacenamientos de los materiales procesados, tampoco en sitios próximos a obras por construir, que al efectuarse el ataque del banco se ocasionen obstrucciones en ellas, en las cercanías de instalaciones que son costosas para mover o donde ponen en peligro estructuras como cortinas de presas, torres de transmisión, etc.
- d) **VOLUMEN DISPONIBLE** - Este es otro factor que deberá tomarse en cuenta al localizar un banco, ya que en los casos en donde el material requiere para su utilización cierto tratamiento por medio de máquinas o instalaciones costosas, el volumen por extraerse debe justificar estos gastos, a fin de que la explotación del banco resulte económica.

- e) **TRATAMIENTO.**- De preferencia es conveniente trabajar con materiales cuyos tratamientos sean sencillos, tales como el disgregado, el cribado o cuando más el triturado, a fin de evitar aquéllos que requieran procedimientos adicionales complicados que resultan caros y en ocasiones por no disponerse de todo el equipo especializado necesario, se recurre a adaptaciones que al final no producen el material con la calidad adecuada.
- f) **COSTOS** - Es necesario efectuar un análisis económico de los bancos que se tengan disponibles, teniendo en cuenta los aspectos básicos anteriormente tratados, con lo cual se estará en posibilidad de eliminar aquéllos que no sean competitivos.

Para evitar el mezclado de diferentes clases y tamaños, la segregación, degradación, los agregados deben ser manejados y almacenados mediante la construcción de almacenamientos en capas horizontales sucesivas de 1 m de espesor como máximo, terminado totalmente con una capa antes de empezar la siguiente. Cuando el equipo de acarreo opere sobre un almacenamiento, deben protegerse las rampas y paso con esteras o entablados apropiados, se recomienda usar sólo vehículos con llantas de hule para minimizar la degradación.

El agregado que esté segregado, degradado o contaminado y que no cumpla con las especificaciones al ser extraído, debe ser reacondicionado ante de utilizarse mediante mezclado, cribado o cualquier otro procedimiento.

Los agregados producidos o manipulados por métodos hidráulicos o lavados deben dejar drenar durante 12 horas por lo menos antes de ser utilizados. Vehículos, barcazas o almacenamientos con agujeros ofrecen una buena forma de drenaje. Los agregados congelados deben descongelarse antes de utilizarse

Cuando el agregado tenga que ser mezclado debe de tener una humedad razonablemente uniforme. Se recomienda humedecer a los agregados secos antes de la dosificación, esto producirá enfriamiento por evaporación y reducirá las variaciones de humedad y la absorción excesiva del agua de la mezcla.

Las pruebas más usuales utilizadas en pavimentos rígidos se describen a continuación:

1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Esta es una prueba definitiva para juzgar la calidad de un material. Consiste en la determinación de los tamaños de las partículas que forman el suelo por el procedimiento de cribado (malla), o por el de sedimentación (hidrómetro).

En algunas ocasiones se presentan suelos que contienen suficiente material grueso y fino, lo que amerita un análisis por medio de los dos métodos, a lo que se llama procedimiento de análisis mecánico combinado.

1.1 ANÁLISIS POR MALLAS

Para la realización de este análisis, en México se utilizan las mallas U.S. Bureau of Standards siguientes:

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Número	Abertura en mm
2"	50.8
1"	25.4
3/4"	19.1
1/2"	12.7
3/8"	9.52
4	4.76
10	2.00
20	0.840
40	0.420
60	0.250
100	0.149
200	0.074

El procedimiento de prueba consiste en colocar la fracción gruesa en un juego de mailas, dispuesto en orden descendente de abertura, incluyendo tapa y charola y efectuar un cribado vigoroso durante 5 minutos como mínimo; es conveniente, para ello, disponer de un dispositivo mecánico especial (RO-TAP)

Posteriormente se pesan los retenidos de cada malla, ninguna partícula deberá quedar adherida en sus enramados. Se obtendrá así los porcentajes retenidos parciales, referidos al peso total de la muestra. Estos porcentajes sumados nos dan el peso total de la muestra, con estos datos puede dibujarse la curva acumulativa, que nos representará el tipo de suelo analizado.

2.0 LÍMITES DE PLASTICIDAD Y PRUEBAS COMPLEMENTARIAS

Estas pruebas tiene por objeto determinar la plasticidad de la porción de material que pasa la malla No. 40 y que forma parte de un suelo.

La plasticidad es una propiedad de las arcillas que les permite cambiar su forma sin agrietarse cuando se les sujeta a una presión, reteniendo su nueva forma cuando desaparece el esfuerzo aplicado.

La porción de un suelo que pasa por la malla No. 40 presenta una consistencia plástica para un contenido de humedad comprendido entre dos límites: el límite plástico y el límite líquido, y su amplitud es medida por el índice plástico

El límite líquido de un suelo plástico se define como el estado de dicho suelo, para el cual se considera que existe una división entre las consistencias plásticas y semilíquida.

El límite plástico es el estado en que se considera que existe una división entre las consistencias plásticas y semisólida de un suelo.

El índice plástico es la diferencia aritmética entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

Los suelos con características arenosas no presentan consistencia plásticas, sino que pasan de la consistencia semisólida a la consistencia semilíquida

PREPARACION DE LA MUESTRA

El suelo se tamiza por la malla No. 40 para obtener una cantidad mínima de 300 gr. A la mitad de esta cantidad de material se agrega agua hasta tener una humedad ligeramente superior a la del equivalente de humedad de campo y se deja en un recipiente durante 24 horas antes de efectuar las pruebas.

2.1 DETERMINACIÓN DEL EQUIVALENTE DE HUMEDAD EN CAMPO

Se define como la humedad mínima requerida para que una gota de agua colocada en la superficie alisada del suelo no sea absorbida totalmente, sino que permanezca extendida en dicha superficie, dándole una apariencia brillante durante 30 segundos.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Se prepara el material manipulando con la espátula el material se coloca en la cápsula, procurando lograr una distribución uniforme de la humedad, se forma una superficie tersa sobre la cual se deja caer una gota. Si la gota desaparece en un tiempo menor se 30 segundos, se hace un ligero incremento de humedad y se repite la operación el número de veces necesario para lograr que la gota de agua desaparezca al término de 30 segundos.

Se toma una muestra del material que ha alcanzado ya la humedad que se deseaba determinar, se coloca en un vidrio de reloj y se pesa.

Se seca en un horno hasta peso constante y se calcula el contenido de humedad dividiendo el peso de la muestra húmeda menos el peso de la muestra seca, entre el peso de la muestra seca, y multiplicado por 100 el consiente obtenido

$$W_e = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_t} \times 100$$

Donde:

W_e = Equivalente de humedad en campo

P_1 = Peso de la muestra húmeda más peso del recipiente

P_2 = Peso de la muestra seca más peso del recipiente

P_t = Peso del recipiente

2.2 DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO

El límite de un suelo plásico se expresa por la humedad que contiene el suelo en el estado que separa las consistencias plásticas y semilíquida

En los suelos de características arenosas, el límite líquido queda expresado por la humedad que contiene el suelo en el estado que separa las consistencias semisólida y semilíquida

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Se prepara el material colocándolo en un cápsula de porcelana y se procede a hacer homogéneo el material.

Se coloca en la copa de latón del aparato de casa grande en cantidad ligeramente excedida, de manera que al ser extendido por medio de una espátula se tenga en el centro un espesor 1.0 cm.

Una vez nivelado con la espátula se procede a dividirlo en mitades utilizando el ranurador.

Accionando la manivea se hace caer la copa desde una altura de 1.0 cm a razón de dos golpes por segundo, el número de veces necesario para lograr una ligera liga íntima de los bordes inferiores de la ranura, en una longitud de 13 mm (0.5"). Si el número de golpes es superior a 25, la humedad de la muestra es inferior al límite líquido. Si el número de golpes necesarios para cerrar la ranura es inferior a 25, la humedad de la muestra resulta superior al límite líquido. La prueba se repetirá el número de veces necesario hasta lograr que con 25 golpes se cierre la ranura en la forma especificada.

La humedad que contiene la muestra en estas condiciones es precisamente la del límite líquido. Para determinarla se toma una muestra del material del centro de la copa y se procede a hacer la determinación de humedad siguiendo el procedimiento indicado.

$$W = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_t} \times 100$$

2.3 DETERMINACIÓN DEL LIMITE PLÁSTICO

El límite plástico queda expresado por la humedad que contiene un suelo en el estado que separa la consistencias semisólida y plástica.

En los suelos arenosos el límite plástico coincide con el límite líquido.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Se prepara el material con lo cual se forma una pequeña bola de 12 mm de diámetro aproximadamente, que se moldea con los dedos y a la cual se le da una forma cilíndrica manipulando sobre la palma de la mano, aplicando con los dedos la presión necesaria para formar un cilindro, que es transferido a la placa de vidrio. En ésta se continúa el rodillado hasta que el cilindro alcance un diámetro de 3.2 mm.

Si al alcanzar dicho diámetro el cilindro no se rompe en varias secciones simultáneas, su humedad es superior a la del límite plástico.

De ser necesario, este proceso se repite el número de veces hasta que se produzca un rompimiento del filamento en varios segmentos simultáneamente, al momento de alcanzar el diámetro de 3.2 mm. Se toman todos los fragmentos en que se ha dividido el filamento y se hace la determinación de humedad de acuerdo con lo especificado.

$$W_p = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_t} \times 100$$

Los suelos que no pueden rodillarse, es decir, formar cilindros del diámetro especificado con ningún contenido de humedad, se consideran como no plásticos

2.4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE PLÁSTICO

El índice plástico de un suelo queda expresado por la diferencia aritmética entre el límite líquido y el límite plástico de dicho suelo.

$$L P = I I - W p$$

2.5 DETERMINACIÓN DE LA CONTRACCIÓN LINEAL

La contracción lineal de un suelo es la disminución en una dimensión de la masa del mismo, expresada como un porcentaje de la dimensión original, cuando el contenido de humedad se reduce desde una cantidad igual a la del límite líquido hasta el límite de contracción. Es el contenido de humedad para el cual el suelo alcanza su máxima contracción.

3. PESO VOLUMÉTRICO

El peso volumétrico húmedo de un suelo es el peso del agua y de las partículas sólidas del suelo contenidas en la unidad de volumen, considerando los huecos que quedan entre ellas.

$$Y W = \frac{P W}{V}$$

Donde:

Y W = Peso volumétrico húmedo en kg/cm³.

P W = Peso de material seco en kg.

V = Volumen del suelo, incluyendo los huecos en cm³.

El peso volumétrico seco de un suelo se obtiene de igual forma que el anterior (en este caso no existe el peso del agua).

$$Y S = \frac{P S}{V}$$

3.1 DETERMINACIÓN PESO VOLUMÉTRICO SUELTO

Esta prueba da una idea general respecto a la calidad del suelo. El peso volumétrico es función de la granulometría y de la densidad de las partículas de suelo, siendo mayor en los suelos granulares bien graduados, de densidad alta.

La principal aplicación de esta prueba es la conversión de peso de material a volúmenes. Al hacer el proporcionamiento de una mezcla de materiales, éste se proyecta por peso y es necesario expresar la relación de volúmenes, ya que es ésta la forma práctica en que trabaja en el camino.

$$Y F = \frac{P}{V}$$

Donde

YF = Peso volumétrico suelto en kg/cm³

P = Peso del material contenido en el recipiente en kg.

V = Volumen del recipiente, o volumen del material contenido en el mismo en cm³.

4. DETERMINACIÓN ESTÁNDAR DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

La cantidad de muestra que deberá tomar para esta determinación dependerá del tamaño máximo del agregado. Para muestras de suelo de agregado máximo de 2" se deberá tomar aproximadamente 1 kg de muestra y las pesadas deberán hacerse en una balanza de 0.1 gr de aproximación.

PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Se pesa la muestra de suelo húmedo en el recipiente que la contiene, registrándose este peso como P₁.

Se quita la tapa al recipiente y se mantiene la muestra en un horno a temperatura constante entre 100-110° C durante 20 horas aproximadamente

Se pesa la muestra seca en el mismo recipiente original, incluyendo la tapa, dejándola enfriar previamente hasta que alcance la temperatura ambiental, anotándose el peso P₂.

Se pesa el recipiente vacío con su tapa y se anota dicho peso P_T:

Se calcula el contenido de humedad, en porciento, por medio de la fórmula:

$$W = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_T} \times 100$$

5. ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS

Este procedimiento de prueba se refiere a la determinación de la cantidad de agua absorbida por el material pétreo que se ha dejado saturado en agua a una temperatura de 15-25°C durante 24 horas

La absorción se calculará por la fórmula:

$$WABS = \frac{P_W - P_S}{P_S} \times 100$$

Donde:

WABS = Humedad de absorción, en porciento

P_W = Peso de la muestra saturada y superficialmente seca

P_S = Peso de la muestra seca en gramos

6. PRUEBAS DE COMPACTACION

6.1 PROCTOR ESTÁNDAR Ó AASHTO.

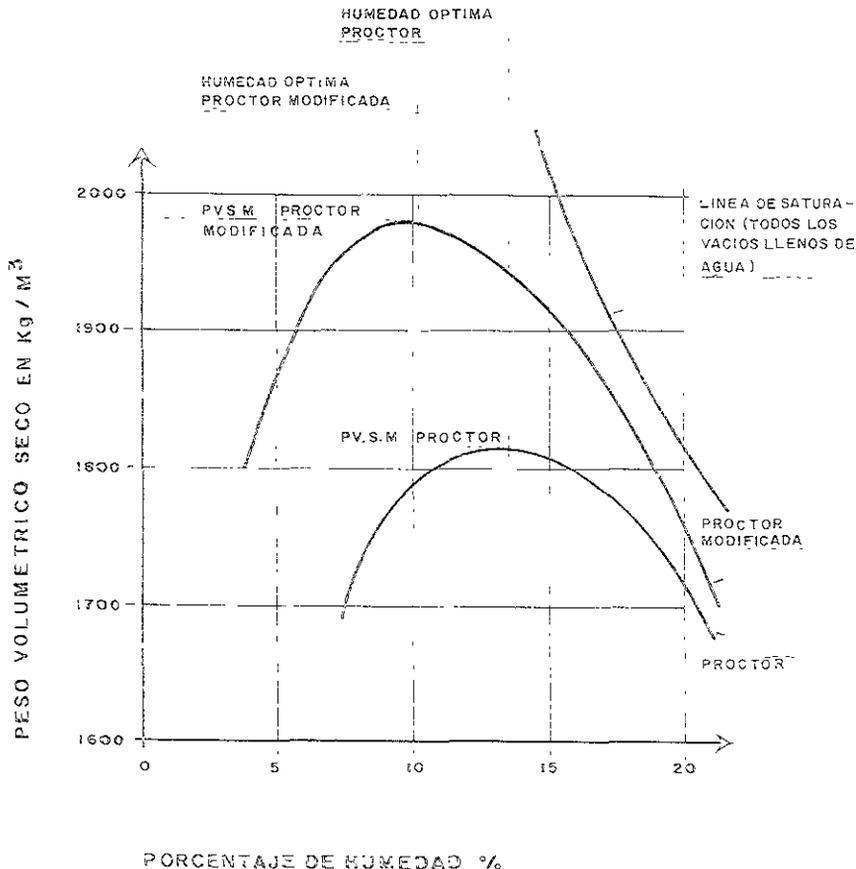
Proctor estableció que hay una correspondencia entre el peso volumétrico seco de un suelo compactado y su resistencia. Proctor desarrolló una prueba que consiste en:

a) Se toma una muestra representativa del suelo a compactar de humedad conocida.

Se toma un cilindro de 4" de diámetro x 4 1/2" de altura, se llena en tres capas aproximadamente iguales con el material de la prueba.

Cada capa se compacta con 25 golpes de un martillo de 2.5 kg con un área de contacto de 20 cm², el que se deja caer de 35 cm de altura. Todo esto con el objeto de siempre dar al material la misma energía de compactación.

GRAFICA No 9 RELACION DE % DE HUMEDAD-PESO VOLUMETRICO SECO



Se pesa el material y como el volumen es conocido se calcula el peso volumétrico húmedo. Como la humedad es conocida, se resta el peso del agua y se obtiene el peso volumétrico seco para esa humedad.

Se repite la prueba varias veces, variando cada vez el grado de humedad, con lo que se obtienen pares de valores de humedad-peso volumétrico seco. Con estos pares de valores se dibuja la gráfica No. 9

Puede observarse en la gráfica que hay un cierto contenido de humedad, para el cual el peso volumétrico es máximo. Este peso se conoce como: "peso volumétrico seco máximo", o "peso proctor" y el contenido de humedad como "humedad óptima"

6.2 PRUEBA PROCTOR MODIFICADA O AASHTO MODIFICADA

Debido a que el equipo de compactación de campo comercialmente disponible en estos últimos años alcanza mayores compactaciones, la prueba proctor estándar no logra representar en forma adecuada estas compactaciones, lo que condujo a una modificación de la prueba, aumentando la energía de compactación. Esto se logró aumentando el peso del pisón a 4.5 kg y la altura de caída del mismo a 45.7 cm, utilizando el mismo molde y número de golpes.

La energía específica de compactación aumentó en 6 kg/cm². (proctor estándar) a 27.2 kg/cm², calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{Energía específica} = \frac{N h W}{V}$$

Donde:

- N = Número de golpes por capa
- h = Número de capas de suelo
- W = Peso del pisón
- h = Altura de caída libre del pisón
- V = Volumen del suelo compactado

Consecuentemente con respecto al contenido de agua, la nueva humedad óptima será ahora menor que en el caso de la prueba estándar.

6.3 PORTER

Tanto la prueba proctor como la proctor modificada han dado muy buen resultado en suelos cuyos tamaños máximos son de 10 mm (3/8"); en suelos con partículas mayores el golpe del martillo no resulta uniforme y por lo tanto, la prueba puede variar de resultados en un mismo material

Esta prueba difiere de las antes mencionadas, principalmente en que el molde requerido es de 6" de diámetro por 8" de altura, con el fondo perforado. Se llena, en tres capas, cada capa se pica 25 veces con una varilla de 5/8" (1.9 cm) de diámetro por 30 cm de longitud con punta de bala.

Sobre la última capa se coloca una placa circular ligeramente menor que el diámetro del cilindro y se mete el molde en una prensa de 30 toneladas

Se aplica una carga gradual hasta alcanzar una presión de 140.6 kg/cm² en cinco minutos. Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad ensayada es inferior a la óptima. Al llegar a la humedad óptima, se determina el peso volumétrico seco de la muestra.

7. PRUEBA ESTÁNDAR DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE

Tiene por objeto determinar la calidad de los suelos en cuanto a valor de soporte se refiere, midiendo la resistencia a la penetración del suelo compactado y sujeto a un determinado periodo de saturación.

Los pasos necesarios para verificar la prueba se indican a continuación en su orden respectivo:

1. Obtención de la humedad óptima de porter por compactación de varios especímenes con la carga unitaria de 140.6 kg/cm² a diversas humedades.
2. Saturación del espécimen compactado a humedad óptima hasta que alcance su máxima expansión.
3. Determinar la expansión sufrida durante la saturación.
4. Determinación de las resistencias a la penetración.

Esta prueba fue desarrollada originalmente en el Estado de California, E.U.A. El valor relativo de soporte se obtiene de una prueba de penetración, en el cual un vástago de 19.4 cm² (3 pulg.2) de área se hace penetrar en un espécimen de suelo a razón de 0.127 cm/min (0.05 pulg./min.), se mide la carga aplicada para penetraciones que varíen en 0.25 cm (0.1 pulg). El VRS se define como la relación expresada como porcentaje, entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0.25 cm (0.1 pulg) y la presión para tener la misma penetración en un material arbitrario, adoptado como patrón, que es una piedra triturada, en la cual se tienen las presiones en el vástago para las penetraciones indicadas en la siguiente tabla.

TABLA No. 18 PENETRACION EN MATERIAL PATRON

PENETRACION		PRESIÓN EN EL VÁSTAGO	
cm	pulg	kg/cm ²	lbs/pul ²
0.25	0.1	70	1,000
0.50	0.2	105	1,500
0.75	0.3	133	1,900
1.00	0.4	161	2,300
1.25	0.5	182	2,600

Este procedimiento no ha demostrado ser completamente satisfactorio para materiales como agregados gruesos, siendo necesario realizar varias pruebas con el fin de determinar un valor promedio razonable.

Con el resultado obtenido en esta prueba se clasifica el suelo usando la siguiente tabla, que indica el empleo que puede dársele al material, por lo que a valor relativo de soporte se refiere.

TABLA 18 CLASIFICACION DEL MATERIAL SEGÚN SU VALOR RELATIVO DE SOPORTE

ZONA	VALOR RELATIVO DE SOPORTE	CLASIFICACIÓN
1	0 - 5	Subrasante muy mala
2	5 - 10	Subrasante mala
3	10 - 20	Subrasante regular a buena
4	20 - 30	Subrasante muy buena
5	30 - 50	Subbase buena
6	50 - 80	Base buena
7	80 - 100	Base muy buena

8. VALOR CEMENTANTE

Se determina en suelos finos que pasen la malla No. 4. El valor cementante es una función de la forma y acomodo de las partículas de suelo y de su rugosidad, de la plasticidad de los finos y de otros fenómenos que tiene relación con la composición química del suelo.

Es un factor primordial en el caso de subbases abiertas al tránsito que no tienen protección. Hay que tomar en consideración, sin embargo, que un valor cementante alto puede ser debido a exceso de arcilla, condición que es poco deseable. Después de alcanzar la humedad óptima de compactación, se compacta el material en tres capas, apisonado con 15 golpes de la varilla y una altura libre de caída de 50 cm para cada capa. El molde con el material compactado se coloca en el horno a temperatura de 40°C hasta la remoción del molde., se continúa el secado a una temperatura de 100 a 110°C hasta que se pierda toda la humedad.

Se deja enfriar y se prueba la compresión. El valor cementante es el promedio de la resistencia a la compresión sin confinar obtenida en tres diferentes especímenes y se expresa en kg/cm².

9. CONSISTENCIA (REVENIMIENTO)

La consistencia se determina de acuerdo con el método de prueba para revenimiento del concreto de cemento Portland.

El revenimiento es el abatimiento de altura que ocurre al quitar el molde (molde metálico en forma tronco cónica con 20 cm de diámetro de la base, 10 cm de diámetro superior y 30 cm de altura) y que nos da idea de la plasticidad o manejabilidad del concreto.

La forma de realizar la prueba es la siguiente:

- Humedecer el molde y la base.
- Remezclar el concreto y llenar el molde con pala
- Procurar que el molde no se mueva sujetándolo con los pies, apoyándolos en los esribos.
- Debe ser llenado en tres capas iguales aproximadamente
- Realizar la compactación introduciendo la varilla 25 veces (13 ocasiones por la periferia, inclinando la varilla y las resiantes dirigidas hacia el centro hasta completar 25 veces en forma espiral).
- La mezcla siempre deberá exceder del borde del molde
- Enrazer el concreto rodando una varilla lisa.
- Levantar el molde (esta operación debe hacerse de 9 a 10 segundos).
- Al levantar el molde la mezcla se derrama y entonces se mide la diferencia entre la altura del molde y la altura de la mezcla, esta altura en centímetros nos da el revenimiento.

- El revenimiento recomendado en pavimentos tiene de tolerancia máxima 8 y mínima 2.

10. PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO

Las muestras para pruebas de resistencia a la flexión como base para el diseño de mezclas de concreto, deben ser moldeadas y curadas de acuerdo con el "Método estándar" de prueba para resistencia apoyada con carga en el tercio medio del claro.

Para muestra en el campo, deben tomarse dos grupos de muestras para prueba de resistencia a la flexión. Se deben curar dos grupos de muestras. El grupo I es para verificar la eficacia del diseño efectuando en el laboratorio para el proporcionamiento y mezclado en obra. El grupo II es para verificar la eficacia del curado y otras condiciones de trabajo; debe fabricarse un mínimo de dos vigas de cada grupo. Las vigas del grupo I deben fabricarse al iniciarse una obra, o cuando se efectúan cambios importantes en los materiales o en el proporcionamiento. Las vigas del grupo II deben fabricarse en número suficiente para llevar a cabo el control de calidad de la obra; por ejemplo, dos series cada día para obras que se construyen con rapidez y una serie para obras que se realizan a un ritmo bajo o moderado.

Si se usa otro tipo de máquina de prueba, los resultados deben correlacionarse con los obtenidos en el aparato estándar. Las especificaciones de la obra deben señalar claramente la frecuencia con la que habrán de fabricarse las series de muestras de prueba y el método de curado que se usará para cada grupo.

El módulo de rotura o resistencia a tensión, se calcula con la siguiente expresión:

$$M_r = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde,

M_r = Módulo de ruptura por flexión, kg/cm².

P = Carga máxima aplicada, registrada en la máquina de ensaye, kg

L = Longitud del claro entre apoyos, cm.

b = Ancho promedio del espécimen, cm.

d = Peralte promedio del espécimen, cm.

Si la falla ocurre fuera del tercio central, pero a una distancia de dicho tercio no mayor de 0.05 L , el módulo de ruptura se calculará con la expresión:

$$M_r = \frac{3Pa}{bd^2}$$

En que "a" es la distancia entre línea de falla y el apoyo más cercano, medida a lo largo del eje central de la cara inferior de la viga.

No más del 20% de los especímenes probados tendrán valores de resistencia menores que el especificado y el promedio de cualquier grupo de cuatro pruebas consecutivas deberá ser mayor que el 90% del especificado.

11. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

Esta prueba consiste en determinar la resistencia a la compresión del concreto mediante muestreos obtenidos en diferentes procesos de una obra.

La resistencia promedio del concreto a compresión está en función, principalmente, de la relación agua-cemento.

TABLA 20 RESISTENCIAS DEL CONCRETO A LA COMPRESION SEGÚN SU RELACION DE AGUA-CEMENTO

Relación agua cemento en peso	Concreto con aire incluido	Concreto sin aire incluido
0.40	300	380
0.45	275	345
0.50	245	300
0.55	220	270
0.60	190	240
0.65	170	210
0.70	155	190

En la tabla anterior se presentan las resistencias promedio del concreto a compresión (a los 28 días), obtenida por diferentes valores en la relación agua-cemento.

Para obtener la muestra, se toma un molde cilíndrico de 15 cm de diámetro, 30 cm de altura y base metálico, el cual es llenado siguiendo los procedimientos marcados por las especificaciones, descimbrado a las 20 horas como mínimo y curado, generalmente a los 28 días (también se usan muestras a los 14 y 7 días)

El ensaye de la muestra se realiza aplicando presión mediante un marcado de carga, el cual registra la presión aplicada hasta que se presenta la falla del cilindro.

Obteniendo la presión (P) en kg y el área (A) de contacto del cilindro donde fue aplicada. La resistencia a la compresión del concreto se obtiene de la siguiente fórmula:

$$F'c = \frac{P}{A} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

donde:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (15)^2}{4} = 176.71 \text{ cm}^2.$$

12 CONTENIDO DE AIRE

El contenido de aire del concreto plástico puede determinarse de acuerdo con los métodos estándar de prueba contenido de aire (1) pavimétrico, (2) volumétrico, o (3) método de presión. Para concretos con escorias de altos hornos, agregados ligeros u otros materiales porosos vesiculares, debe emplearse el método volumétrico (rolado) para garantizar mediciones precisas. El método más utilizado en concretos normales es el método de presión.

III.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO Y PROPORCIONAMIENTO DE LOS MATERIALES

Todos los cementos que se usen en una obra deben de provenir de la misma fuente, a menos que las especificaciones permitan lo contrario

Se recomienda que se empleen los siguientes tipos:

- Cemento Portland
- Cementos hidráulicos mezclados

Cuando alguno de los cementos Portland sea mezclado con otro material cementante, se recomienda utilizar uno de los siguientes:

- Cemento natural
- Cemento de escoria
- Ceniza volante
- Puzoliana natural

Los pavimentos de concreto, así como la mayor parte de las bases de concreto están expuestas a situaciones bastante severas. Además de las cargas del tránsito, existen muchos otros factores que tienden a destruirlos. Están sujetos a cambios bruscos de temperatura, abrasión, aplicaciones salinas y a la existencia de valores de soporte erráticos en la capa subrasante en todas las edades y desde las primeras horas de trabajo. Por estas razones y desde luego, también por economía, resulta necesario extremar los cuidados en el proporcionamiento de los materiales.

Cualquiera que sea el método de proporcionamiento que se emplee, el concreto producido debe alcanzar una resistencia compatible con el diseño estructural

El concreto se compone básicamente de cemento, agregado y agua, mezclados entre sí, a los que se les permite solidificarse después de haber sido depositados. Algunas veces se emplean elementos adicionales con diferentes propósitos, como producir un color deseado, mejorar la manejabilidad, entrapar aire, reducir la segregación, o acelerar el fraguado o endurecimiento.

El proporcionamiento de una mezcla para concreto involucra la determinación de las proporciones adecuadas de cemento, agregado y agua, además de cualesquier otro elemento.

El agregado fino y el grueso constituye del 75 al 80% de la masa y se unen entre sí para formar un cuerpo sólido por la solidificación de la pasta hecha con cemento y agua. El agua sirve para dos fines: causa la hidratación del cemento en una masa sólida y le da al concreto fresco la suficiente plasticidad para permitir su adaptación a cualesquier forma deseada. Si se utiliza una cantidad excesiva de agua, se diluye la pasta y debilita el concreto. Si se utiliza una cantidad mínima de cemento, no habrá la suficiente pasta para unir entre sí (ocaa las partículas del agregado y la resistencia del concreto resultará afectada. Por tanto, es obvio que la correcta cantidad de agua en la elaboración del concreto debe ser la mínima necesaria par darle al concreto la suficiente plasticidad.

Un concreto económico que posea las propiedades requeridas puede producirse utilizando los tamaños más grandes de agregado grueso y la menor cantidad de agua. Los grandes trozos de agregado ya están unidos por la naturaleza y no requieren de cemento para este fin. Si el contenido de agua se mantiene bajo, la resistencia de la pasta de cemento será alta y podrá producirse un concreto fuerte con menos cemento.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Para producir un concreto con las propiedades requeridas, es necesario controlar la cantidad de cada uno de los materiales que entran en la mezcla. A esto se le llama "proporcionamiento de los materiales". Aunque el proporcionamiento puede hacerse por peso o por volumen, el último método es tan inseguro que no debe utilizarse en ninguna obra en donde las propiedades del concreto sean de importancia. El proporcionamiento en peso es mucho más seguro y más común que el método por volumen.

El cemento en bruto es más barato que el cemento embolsado, pero a no ser que la obra sea lo suficientemente grande para justificar la instalación de las facilidades para manejar el cemento en bruto, será más satisfactorio emplear cemento en bolsas.

El cemento en bolsas o sacos debe almacenarse en un lugar seco y dejarse en los sacos originales hasta que se vaya a utilizar. El cemento en bruto se descarga generalmente de los vagones o camiones y se almacena en un silo adecuado o en una tolva totalmente cerrada.

Las especificaciones de una obra pueden requerir que el concreto se produzca con un agregado que tenga de dos a seis rangos de tamaño. La cantidad de material de cada uno de los rangos debe medirse cuidadosamente. La función del equipo de clasificación es la de llevar a cabo esta operación.

En vista del significativo efecto que tiene la cantidad de agua sobre las propiedades del concreto, es necesario proporcionar un método para medirla con precisión. La mayoría de las revolventoras de concreto están equipadas con tanques medidores que pueden ajustarse para suministrar cualquier cantidad razonable de agua para revolutura.

Entre otros aparatos que se utilizan para medir este líquido se encuentran los medidores automáticos y los tanques pesadores de agua.

Si el agregado contiene agua superficialmente libre, ésta debe incluirse como parte de la cantidad total de agua de concreto.

Las especificaciones para el proporcionamiento deben establecer límites para los siguientes factores básicos: ya sea la relación agua/cemento máximo o la resistencia mínima o el contenido de cemento mínimo. Además deben especificarse también los contenidos de aire mínimo y máximo, el revenimiento máximo del agregado. Los pesos preliminares de los materiales para el proporcionamiento pueden obtenerse de la experiencia, o bien, de tablas de relaciones aproximadas, o de pequeñas mezclas de prueba; pero cualquiera que sea el procedimiento para determinar inicialmente los pesos de materiales para la mezcla, el proporcionamiento final debe establecerse con base en mezclas fabricadas a escala real, al iniciarse la obra.

Cuando se especifica un contenido mínimo de cemento como criterio de calidad para pavimentos de concreto, se recomienda un mínimo de 335 kg de cemento por m³ de concreto, a menos que la experiencia local demuestre que este mínimo puede disminuirse. Si se utiliza alguno de los factores de proporcionamiento de mezclas permitidos, por ejemplo, la resistencia requerida, de acuerdo con el contenido de aire y el revenimiento especificados, podría emplearse menos cantidad de cemento por metro cúbico, particularmente si en la obra se emplean ciertos aditivos y/o alguna mezcla de materiales cementantes. En cualquier caso, las resistencias especificadas del concreto para propósitos de diseño y durabilidad no deben ser menor de 45.7 kg/cm² de resistencia a la flexión a la edad de 28 días, en vigas con cargas en el tercio medio y de 281.1 kg/cm² a los 28 días, en muestras probadas a compresión.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Si el ingeniero proyectista tiene en mente otros parámetros para el concreto, la cantidad requerida de cemento por metro cúbico, bajo el criterio del método de resistencia mínima, deben ser aumentados o disminuidos de acuerdo con la experiencia previa. El Comité recomienda que el contenido de cemento en ningún caso debe ser menor de 280 kg/m³, en el método de cantidad mínima de cemento y que la resistencia a la flexión a los 28 días no debe ser menor de 38.7 kg/cm², en el método de resistencia mínima.

Cuando no sea práctico el uso del procedimiento recomendado para el proporcionamiento de mezcla como, por ejemplo, en el caso de obras pequeñas, con mezcla elaborada en el lugar, pueden utilizarse los datos que aparecen en la siguiente Tabla No. 21, con objeto de establecer mezclas de prueba adecuadas para las condiciones mencionadas.

TABLA 21 - EJEMPLO DE UN PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS BASADO EN EL FACTOR DE CONTENIDO MÍNIMO DE CEMENTO Y EN UNA RELACIÓN AGUA/CEMENTO MÁXIMO

PROPORCIONES DE MEZCLA POR SACO DE CEMENTO DE 50 KG

TIPO DE CONCRETO	TIPO DE AGREGADO GRUESO	CANT. AGUA MAX. LTS.	AGREGADOS KG FINO	GRUESO
Simple	Grava redondeada	22.3	98.2	194.0
Simple	Grava o piedra triturada	24.4	106.2	178.3
Simple	Escoria triturada	26.6	116.4	138.0
Con aire incluido	Grava redondeada	19.8	85.0	194.0
Con aire incluido	Grava o piedra triturada	22.1	95.4	178.3
Con aire incluido	Escoria triturada	24.5	104.0	138.0

NOTA 1:

Las proporciones están encaminadas a producir concreto que contenga 335 kg de cemento por m³, con revenimiento de 4 a 7.5 cm propio para su colocación normal con máquina. Cuando se vibre el concreto, el revenimiento debe reducirse 1.5 a 5 cm y ajustarse la dosificación para mantener el mismo revenimiento y el mismo factor de cemento.

NOTA 2:

Se considera que el contenido de aire es de 1% para concreto normal y de 5.5% para mezclas con aire incluido.

NOTA 3:

Los pesos de los agregados están basados en pesos específicos sobre material en estado saturado y superficialmente seco, de 2.65 para arena, grava y piedra triturada y de 2.25 para escoria. Para otros pesos específicos, los pesos de los agregados deben ajustarse en proporción directa al peso específico, tanto los pesos de los agregados como la cantidad de agua de mezclado deben ajustarse para tomar en cuenta la humedad de los agregados.

NOTA 4.

Se supone que el agregado fino es una arena natural bien graduada (módulo de finura de 2.6 a 2.9).

ACERO DE REFUERZO Y ACCESORIOS

El acero de refuerzo debe estar libre de polvo, aceite, pintura u otros materiales orgánicos que puedan tener un efecto perjudicial o reducir la adherencia con el concreto. La presencia de óxido, pequeñas escamas o de una combinación de ambos, puede considerarse aceptable.

El tamaño del espaciamiento de los elementos debe mostrarse en los planos del proyecto. Todas las intersecciones de las varillas transversales y longitudinales deben ser amarradas con alambre, sujetadas con grapas o soldadas en el taller del proveedor.

El acero de refuerzo colocado en la losa controla el agrietamiento transversal entre juntas bastante espaciadas. El propósito del acero distribuido no es evitar el agrietamiento entre las juntas, sino que se diseña para mantenerse firmemente unidos los bordes de la losa, después de que se han formado las grietas. Se ha dicho que un diseño con acero distribuido o de refuerzo demora la formación de grietas visibles y mantiene la integridad de la losa, independientemente de la causa o la ubicación de las grietas. Sin embargo, tanto los diseños de concreto simple, como los que llevan acero, han proporcionado comportamientos equivalentes.

Cuando un espaciamiento entre juntas de más de 15 pies (4.57 m) puede controlar el agrietamiento transversal, la comparación de costos demostrará, por lo general, que un pavimento de concreto simple, diseñado con juntas de contracción con barras, resultará de menor costo.

Los requerimientos de área de acero por temperatura se obtienen con la siguiente fórmula.

$$A_s = \frac{WfL}{2 f_s}$$

Donde:

- A_s = Área de acero (en pulg² por pie de ancho)
- W = Peso de la losa (en libras entre pie cuadrado)
- L = Longitud de losa entre juntas (en pies)
- f_s = Esfuerzo de tensión del acero (psi)
- f = Coeficiente de fricción de la subrasante

Para subrasante y subbases granulares, el coeficiente de la fricción o "coeficiente de resistencia" varía entre 1 y 2, dependiendo de las condiciones del material y el contenido de humedad. Para subbases estabilizadas viene a ser ligeramente mayor. También puede afectar el valor de este coeficiente la longitud y espesor de la losa. Sin embargo, para efectos prácticos se puede tomar f = 1.5

Por ejemplo: Un pavimento de concreto se pretende construir con una losa de concreto de 12" (30 cm) de espesor, un ancho de 25 pies (7.62 m) con una junta longitudinal al centro, 12.5 pies (3.81 m) y juntas transversales espaciadas a cada 50 pies (15.24 m).

Utilizando la fórmula anterior, obtenemos las siguientes áreas de acero:

$$\text{Peso de la losa (W)} = (150) (1) (1) = 150 \text{ lb/ft}^2$$

La distribución de acero longitudinal nos queda

$$A_s = \frac{(150) (1.5) (50)}{2 (43,000)} = 0.131 \text{ in}^2/\text{ft}$$

El acero transversal está dado por:

$$A_s = \frac{(150) (1.5) (12.5)}{43,000} = 0.065 \text{ in}^2/\text{ft}$$

Por último, podemos decir que cuando existe un soporte uniforme y espaciamientos cortos entre juntas, no es necesario el acero de refuerzo.

Las barras de sujeción serán varillas corrugadas que satisfagan los requisitos de las especificaciones para varillas de refuerzo, excepto que sólo deben usarse varillas de grados de acero que puedan ser dobladas y enderezadas, cuando se modifique este procedimiento. Las barras de sujeción pueden tener varias formas, dependiendo del método de colocación: rectas para encajarlas desde la superficie; dobladas, para formar patas que permitan colocarlas en su correcto nivel, sinuosas; para que desarrollen adherencia cuando se inserten en el borde del concreto fresco formado por la cimbra. Como alternativa, pueden utilizarse pasadores o pernos con gancho para juntas, con diámetros no menores de 13 mm, equipados con uniones adecuadas.

Las pasajuntas deben ser varillas lisas, redondas, no deben tener rebabas, asperezas o perder su redondez, de manera que se afecte su deslizamiento dentro del concreto. Cuando se usen casquillos metálicos de expansión, éstos deberán cubrir los extremos de las varillas para juntas de expansión en no menos de 50 mm, ni más de 75 mm, el casquillo debe estar cerrado por un extremo y debe permitir la expansión adecuada. Debe estar diseñado de tal manera que el extremo cerrado no se rompa durante la construcción. Experimentalmente se han venido usando pasajuntas recubiertas de plástico en lugar de grasa o pintura a fin de minimizar la corrosión y la adherencia. También se ha experimentado el uso de acero inoxidable, aleaciones de níquel y cobre y recubrimiento con resinas epóxicas.

Las silletas usadas para sostener el acero de refuerzo, las pasajuntas a las barras de sujeción sobre la subbase del material granular, deben tener la resistencia adecuada y estar diseñadas para resistir desplazamientos o deformaciones antes y durante la colocación del concreto.

Las estacas utilizadas para sostener los rellenos de las juntas de expansión deben ser de metal y tener la longitud y rigidez adecuadas para mantener los rellenos en su posición correcta durante la colocación del concreto.

AGUA

El agua se usa para el mezclado y el curado del concreto debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceite, sal, ácido, material vegetal y otras sustancias dañinas al producto terminado. El agua obtenida de fuentes naturales debe ser extraída de manera que se excluya la posibilidad de que contenga lodo, hierba u otros materiales extraños. Podría aceptarse el uso de un agua no potable, solamente si la resistencia a los 7 y 28 días de

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

muestras de mortero fabricadas con ella es semejante a la resistencia de muestras similares fabricadas con agua destilada, siguiendo el "método de prueba para resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico"

AIRE

Para mejorar la resistencia al congelamiento y deshielo, según el tamaño máximo del agregado, podrán aceptarse como máximo las siguientes cantidades de aire total.

TABLA No. 22 CONTENIDO DE AIRE SEGÚN EL TAMAÑO DEL AGREGADO

Tamaño máximo de agregado (mm)	Contenido de aire permisible (%)
10	8 ± 2
13	8 ± 2
19	6 ± 2
25	5 ± 1
38	4 ± 1
50	4 ± 1

Dentro de estos rangos recomendados, el contenido de aire tiende a disminuir la segregación, aumenta la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua y reduce el sangrado.

MATERIALES PARA CURADO

Los materiales a usarse deberán cumplir con las normas que se indican a continuación:

La tela fabricada de yute o "kenaf" es un buen material para el curado, pero deberá estar en buenas condiciones, libre de agujeros, tierra, arcilla o cualquier otra susancia que interfiera con su capacidad de absorción y no debe contener sustancias que puedan producir perjuicios en el concreto.

No debe utilizarse manta o arpillera que no absorba fácilmente el agua cuando se moje o cuando se rocíe o que pese menos de 240 g/m², estando limpia y seca.

Las piezas de manta o arpillera deben mejorarse con cuidado para evitar que se adhieran o se incorporen a la superficie terminada del concreto.

Hojas permeables.- Hay de dos clases: papel impermeable o película de polietileno; el material de que están hechas debe ser resistente y elástico, capaz de resistir trabajo normal a que estarán sujetas.

Compuestos líquidos que forman membrana.- El producto transparente podrá tener un color muy tenue; el ligero tinte que contenga podrá distinguirse sobre la superficie del concreto dentro de las cuatro horas siguientes a su aplicación, pero después será indistinguible dentro de los siete días siguientes, si está expuesto a la luz del sol

TIRAS SEPARADORAS DE PLÁSTICO

El agrietamiento controlado para la formación de juntas longitudinales o de otro tipo puede provocarse por medio de tiras de polietileno de espesor adecuado, instaladas con máquinas en el concreto plástico, hasta la profundidad especificada

Una tira de polietileno y otro material adecuado, con un espesor menor de 0.33 mm, puede ser insertada con máquina en el concreto fresco. Debe procurarse que la tira quede vertical. Estos insertos no deben quedar totalmente sumergidos abajo de la superficie del concreto, ya que puede presentarse desmoronamiento.

Puede utilizarse otro tipo de tiras de separación que sean total o parcialmente extraídas antes del sellado.

Algunas veces se utilizan placas metálicas dobladas, pero no siempre se adaptan a las altas velocidades de operación de las máquinas.

SELLADO DE JUNTAS

Para sellar las juntas en losas de concreto se necesita un producto que debe resistir la acción de agua, aceites, minerales, gasolinas y combustibles.

En general, son productos selladores del tipo termostático a base de alquitranes, mica activa, hule sintético, clorinado y plastificantes estabilizadores. En forma original es un líquido espeso negro con un peso específico de 1.4 kg-ft

Para su aplicación debe calentarse hasta 140°C, una vez frío, se transforma en un cuerpo plástico con apariencia de hule blando de gran elasticidad que se produce por la formación de una red compleja de moléculas de hule sintético dentro de la masa. Las estructura moleculares de hule se forman al calentarse el producto y se van completando poco a poco durante unos 90 días después del colado.

Después de 90 días, el producto mantiene su valor de penetración de 90 décimos de milímetro (medida estándar de dureza), no obstante estar expuesto a la intemperie.

El producto sellador termoplástico tiene una elevada adherencia en superficies secas y limpias, debido a la polaridad de la masa.

ADITIVOS

Se utilizan usualmente para modificar las propiedades del concreto, para que éste resulte más adecuado para un determinado propósito. Su empleo debe basarse en la apropiada evaluación de sus efectos sobre las combinaciones específicas de los materiales y sobre consideraciones económicas, para obtener las características deseables.

Los aditivos tienen diferentes efectos sobre el concreto. algunos mejoran la trabajabilidad del concreto y facilitan su colocación. Otros aceleran el fraguado, permitiendo efectuar más pronto las operaciones de acabado, remoción de cimbras y apertura al tránsito, así como reducir el tiempo de protección contra la congelación durante la época de frío. Algunos más pueden retardar el fraguado del concreto, cuando es deseable que el endurecimiento tarde, muchos de éstos aceleran el incremento de resistencia tan pronto como se alcanza el fraguado inicial del concreto

Para uso de aditivos en diferentes regiones, se debe tomar en cuenta los resultados de la experiencia con el empleo de aditivos específicos en los materiales comúnmente usado para la fabricación de concreto.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Los aditivos empleados deberán conservar su calidad durante el tiempo que estén almacenados, por un lapso de cuando menos de seis meses. Cuando el producto permanezca almacenado por un periodo de tiempo mayor de seis meses, deberá ser probado nuevamente antes de usarse.

Los aditivos más usados en pavimentos son los retardadores de fraguado y los inclusores de aire.

CAPITULO IV

CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS

IV DESCRIPCION Y SELECCIÓN DEL EQUIPO PARA LA FABRICACION Y COLOCACION DEL CONCRETO.

Se describen brevemente los diferentes equipos que intervienen en la fabricación y colocación de los concretos hidráulicos en pavimentos:

1. EQUIPO DE FABRICACION

Para la fabricación del concreto hidráulico es recomendable usar plantas de concreto integradas con silo para cemento, compartimientos separados para cada tamaño de agregado. En caso de usar cemento envasado, deberá disponerse de bodegas para almacenarlo en cantidades suficientes para garantizar una producción de concreto continua sin interrupciones.

Además deberá tener un sistema de alimentación para cemento envasado. Es indispensable el equipo de dosificación que incluye tolvas pesadoras, básculas y controles de dosificación. El cemento deberá pesarse en tolva separada y no en forma acumulativa con los agregados. Además, dispondrá de dispositivos con controles electrónicos.

Es necesario contar con un sistema de alimentación de agua, base de hidrómetro para su exacta dosificación

El tamaño de las básculas deberá ser el adecuado para hacer la pesada de una revoltura completa en una soía operación.

El equipo de pesado deberá ser capaz de efectuar mediciones precisas y uniformes de todos los materiales dosificados en la planta. La precisión del equipo de pesado deberá verificarse periódicamente durante la operación de la planta.

2. EQUIPO DE TRANSPORTE

Para transportar el concreto al sitio de colado se necesitan equipos que garanticen la entrega del concreto de buena calidad, sin segregación y sin pérdida de humedad.

Podemos distinguir dos equipos de transporte según la distancia de acarreo.

Para distancia hasta de 3 kilómetros y en caminos parejos, podremos usar camiones de volteo de 5 a 6 m³ que tengan caja en buen estado y selle perfectamente la puerta de descarga; es conveniente cubrir la caja con una lona para evitar la evaporación del agua del concreto. Normalmente no hay problema de segregación para esta distancia, debido al bajo revenimiento del concreto que se utiliza en los pavimentos.

Para distancias mayores conviene usar equipos especializados en el acarreo de concreto, básicamente en un camión con caja en forma de media pera que pueda estar equipado con un agitador dentro de la caja y vacía la caja mediante volteo (dumpcrete).

Con frecuencia se usan las ollas revoledoras montadas en camión (motorrevoledoras) para el transporte de concreto.

Sin embargo, este procedimiento no es recomendable, ya que este equipo maneja concretos con revenimientos mayores al recomendado en pavimentos de concreto hidráulico

3. EQUIPOS DE COLOCACION, COMPACTACION Y TERMINACION

Estos pueden dividirse en dos grandes grupos:

- a) Equipos de cimbra deslizando.
- b) Equipos con cimbra estacionaria

El uso de pavimentadoras con cimbra deslizando requieren tener especial cuidado en varios aspectos del trabajo, para obtener resultados buenos. Su principal uso se recomienda en la construcción de pavimentos en carreteras.

La subbase tendrá que estar en tolerancia de nivel y compactación que fijan las especificaciones, además se tendrá que dejar 80 cm más ancha en cada lado del pavimento para apoyar los carriles del equipo de tendido.

El concreto que se suministre deberá tener una calidad uniforme con el más bajo revenimiento que permita trabajarlo.

La operación del equipo con cimbres deslizando es más económico que aquel de cimbra fija removible, se ahorra obra de mano y en equipos adicionales se trabaja en zonas más compactas, facilitando la supervisión de calidad del trabajo.

La capacidad de ajustarse a una gran gama de dimensiones es otra gran ventaja.

Se han realizado construcciones de losas de concreto de pavimentos de espesores variables desde 15 cm hasta 30 cm, y ancho desde 3 m a 15 m, en losas con o sin refuerzo.

Otra ventaja para el uso de pavimentadoras de cimbra deslizando es el factor inversión-producción.

En producciones masivas es más económica la utilización de este equipo, en comparación al de cimbra fija.

Los problemas principales que se presentan con este tipo de cimbra son la necesidad de tener personal y técnicos de operación altamente entrenados.

Deberán usarse métodos de tendido automáticos apoyados en alambre de acero previamente alineados y nivelados.

Para lograr obtener buenos resultados tienen que hacerse experiencias con el equipo y personal, o bien, buscarlos entrenados con suficiente experiencia en este tipo de trabajo, lo cual no es fácil. La atención y mantenimiento del equipo de pavimentación requiere de mecánicos y personal altamente especializado, inclusive, asistencia del fabricante, ante todo los equipos electrónicos y componentes electrónicos requieren de técnicos calificados. Este personal es difícil de conseguir y en muchos casos habrá que formarlo.

Uno de los problemas más importantes para el uso de pavimentadoras con cimbra deslizando es lograr los niveles que fijan las especificaciones para la subbase y que para este sistema es

Indispensable alcanzar. Cualquier defecto en la subbase puede producir variantes en los espesores de las losas y rugosidades en la superficie de las mismas. Este defecto puede reducirse mediante el uso de equipos con controles automáticos en el afine de subbase.

Deberán dosificarse concreto con una calidad uniforme con materiales bien graduados y revenimientos, lo más bajo posible.

El aplastamiento de los extremos de la losa sucede cuando se usa concreto de calidad no uniforme, mal vibrado o de revenimiento alto (arriba de 6 cm), también pueden presentarse cuando las condiciones climatológicas son desfavorables, tales como humedad excesiva o bajas temperaturas, así como mal control de la máquina, etc.

Un pavimento rugoso o mal acabado puede deberse al tipo de materiales usados, a la subbase que está en malas condiciones, problemas climatológicos, al ajuste de una máquina por ser nueva, o al excesivo desgaste de una máquina usada.

En cada caso deberá resolverse de acuerdo con las condiciones del trabajo y equipo.

Equipos con cimbra fija o estacionaria.- Deben utilizarse cimbras que soporten las cargas impuestas por el equipo de construcción.

Una prueba para evaluar la capacidad de carga de las cimbras metálicas rectas exige como requisito que no se deformen más de 6 mm cuando se prueben como viga, simplemente apoyada con un claro de 3 m y una carga igual al peso de la máquina de acabado o de otro equipo de construcción que opere sobre ellas.

Los espesores de dos tipos de cimbras de uso general son 6.4 mm y 8.0 mm. Si las cimbras van a soportar equipo de construcción pesado, deben tener un espesor mínimo de 8.0 mm. Se recomienda que la cimbra tenga un peralte mínimo igual al espesor de la losa de concreto, y un ancho en la base igual a 0.75 del peralte, pero no menor de 20 cm. Las cimbras deben estar provistas de sistemas adecuados de sujeción que les permita permanecer en su sitio una vez colocadas y soportar, sin giros ni asentamientos apreciables a simple vista, el impacto y las vibraciones del equipo de acabado y de compactación del concreto.

Los puntales de los patines deben sobresalir un mínimo de 1/3 de la altura de la cimbra. Las cimbras aumentadas con piezas más pequeñas no son recomendables para obras donde el área total del pavimento sea mayor de 1,700 m². Si se emplean estas cimbras reconstruidas, el incremento en el peralte no debe ser mayor del 25% del peralte de la cimbra original. Cuando se revisen las cimbras para verificar su alineamiento, no deben variar más de 3 mm en 3 m del plano real de la parte superior, ni más de 6 mm en 3 m a lo largo de su plano lateral. Las cimbras deben tener dispositivos para sujetar firmemente los extremos a tope de los distintos tramos. Se recomienda el uso de cimbras flexibles o curvadas cuando la curva tenga un radio de 30 m ó menor.

Existe una gran cantidad de equipos para pavimentación que utilizan cimbras de formas estacionarias.

Tiene una gran ventaja sobre el sistema con cimbras deslizante, de poder garantizar mejor los niveles de la rasante y no tiene desplomes en los hombros. La cimbra se coloca previamente alineándola y nivelándola, y luego sirve de apoyo al equipo de colocación y vibrado y terminación final.

También es posible adaptar los equipos con cimbra deslizante a sistema de cimbra fija, con pequeñas adaptaciones.

Colocación de las cimbras.- Es indispensable que el terreno bajo las cimbras se compacte y se nivele adecuadamente para que al colocarlas se apoyen uniformemente en toda su longitud y queden en la correcta elevación. Es siempre preferible que la nivelación se dé cortando. El terreno de apoyo que esté bajo el nivel establecido debe rellenarse en capas de 13 mm ó menos, hasta 45 cm de cada lado de la cimbra y compactarse bien, de acuerdo con las especificaciones de la obra.

El contratista debe verificar el alineamiento y la nivelación de la cimbra y hacer las correcciones necesarias, inmediatamente antes de la colocación del concreto. Cuando alguna cimbra ha sido movida, o después de corregir determinadas zonas mal apoyadas, debe volver a colocarse bien y revisarse. La colocación de las cimbras debe llevar un espaciamiento suficiente con respecto al frente del concreto, para permitir el avance y la inspección del trabajo. Una vez que las cimbras se han colocado correctamente, la capa subrasante o la subbase debe compactarse mecánicamente o a mano, en ambos lados de la base de la cimbra. Las cimbras deben fijarse por lo menos con tres estacas por cada tramo de 3 metros. Los tramos de cimbra deben estar bien sujetos, libres de todo juego o movimiento en cualquier dirección. No deben desviarse de su correcto alineamiento en más de 6 mm. No deben ocurrir asentamientos o giros excesivos de las cimbras bajo la acción del equipo de acabado. Las cimbras deben estar limpias y engrasadas antes de la colocación del concreto.

Remoción de la cimbra.- La cimbra debe permanecer en su lugar cuando menos ocho horas después de la colocación del concreto. Si la temperatura ambiente es menor de 10° C en cualquier momento dentro de las ocho horas de colocado el concreto, las cimbras deben permanecer en su lugar el tiempo que sea necesario para garantizar que los bordes del pavimento no serán dañados al quitarlas. Inmediatamente después de la remoción de las cimbras debe iniciarse el curado de los bordes expuestos del pavimento de concreto.

Nivelación de la superficie.- Después de que la capa subrasante o la subbase ha sido colocada y compactada al grado requerido, la superficie sobre la que va a construirse el pavimento debe perfilarse correctamente. Si las operaciones de nivelación afectan la compactación de la capa subrasante o la subbase, dicha compactación debe corregirse mediante tratamiento adicional, antes de colocar el concreto. La construcción de la capa subrasante o de la subbase debe llevarse a cabo antes de la colocación del concreto, con un espaciamiento suficiente para que las dos operaciones no interfieran entre sí. En obras importantes la nivelación se realiza generalmente mediante equipo automático controlado con un alambre o cuerda tensados. Si se permite tránsito eventual sobre la subrasante terminada, debe verificarse y corregirse la nivelación inmediatamente antes de colocar el concreto.

Equipos de colocación y compactación.

El primer equipo sería un conjunto de tendido y compactado con las siguiente característica: tener amplitud suficiente para trabajar en anchos de 5 a 6 m, al frente un extendedor o repartidor de concreto que acomoda a éste a un nivel adecuado para su compactación por vibrado, como segundo elemento básico deberá estar previsto de una batería de vibrado de alta frecuencia de 10,000 V.P.M., para el vibrado profundo, al igual que en el caso de equipo con cimbra deslizante.

Este equipo deberá ser autopropulsado, la operación de sumergir y emerger los vibradores se hará por medio de controles hidráulicos

El equipo irá equipado con unidades de alumbrado para trabajos nocturnos

Equipo de vibrado superficial.

El segundo equipo deberá ser un equipo de vibrado superficial y de acabado, del cual existen varios tipos en el mercado.

El llamado rodillo vibratorio Ciary es un equipo que puede utilizarse para estas producciones con mucho éxito, consta de tres rodillos de 6 m de ancho, dos colocados al frente, separados 5 cm y uno separado 1 m en la parte posterior. Los rodillos motrices son las dos posteriores. El rodillo de enfrente hace el trabajo de acabado y vibrado superficial por su forma de colocación y giro.

El rodillo acabador tiene una excentricidad ajustable a $1/8"$, $1/4"$, y gira a alta velocidad, haciendo efecto de vibrado y acabado, los rodillos de traslación mueven el conjunto hacia adelante y hacia atrás, permitiendo las pasadas que sean necesarias sobre la superficie de concreto para dejarlo terminado dentro de tolerancia

Otro equipo de vibrado y acabado superficial puede ser un equipo montado sobre chasis de estructura de 6 m de ancho, con ruedas, que pueda caminar sobre la cimbra o piso de concreto, según las necesidades. Este equipo es autopulsado y consta de los siguientes elementos acabados.

Tiene una regla de 6 m de largo y sección de "3 x 12", reforzada en su base, con ángulo de fierro, ejecuta con movimiento vibratorio vertical, acomodando el concreto previamente vibrado por el peine de vibraciones de alta frecuencia del equipo, arreglando pequeñas oquedades.

En la parte posterior se encuentra una regla vibratoria fija de aluminio de 6 m de ancho y sección de apoyo de 20 cm, ésta hace el trabajo de terminación. Todos los controles de esta máquina son eléctricos y requieren de una planta de luz para su funcionamiento. Esta máquina está equipada con un eje y llantas para su fácil transportación.

Para volúmenes mayores de 50 m³/hora, conviene utilizar máquinas integradas con todos los elementos al estilo de las pavimentadoras de cimbra deslizante.

Existen, además de las máquinas descritas, un gran número de equipos que pueden realizar los trabajos de pavimentación de concreto hidráulico muy eficientemente.

Equipo de terminado final.

Como un equipo de terminado final, es conveniente utilizar alguno que permita dar un acabado de la superficie sin alterar éste.

Puede ser una máquina que conste de una estructura que se apoye a los lados de la losa de la línea de pavimento y sirva de sostén a un tubo dispuesto diagonalmente con respecto al eje de la línea de pavimentos y permita su ajuste, a manera que se apoye sobre el concreto terminado, y al hacer un movimiento de traslación sobre la superficie fresca, corrija las pequeñas imperfecciones que pueden dejar las máquinas acabadoras, y a la vez sirva para cerrar las pequeñas fisuras de fraguado superficial que pudieran presentarse en la superficie del concreto.

Bandeo, cepillo de cerda.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Para volúmenes menores se puede recurrir al sistema de bandeado, que se logra mediante una banda de 20 a 25 cm de ancho y una longitud del ancho de la losa más 1.50 y mediante un movimiento de vaivén se logra dar una superficie antiderrapante muy buena, con pequeños surcos de 1 a 3 mm.

Otro procedimiento puede ser el terminado mediante el cepillo de raíz, que al pasar sobre la superficie terminada deja surcos similares al del bandedo.

Equipo de aserrado de juntas de construcción.

Deberán tenerse cuando menos dos máquinas para corte de juntas, se usan discos de diamante para concreto fresco de 1/8" y 1/4".

El objeto de tener dos máquinas es que, en caso de falla de una de ellas, se tenga un repuesto para evitar roturas en las losas.

En caso de tener producciones grandes habrá que calcular el número de cortadoras necesarias y agregar una más para posibles fallas.

Equipo para aplicar película de curado.

Para aplicación de película de curado pueden usarse equipos de aspersión manual o mecánico, similar al que se usa para aplicar insecticidas.

Para producciones masivas existen equipos de aplicación automáticos.

Alumbrado

Deberá tenerse en obra un equipo de alumbrado que garantice el trabajo nocturno con suficientes lámparas para cubrir todo el tramo, desde la colocación del concreto hasta la etapa del aserrado.

Humedecido

A todo lo largo del tramo por colar, deberán quedar repartidos tanques de agua, que se utiliza para humedecer las subbases previo al colado y posteriormente se utiliza para proporcionar agua a las máquinas cortadoras.

Protección contra la lluvia y viento.

Para poder proteger el concreto fresco colado contra los efectos de lluvias inesperadas que puedan dañarlo, tendrán que tenerse en obra techos con estructuras ligeras en cantidad suficiente que permita proteger el concreto fresco, y por lo que respecta a la protección contra los efectos del viento, deberá disponerse de mamparas laterales en cantidad suficiente para servir de pantallas protectoras.

En caso de presentarse condiciones de viento severas, temperaturas menores de 5° C ó lluvias inesperadas, deberá suspenderse el tendido del concreto y colocar una junta de construcción.

SELECCIÓN DE EQUIPO

Para la selección del equipo deberán valorarse los diferentes factores que intervienen en la realización de la obra

Podremos enunciarlos de la siguiente forma

- ⇒ Volumen de obra a ejecutarse.
- ⇒ Programa de obra
- ⇒ Disponibilidad de todos los materiales necesarios, materiales inertes, cemento, varillas, pasajuntas, etc.
- ⇒ Factores climatológicos
- ⇒ Trabajar en uno o varios turnos.

Procederemos de la siguiente manera:

Conocido el volumen de obra a ejecutarse y el tiempo de entrega de obra, se revisarán las disponibilidades de materiales, si alguno de éstos no está disponible en la medida que se requiera, habrá que modificar el plazo de entrega de la obra.

Supongamos que se tienen los materiales para cumplir con el Programa de Obra, enseguida analizamos las condiciones climatológicas para evaluar el tiempo posible de trabajo que pueda tenerse dentro del Programa de Obra.

Como último, se determinarán los turnos de trabajo. En general, es conveniente trabajar dos turnos. Como en el colado de las losas no conviene suspender los trabajos, ya que al parar las actividades tiene que hacerse una junta de construcción con varillas pasajuntas. Estas juntas de construcción son muy lentas y caras.

Decidido el número de turnos, conocemos el volumen de obra que tenemos que manejar por hora, lo cual nos permite decidir el equipo que se ajuste a las necesidades del trabajo.

Se solucionarán los equipos de tendido, vibrado y acabado que más se ajusten al programa estudiado y estén balanceados entre sus diferentes elementos

IV.2 COLOCACION, COMPACTACION Y CURADO DEL CONCRETO HIDRAULICO

Antes de iniciar la colocación del concreto, se verificará que los niveles estén dentro de las especificaciones marcadas para la subbase.

Colado del concreto.

El equipo de colación tiene que ser apto para depositar el concreto a su posición final con un mínimo de segregación y sin dañar la subbase.

En trabajos que requieran el movimiento de grandes volúmenes de concreto, se utilizarán máquinas equipadas con dispositivos de distribución y colocación del concreto en forma mecánica, tales como cajones de recepción y para su distribución pueden contar con cualquiera de los siguientes elementos: banda, gusano, remo, cajones, abanico, etc. Cualquiera de estos dispositivos distribuye el concreto a todo el ancho de la losa con los espesores adecuados sin dañar la subbase, además, manejando el concreto con un mínimo de segregación.

Para el manejo de volúmenes menores de concreto del orden de 20 m³/hora, pueden usarse equipos de extendido y colocación como los descritos anteriormente, con muy buenos resultados.

Si hablamos de volúmenes del orden de 10 m³/ hora, entonces usaremos el sistema de colocación y tendido manual con peones y palas.

El suministro del concreto, en todos los casos, será mediante camiones de volteo o Dumpcrete, teniendo especial cuidado de no dañar la subbase al circular sobre ella.

Compactación.

Se logra mediante el uso de vibradores de alta frecuencia 10,000 V.P.M., se colocan sobre una barra con separación de 75 cm centro a centro a todo el ancho de la losa de concreto, solamente deben trabajar cuando están sumergidos en la masa del concreto, nunca fuera de él.

En algunas máquinas se cuenta con vibradores de tubo colocados en la esquina de avance de la plancha de conformación.

También es posible utilizar varios vibradores de alta frecuencia operados individualmente.

Toda el área del pavimento debe ser compactada en la forma más efectiva que sea posible. Debe ponerse especial atención en los bordes, la línea central y las otras juntas. La colocación mecánica de las mallas de acero de refuerzo puede proporcionar cierta compactación. Los vibradores de inmersión son accionados dentro de la masa del concreto para eliminar vacíos grandes, mientras la pavimentadora se mueve hacia adelante y deben pararse cuando ésta se detiene.

Debe ponerse especial cuidado para asegurar una compactación adecuada del concreto alrededor de los pasajuntas y las silleas de apoyo, en bordes y esquinas, alrededor de los drenajes y en zonas de forma irregular relacionadas con entronques e intersecciones.

Acabado

La pavimentadora con cimbra deslizante está diseñada para colocar, compactar, emparejar y dar acabado al concreto fresco en una sola pasada de la máquina, dejando en esta forma un pavimento homogéneo y bien consolidado, que requiere un mínimo de acabado manual para cumplir con las tolerancias de la superficie. La máquina debe vibrar al concreto del pavimento en todo su ancho y espesor.

La pavimentadora de cimbra deslizante debe operar con un movimiento lo más continuo posible y todas las operaciones de mezclado, descarga y tendido del concreto deben coordinarse en tal forma que aseguren un avance uniforme del trabajo, con el mínimo número de paradas de la máquina. Las pavimentadoras de cimbra deslizante son capaces de niveiar una capa subrasante o subbase correctamente terminada cuando cuentan con equipo automático, o mediante aparatos sensibles trabajando a partir de una cuerda tirante.

Independientemente del tipo de equipo que se emplee, se pueden obtener buenos resultados si todas las máquinas se coordinan bien, se ajustan adecuadamente y son operadas por personal experimentado. Sólo una pequeña cantidad de concreto debe desplazarse en cada operación. Es prácticamente imposible que el equipo que vaya a utilizarse subsecuentemente en el tren de pavimentación pueda corregir completamente una tendencia del esparcidor a dejar mucho o poco concreto, o bien, cantidades erráticas del material.

Antes de dar el acabado superficial, se procede a comprobar si la superficie está dentro de tolerancia en niveles. Esto se hace colocando una regla metálica de 5 m en el sentido longitudinal de la losa, observando las depresiones. Estas deberán ser menores de 0.5 cm, si se exceden las depresiones deberán corregirse de inmediato antes de fraguar el concreto.

En caso de colocación de concreto en volúmenes grandes para checar la superficie terminada, se recomienda usar perfilógrafo que puede proporcionar resultados de perfil más exactos y con esto corregir sobre la marcha el tendido y acabado del concreto, ajustando la máquina pavimentadora para lograr resultados dentro de especificaciones.

Acabado de la superficie.

La superficie de un pavimento debe incluir tanto texturas finas como texturas gruesas. La textura fina (arenosa) está formada por la arena de la capa de mortero de cemento, mientras que la textura gruesa la constituyen los bordes que deja la operación de acabado. Puede aplicarse a la superficie del concreto una amplia gama de patrones de texturas antiderrapantes; en una misma obra pueden requerirse texturas diferentes en distintos lugares. El método de acabado que se emplee debe ser compatible con el medio ambiente, con la velocidad e intensidad del tránsito, y con la topografía y geometría del pavimento.

Puede obtenerse una textura adecuada en el pavimento mediante cualesquiera de los siguientes procedimientos: uso de manta o de, escobillado, empleo de cepillos de alambre, cepillos de plástico, etc., dejando marcados pequeños surcos de 1 a 3 mm de profundidad. En algunos casos pueden requerir de altas resistencias al derrapamiento, con objeto de proporcionar seguridad adicional en determinadas áreas críticas, tales como casetas de cobro, intersecciones muy transitadas, otros lugares en donde la acción del tránsito dé lugar a frecuentes operaciones de frenado, aceleración o viraje. Esto puede lograrse dando al pavimento una textura más profunda que la normal, ranurando o, de ser necesario, incorporando a la superficie del concreto óxido de aluminio, carburo de silicio u otros materiales resistentes al desgaste.

Acabado de los bordes

Los bordes de las losas, a lo largo de la línea donde estuvo colocada la cimbra, y los bordes de las juntas de expansión, deben ser acondicionados o suavizados con una herramienta apropiada. Los bordes en las juntas de contracción también deben suavizarse, a menos que la junta sea del tipo de aserado. A las juntas de construcción a veces se les arreglan igualmente los bordes, sino son del tipo de aserado y sellado, pero en este caso debe utilizarse una herramienta con un radio de curvatura pequeño.

Remoción de las formas de cimbra.

Las formas se descimbrarán entre 6 y 8 horas después del colado. Este tiempo puede tener variaciones de acuerdo con las condiciones de temperatura, humedad y viento en cada lugar. Al remover las formas hay que tener muy en cuenta no dañar las esquinas de las losas.

Curado.

Inmediatamente después de que se hayan concluido las operaciones de acabado y se haya evaporado la película de agua de la superficie, o tan pronto como la consistencia de la mezcla lo permita, debe cubrirse y curarse toda la superficie del concreto recientemente colocado. En todos los casos en los cuales el curado requiera del uso de agua, esta operación tendrá prioridad sobre cualquier otro suministro de este líquido. Recomienda un período de curado de siete días a temperaturas superiores a 4° C, pero establece períodos más cortos si antes se obtiene en el concreto el 70% o más de la resistencia a la flexión especificada.

Curado con membrana.- Inmediatamente después de que ha desaparecido la película de agua de la superficie del concreto, ésta debe ser cubierta uniformemente con el material de curado en forma de membrana líquida, por medio de una máquina de aspersión aprobada, en cantidades no menores de 0.27 lts por m²., con el fin de garantizar una consistencia y una dispersión uniforme del pigmento en el material de curado, éste debe ser agitado en el envase original antes de pasarlo al equipo rociador y debe mantenerse agitado durante toda la aplicación.

En zonas irregulares o en tramos del pavimento en donde resulta impráctico el uso de máquinas de aspersión, la distribución del material de curado puede hacerse por medio de equipos adecuados de aspersión manual. Las caras laterales de la losa deben cubrirse con el material de curado dentro de los primeros 60 minutos posteriores a la remoción de la cimbra. Cualquier área de la membrana aplicada que se dañe dentro del período de curado especificado debe reponerse inmediatamente.

Mantas de algodón o yute.- La superficie y los bordes del pavimento deben cubrirse totalmente con estas mantas, las cuales antes deben mojarse completamente con agua. Las mantas deben quedar en íntimo contacto con la superficie, pero también no deben colocarse hasta que el concreto haya endurecido lo suficiente, para evitar que se adhieran o se incorporen al mismo. Deben mantenerse completamente húmedas y en su posición correcta durante todo el período de curado especificado.

Papel impermeable.- Tan pronto como el concreto haya endurecido lo suficiente como para evitar que el papel impermeable se incorpore a él, se cubre toda la superficie del pavimento con este material. Las hojas del mismo deben traslaparse 30 cm. El papel impermeable debe tener un ancho suficiente para que se pueda traslapar y además, cubrir completamente los lados de la losa una vez que se haya removido la cimbra, a menos que se cuente con tiras adicionales de papel para este último propósito. El papel impermeable debe colocarse y mantenerse en íntimo contacto con la superficie y los lados del pavimento durante todo el

periodo de curado El papel que se dañe y que no pueda ser parchado o reparado en forma efectiva debe desecharse. Este material debe aplicarse sólo sobre una superficie humedecida. Si la superficie se observa seca, debe humedecerse con una aspersión de agua lo suficientemente fina para no causar daño al concreto fresco

Cubierta de polietileno blanco.- La superficie y los lados del pavimento deben cubrirse enteramente con tela de polietileno blanco, el cual debe colocarse cuando la superficie del concreto se observa seca, debe mojarse mediante una fina aspersión de agua antes de colocar la cubierta. Las hojas de polietileno adyacentes deben traslaparse 45 cm y tener contrapesos encima para mantenerlas en contacto con la superficie del pavimento. La cubierta debe ser de una dimensión tal que se prolongue más allá de los bordes del pavimento y alcance a cubrir por completo los lados de la losa, una vez que se haya removido la cimbra. La cubierta de polietileno debe permanecer en su lugar durante todo el periodo de curado y debe especificarse le un espesor mínimo de 0.10 mm para su adecuado manejo.

Curado en los cortes efectuados con sierra.- Los cortes que se hagan con sierra en un pavimento que aún se encuentra en proceso de curado deben protegerse contra un secado rápido. Esto puede lograrse por medio de papel trenzado, cuerdas de fibra o similares, o bien, por medio de tiras de polietileno engomadas u otro material aprobado.

Curado en clima frío.

El curado en clima frío debe proporcionar protección contra el congelamiento, sin descuidar el objetivo principal de mantener la humedad durante el periodo necesario para que la hidratación del cemento llegue a un punto aceptable. Las hojas de polietileno cubiertas con heno o paja sirven por ambos propósitos.

Protección del pavimento terminado.

El contratista debe proteger el pavimento y sus elementos conexos de la acción del tránsito, tanto el del público como el de sus propios representantes y empleados. Esta protección debe incluir personal de vigilancia para encauzar el tránsito, colocación y mantenimiento de señales, luces, barricadas y puentes o pasos sobre el pavimento. Cualquier daño al pavimento que ocurra antes de su apertura al tránsito debe repararse, o bien, debe reemplazarse la zona afectada.

Protección contra la lluvia.

A fin de que el concreto no resulte afectado por las lluvias, antes de que haya endurecido lo suficiente, el contratista debe disponer en todo el tiempo de los materiales necesarios para la protección de la superficie del concreto sin endurecer. Tales materiales consistirán en yute, mantas de algodón, papel de curado y hojas de plástico, los cuales son los más adecuados para este objeto. Además, cuando se utilice el procedimiento de pavimentación a base de cimbra deslizante, el contratista deberá tener un plan aceptable para la protección de la superficie y los bordes del pavimento para casos de emergencia. Cuando la lluvia sea inminente, todas las operaciones de pavimentación deben detenerse y el personal tomará las medidas necesarias para la adecuada protección del concreto sin endurecer.

IV.3 DESCRIPCION, CONSTRUCCION Y SELLADO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE JUNTAS.

Se emplean juntas en los pavimentos de concreto hidráulico, con el fin de controlar el agrietamiento longitudinal y transversal debido a (1) Cambios de volumen en el concreto y (2) los efectos combinados del alabeo restringido y las cargas. Las juntas se usan igualmente para dividir al pavimento en incrementos adecuados para los propósitos de construcción

Como en otros aspectos de la ingeniería de pavimentos, el objetivo es diseñar juntas para proyectos individuales que aseguren la capacidad estructural y la uniformidad de la superficie de rodamiento del pavimento, al más bajo costo anual posible.

El diseño de juntas se base en el conocimiento obtenido de cinco fuentes principales:

1. Estudios teóricos de comportamiento de losas de concreto, incluyendo los trabajos de Westergaard, Pickett, Kelley, Teller y Sutherland, Wiseman, Leonard y Harr.
2. Pruebas de laboratorio, tanto en modelos como a escala natural. La Pista de Pruebas de Arlington, construida y probada por la Oficina de Caminos Públicos de E.U.A. (Bureau of Public Roads), fue una obra muy importante a escala natural.
3. Pavimentos experimentales, sometidos a tránsito controlado de vehículos de prueba, tales como: el tramo de prueba de Bates (Bates Test Road), el tramo de prueba de Maryland (Maryland Road Test) y el tramo de prueba de la AASHO (AASHO Road Test) en Ottawa, III.
4. El comportamiento de obras especiales con juntas experimentales.
5. El comportamiento de pavimentos de carreteras y calles en servicio, sujetos a tránsito mezclado normal.

Todas estas fuentes de tecnología son de utilidad en el diseño de juntas. Sin embargo, las dimensiones de las losas y los detalles de las juntas, para obras específicas, deben reflejar una evaluación cuidadosa del comportamiento de pavimentos en servicio, con tránsito y condiciones ambientales similares al de la obra que se este diseñando. Tal evaluación es esencial para un diseño confiable de juntas que tenga el más bajo costo anual posible.

COMPORTAMIENTO DE LOSAS Y DISEÑO DE JUNTAS

Durante las primeras etapas del desarrollo de las carreteras, muchos pavimentos de concreto hidráulico se construyeron sin juntas de ninguna clase, excepto juntas transversales de construcción cuando los trabajos de pavimentación se interrumpían. Pavimentos sin juntas fueron también construidos en unos cuantos Estados de la Unión Americana, en las dos décadas pasadas. El análisis del comportamiento de las grietas en estos pavimentos sin juntas, revela los elementos esenciales para el diseño de las mismas.

Para entender el comportamiento de estos pavimentos será útil considerar el carácter y comportamiento de un pavimento de concreto antes, durante y después del período de endurecimiento. Para adquirir la plasticidad o trabajabilidad requerida para su adecuado acomodo y acabado, el concreto para pavimentos de carreteras se coloca con revenimientos de 1 a 3 pulgadas. Para revenimientos de este rango, la cantidad de agua de mezclado es de 55 a 100% mayor que la cantidad requerida para la hidratación del cemento. Durante el proceso de endurecimiento del concreto se elimina casi todo ese exceso de agua. Como resultado de esto, el concreto del pavimento ocupa menos volumen después de que ha endurecido que cuando era plástico. El calor de hidratación generado durante el proceso de endurecimiento es seguido por un descenso en las temperaturas después de que aquél ha tenido lugar. Esta

disminución de la temperatura también reduce el volumen del concreto. La contracción del concreto por esas causas es el origen de las grietas transversales en los pavimentos de concreto sin juntas. El espaciamiento entre las grietas varía de cerca de 60 hasta 150 pies, dependiendo de la resistencia a la tensión del concreto y de la oposición que represente la fricción de la superficie de apoyo de la losa, en el tiempo en que ocurre el agrietamiento.

Las condiciones supuestas para el cálculo de los esfuerzos de alabeo, frecuentemente se simplifican mucho y no reflejan las condiciones reales de los pavimentos en servicio. Las fórmulas de los esfuerzos de alabeo son también defectuosas en lo que respecta a la influencia de los movimientos de la losa en la magnitud y carácter de dichos esfuerzos. A causa de estas deficiencias, el valor principal de los datos calculados, estriba en demostrar que los esfuerzos de alabeo son de magnitud importante y que pueden reducirse espaciando menos las juntas.

Los esfuerzos por alabeo restringido, también han sido objeto de importantes estudios experimentales. La tabla No. 23, muestra los resultados de investigaciones realizadas por la Oficina de Caminos Públicos de E.U. (Bureau Public Roads). Los datos de la tabla indican que los esfuerzos de alabeo medidos, solamente fueron el 45 a 55 por ciento de los valores calculados, para una losa de 8 pulgadas de espesor uniforme. Puede ser que esos datos reflejen la influencia del movimiento de la losa. Los trabajos experimentales sobre los esfuerzos de alabeo se han dificultado bastante por los muy complejos problemas que implica la medición de los efectos a que dan lugar los esfuerzos producidos por la restricción del alabeo.

TABLA No. 23 ESFUERZOS DE ALABEO - LOSAS DE 8" DE ESPESOR Y 15 PIES DE LONGITUD.

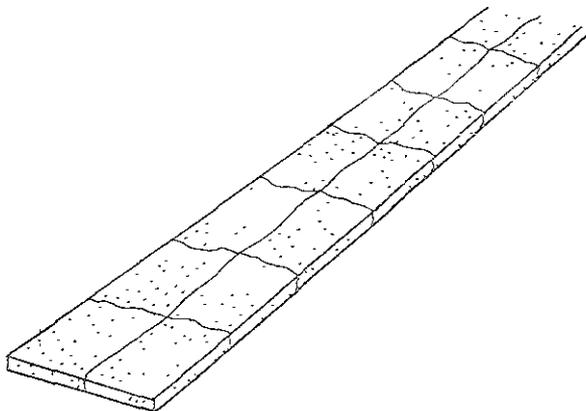
Agregado	Carga en el interior		Carga en la libre orilla	
	Esfuerzos Medidos lb/pulg ²	Esfuerzos Calculados lb/pulg ²	Esfuerzos Medidos lb/pulg ²	Esfuerzos Calculados lb/pulg ²
Grava	130	240	120	230
Piedra triturada	150	265	115	250

Afortunadamente, los problemas que se han presentado en los estudios teóricos y experimentales de los esfuerzos de alabeo, no han impedido el desarrollo de diseños adecuados de juntas que contrarresten los efectos del alabeo restringido. Estos diseños se han derivado de estudios de comportamiento de pavimento. Los registros de servicio de pavimentos sin juntas, descritos anteriormente, muestran que la combinación de los efectos de las cargas del tránsito y de los esfuerzos por alabeo restringido, son la causa de grietas longitudinales irregulares, a lo largo de las proximidades del centro de línea en pavimentos con anchos mayores de 12 a 16 pies, construidos sin juntas longitudinales. Estas combinaciones de cargas y esfuerzos de alabeo también dan lugar a grietas transversales adicionales entre las grietas producidas inicialmente por la contracción del concreto. (En pavimentos de carreteras y de calles, el espaciamiento entre las juntas longitudinales, dependerá del espesor de las losas y de los requerimientos de servicio. En pavimentos de aeropistas, con espesores mayores de 11 pulgs, una anchura de losa de 25 pies controlará generalmente el agrietamiento longitudinal)

Los patrones de grietas en un pavimento típico sin juntas, de carreteras, sujeto a los efectos combinados de la contracción del concreto, de los esfuerzos por alabeo restringido y del tránsito, se ilustran en la Fig. No. 7. Trabajos teóricos y experimentales sobre los esfuerzos de

alabeo indican que el intervalo entre grietas debe ser de 15 a 20 pies, para pavimentos de 6 pulgadas o más de espesor. Sin embargo, el estudio de los datos de un gran número de observaciones directas, muestran una variación importante en el espaciamiento de las grietas de pavimentos contruidos con varios tipos de agregados gruesos y distintas áreas climáticas. Debido a estas variaciones, los registros locales de servicio son la mejor guía para establecer los espaciamientos adecuados entre juntas, que controlarán en forma efectiva el agrietamiento transversal. (Dentro de los Estados Unidos, las Oficinas de Distrito de la Asociación de Cemento Portland proporcionan importante información y asistencia para determinar los espaciamientos más convenientes entre juntas, para obras específicas).

Figura No. 7 PATRONES DE GRIETAS EN UN PAVIMENTO SIN JUNTAS



El agrietamiento transversal también puede controlarse colocando acero distribuido (acero de refuerzo de la losa), entre juntas bastante espaciadas, evitando dicho agrietamiento. El propósito del acero distribuido no es evitar el agrietamiento entre las juntas, sino que se diseña para mantener firmemente unidos los bordes de la losa, después de que se ha dicho que un diseño con acero distribuido o de refuerzo demora la formación de grietas visibles y mantiene la integridad de la losa, independientemente de la causa o la ubicación de las grietas. Sin embargo, tanto los diseños con concreto simple, como los que lleven acero, han proporcionado comportamientos equivalentes, condiciones de servicio similares. Con cualquiera de los equipos de diseño, una adecuada colocación de las juntas, innecesario considerar los esfuerzos de alabeo en la determinación de los espesores de pavimento. Bien sea que se use o no acero distribuido, los propósitos esenciales del diseño de juntas son:

- 1- Determinar las dimensiones de las losas para cada obra en particular, de tal manera que:
 - a) Proporcionen el medio más económico de controlar las grietas debidas a la contracción inicial del concreto y a los efectos del alabeo restringido.
 - b) Eviten los daños debidos a la introducción de materiales incomprensibles en las propias juntas
- 2- Proporcionar superficie suficiente transmisión de carga a través de las juntas para.
 - a) Evitar desniveles y fallas en las citadas juntas
 - b) Permitir que la determinación de los espesores de pavimento se lleve a cabo mediante el uso de la fórmula de Pickett, para losas con protección en las esquinas, la cual proporciona diseños más baratos

Para evaluar las alternativas de diseño de juntas y los detalles de éstas, se ha considerado conveniente tratar a continuación, en forma separada, los principales tipos de ellas.

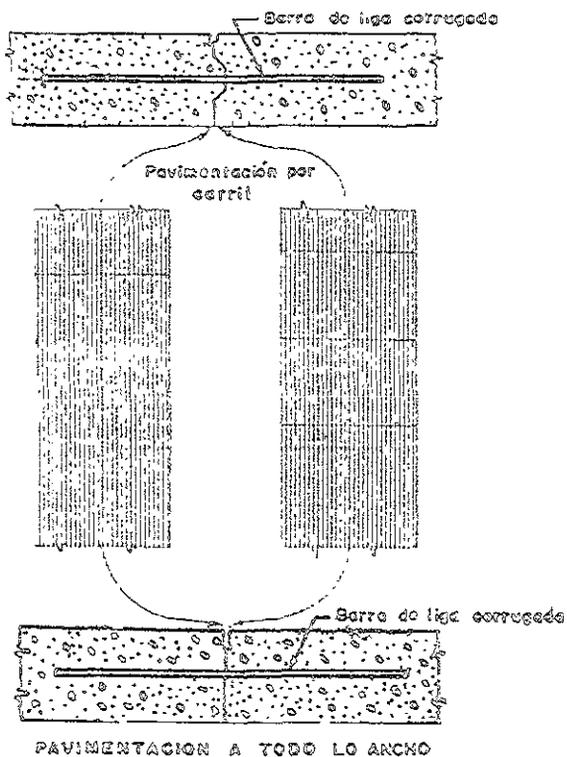
JUNTAS LONGITUDINALES

El control del agrietamiento longitudinal por medio de juntas longitudinales se comenzó por el año de 1918 y se generalizó entre 1920 y 1930. Durante este período, los carriles de tránsito tenían usualmente 10 pies de ancho y las juntas longitudinales servían para la doble función de dividir al pavimento en los carriles de tránsito y de controlar las grietas longitudinales. En el presente, se ha estandarizado el ancho del carril de tránsito de 12 a 13 pies. (Estudios llevados a cabo por la Oficina de Caminos Públicos de E.U. demostramos una reducción importante en la capacidad de tránsito para anchuras de carriles menores de 12 pies. Estos estudios también revelaron que de hecho no se logra ningún aumento en la capacidad ni en la seguridad con anchuras de carril de más de 12 pies)

Los dos tipos de juntas longitudinales de uso común se muestran en la Fig. No. 8. La junta con un plano de debilitamiento mostrada en la parte inferior de esa figura se especifica cuando se pavimentan dos carriles al mismo tiempo. La junta longitudinal de construcción señalada en la parte superior de la Fig. No. 8 se requiere cuando el pavimento se construye carril por carril y cuando el ancho total del pavimento no puede construirse en una sola operación.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

FIG No. 8 JUNTAS LONGITUDINALES



Las dos juntas mostradas son juntas articuladas fuertemente unidas con varillas de liga del tipo corrugadas o que mantienen en firme contacto las caras a tope de las losas, asegurando de esa manera la transferencia de carga a través de la junta por medio de la trabazón o acañamiento entre los agregados del concreto. Las varillas de liga corrugadas o los tirantes no se requieren a través de las juntas longitudinales en áreas de estacionamientos, calles de ciudades y pavimentos de aeropistas, cuando exista suficiente confinamiento en las orillas del pavimento, que evite la separación de las losas.

Cuando se usa la junta longitudinal central con plano de debilitamiento mostrada en la parte inferior de la Fig. No. 8, es esencial que la profundidad de la ranura no sea menor que un cuarto ($1/4$) del espesor de la losa. Si esta profundidad mínima no se mantiene, la junta no controlará el agrietamiento longitudinal. La economía en la pavimentación de dos carriles a la vez, junto con el mejoramiento de la apariencia, tersura de la superficie y la durabilidad que caracteriza a las juntas aserradas, ha dado lugar a un incremento en el uso de juntas longitudinales centrales aserradas.

Es esencial que las juntas longitudinales de construcción queden bien acabadas, de acuerdo con lo que se muestra en la parte superior de la Fig. No. 8. Si la zona de la ranura se ejecuta descuidadamente, se despostilla y da muy mal aspecto. Para evitar los problemas inherentes al terminado a mano de las juntas, algunos organismos especifican una ranura aserrada, en lugar del acabado a mano. La ranura superficial hecha con sierra (cerca de $3/4$ " de profundidad), constituye un adecuado receptáculo para el material sellante, mejora la durabilidad del conducto a lo largo de la junta, favorece la calidad del rodamiento entre carriles adyacentes y si se consideran las inversiones de conservación, no hace que aumente el costo total del pavimento.

JUNTAS DE EXPANSIÓN

Hasta cerca del año de 1918, todas las juntas transversales en pavimentos de concreto hidráulico eran juntas de expansión. Los espaciamientos varaban de 25 a 100 pies y las aberturas de las juntas, de $1/4$ " a 1 pulgada. Desde 1918 las juntas de expansión han sido gradualmente reemplazadas por juntas de contracción con plano de debilitamiento y hoy en día las juntas de expansión se usan raramente, excepto con propósitos determinados y en intersecciones asimétricas.

Varios factores han intervenido en este cambio de juntas de expansión a juntas de contracción. Esos factores incluyen:

- 1- Reconocimiento por parte de los ingenieros de carreteras que el agrietamiento de los pavimentos sin juntas era debido a la contracción inicial y al alabeo restringido, más que a la expansión del concreto.
- 2- Comportamiento inadecuado de las juntas de expansión, cuando no se construyen con toda cuidado.

Un factor importante para el cambio citado, fue el objetivo principal de la ingeniería de obtener un diseño más adecuado de juntas y un mejor comportamiento del pavimento al menor costo. Esto condujo a la rápida mecanización de los métodos de pavimentación de concreto entre los años de 1920 y 1930, durante el mismo período en que las técnicas de líneas de montaje fueron aplicadas a la fabricación de automóviles, para reducir los costos. Fue durante esta época de mecanización cuando se desarrollaron métodos prácticos para la construcción de juntas de contracción.

Los ingenieros habían entendido bien los principios involucrados en las juntas de contracción con plano de debilitamiento y habían reconocido que este diseño de juntas podía mejorar el comportamiento del pavimento y reducir sus costos.

Era evidente que las grietas formadas en las juntas con plano de debilitamiento, espaciadas convenientemente para aliviar los esfuerzos de tensión y de alabeo, proporcionarían espacio para la expansión entre las losas cortas formadas por las grietas controladas. Era evidente que estos espacios para la expansión, reducirían los esfuerzos de compresión que se desarrollan cuando las altas temperaturas hacen que el pavimento se expanda. Se pensó que la reducción de los esfuerzos de compresión sería suficiente para permitir un espaciamiento mayor entre las juntas de expansión o eliminar la colocación de dichas juntas, exceptuando los casos especiales. Este análisis llevó a una disminución en el uso de juntas de expansión y por el año de 1931 varios Estados Americanos las construyeron solamente en los extremos de los puentes.

Sin embargo, algunos ingenieros creyeron todavía que las juntas de expansión eran necesarias para disminuir los esfuerzos de compresión durante las épocas de calor. Para resolver el problema del espacio para expansión en los pavimentos de concreto, la Oficina de Caminos Públicos de E. U. (Bureau of Public Roads), cooperó con los departamentos de carreteras estatales en la construcción de seis obras experimentales de pavimentos con juntas, en 1940 y 1941. Varias combinaciones de espaciamiento de juntas de contracción y expansión fueron incluidos por tramos, en cada Obra. Los reportes sobre estas obras experimentales, junto con datos de estudios de pavimentos en servicio, constituyen las bases de la práctica corriente relativa a las juntas de expansión. Esta práctica establece que las juntas de expansión solamente se requiera para determinados objetivos, para intersecciones asimétricas y en otros puntos similares de concentración de esfuerzos, siempre que:

1. El pavimento se construya con materiales que tengan características normales de expansión
2. El pavimento se construya durante periodos en que las temperaturas sean bastante superiores a la de congelación
3. El pavimento se divida en secciones relativamente cortas, mediante juntas de contracción espaciadas convenientemente para controlar el agrietamiento transversal.
4. Las juntas de contracción sean conservadas debidamente para evitar que se introduzcan en ellas materiales incompresibles.

Concluyendo estos comentarios sobre las juntas de expansión, es importante notar que la práctica actual concuerda con el criterio desde un principio: Que el propósito fundamental del diseño de juntas, es controlar el agrietamiento debido a los esfuerzos de tensión y a los efectos combinados de las cargas y los esfuerzos de alabeo

Las juntas de expansión usualmente se colocan cuando menos a una longitud de losa de los extremos de un puente. Las juntas de expansión son generalmente de $\frac{3}{4}$ de pulgada de abertura. Las maderas de ciprés y pino usadas como relleno de juntas, han dado un comportamiento consistentemente satisfactorio. Estas tablas no se pudren, son resistentes a la compresión durante la expansión del pavimento y se recuperan adecuadamente durante los periodos de contracción del pavimento. Las tiras de madera se colocan 1 ó 2 pulgadas abajo de la superficie de la losa, para dejar espacio al material sellante. Para la transmisión de carga, se usan por lo general varillas pasajuntas de acero lisas espaciadas a 12 pulgadas. En uno de los extremos de la varilla se coloca un castillo dentro del cual dicha varilla pueda moverse cuando se expanda el concreto. La mitad de la varilla que lleva el casquillo debe lubricarse para evitar la fricción y permitir de esa manera el libre movimiento horizontal.

Algunos departamentos de carreteras instalan más de una junta de expansión en el intervalo regular de juntas a cada lado de los puentes y otras estructuras. Este aspecto del diseño de juntas amerita estudios más amplios. Anclajes diseñados para controlar los movimientos de las losas, colados integralmente con el pavimento, podrían eliminar la necesidad de juntas de expansión en las estructuras. Tales anclajes han sido construidos en Estados Unidos y en Europa para controlar el movimiento de las losas.

JUNTAS DE CONTRACCIÓN SIN VARILLAS PASAJUNTAS

Además de controlar el agrietamiento, las juntas transversales de contracción deben tener suficiente capacidad de transmisión de carga para:

1. Permitir la determinación de espesores de pavimento mediante el uso de la fórmula de Pickett, para losas con protección en las esquinas, la cual proporciona diseños económicos.
2. Evitar desniveles o fallas en las juntas transversales.

El diseño más económico que ofrece una solución para estos criterios, es un pavimento de concreto simple con juntas de contracción sin varillas pasajuntas, poco espaciadas. Un plano de debilitamiento se crea por medio de una ranura formada y determinada cuando el concreto es plástico, insertando tiras en el concreto plástico o aserrando una ranura después de que el concreto ha endurecido. La profundidad de la junta no debe ser menor que un sexto (1/6) del espesor de la losa. Cuando las juntas son aserradas, la profundidad de la ranura no debe ser menor que el diámetro del tramo máximo del agregado grueso.

Las caras irregulares de los bordes de las losas, que se forman abajo de la muesca o ranura aserrada, proporcionan trabazón entre los agregados y permiten la transferencia de carga. En un reporte sobre resultados de la pista de prueba de Arlington, Kelly estableció que la trabazón entre los agregados era efectiva para aberturas de juntas hasta de 0.37 pulg. Para la mayor parte de los agregados y de condiciones climáticas, este valor limitaría el espaciamiento de las juntas de contracción sin varillas pasajuntas, a cerca de los 15 pies. En zonas con rango de temperaturas extremos, se requeriría un espaciamiento menor de 15 pies. Sin embargo, estudios de campo sobre comportamiento de pavimentos han demostrado que el clima, las condiciones de la capa subrasante y el tránsito pesado, son las variables importantes que influyen en el comportamiento de los pavimentos de concreto simple con juntas de contracción sin varillas pasajuntas. Estos estudios se han llevado a cabo en cooperación entre la Asociación de Cemento Portland (Portland Cement Association) y los departamentos estatales de carreteras. Los trabajos de campo se iniciaron en 1952 y se continúan en determinados tramos seleccionados, para evaluar la influencia de la vida de servicio que van teniendo.

Los estudios mostraron un comportamiento estructural satisfactorio en todas las áreas climáticas para todos los espaciamientos de juntas de 12.5 a 30 pies, cuando se tuvo una adecuada protección contra el fenómeno de bombeo y contra los cambios diferenciales de volumen en los suelos de la capa subrasante, debido a la acción de las heladas o a la presencia de arcillas expansivas. Sin embargo, la protección contra deterioros por esas causas es esencial para todos los pavimentos y diseños de juntas.

Con relación a las fallas en las juntas, los estudios mostraron un comportamiento satisfactorio de juntas sin varillas pasajuntas en todas las obras localizadas en zonas donde las heladas no penetraron más que alrededor de 12 pulgadas, una vez cada 10 años. Estas áreas incluyen: La región occidental de Washington, California, los Estados del sur y sudeste hasta Carolina del Norte. La ausencia de juntas falladas, mostrada por los estudios, justifica el amplio uso actual

de estos pavimentos económicos y del diseño de juntas, en estas áreas libres de heladas, sobre todas las otras clases de pavimentos

En áreas donde la penetración de las heladas es profunda y más frecuente, los estudios de comportamiento muestran que el volumen de tránsito pesado es una de las principales causas de la magnitud y severidad de las fallas en las juntas sin barras. Sin embargo, los efectos de la penetración de las heladas varía mucho en los Estados Unidos. Consecuentemente, no es posible desarrollar criterios aplicables a todas las áreas afectadas por las heladas. Por esta razón, los ingenieros se guían por lo que indica el comportamiento local, al seleccionar el diseño de juntas para obras en zonas afectadas por las heladas. Esto hace práctico tomar completa ventaja de las economías inherentes a los pavimentos de concreto simple con juntas sin barras. Por ejemplo, en grandes áreas del Occidente de los Estados Unidos, las heladas penetran de 20 a 30 pulgadas o más cada año. Sin embargo, en climas áridos, semiáridos y ligeramente húmedos, con baja precipitación pluvial, se combinan condiciones favorables del suelo, que mitigan los efectos de la penetración de las heladas. La mejoría resultante en el comportamiento de los pavimentos en muchas regiones del área occidental de los E. U., justifica la especificación de pavimentos de concreto simple con juntas sin barras, en el sistema interestatal y rutas primarias con gran número de camiones, así como en carreteras secundarias y calles de ciudades.

Una aplicación similar de los datos de experiencias locales, se realiza en las áreas de la frontera norte de los Estados Unidos, donde la penetración de las heladas es ligeramente mayor y más frecuente que en los Estados más alejados del sur. El conocimiento del comportamiento de las juntas en estas áreas fronterizas, hace posible extender el uso de los pavimentos de concreto simple con junta sin barras, a muchos caminos que soportan tránsito de camiones pesados.

En los Estados centrales del Norte y Noreste, los estudios de comportamiento demostraron que las juntas sin barras no se comportan satisfactoriamente en carreteras que llevan tránsito de camiones pesados. En estas zonas la profundidad y la frecuencia de penetración de las heladas, son del mismo orden que en los Estados del Oeste. Sin embargo, suelos desfavorables y climas más húmedos, con mayores precipitaciones pluviales, se combinan para hacer más severos los efectos de la penetración de las heladas. Como resultado de ello, el uso de pavimentos de concreto simple con juntas sin barras, generalmente se limita a calles residenciales de ciudades y a otras calles y carreteras con volúmenes pequeños de camiones pesado.

Los departamentos de carreteras de los Estados del Oeste de E.U., California y Washington, han construido juntas de contracción sesgadas, sin barras, en obras experimentales y como un procedimiento de construcción estándar. Un desgajamiento de 4 pies en 24, hace que las ruedas cargadas de los camiones pasen a través de las juntas una a un tiempo. Este diseño se adoptó después de que un estudio detallado, efectuado en un tramo experimental con 3200 camiones diarios, mostró notable superioridad de las juntas sesgadas con relación a las juntas en ángulo recto.

JUNTAS DE CONTRACCIÓN CON VARILLAS O BARRAS PASAJUNTAS

Para obras donde es evidente que las juntas de contracción sin barras no controlan las fallas en las propias juntas, se empleen barras en las juntas de contracción. Un diseño completo requiere un cuidadoso análisis económico de dos alternativas existentes. La primera alternativa de diseño se trata de un pavimento de concreto simple con juntas con barras convenientemente espaciadas para controlar el agrietamiento transversal. Con la transmisión

de carga adicional proporcionada por las barras, el proyectista selecciona el máximo espaciamiento entre las juntas que controlará el agrietamiento transversal. La selección del espaciamiento de juntas se basa generalmente en la experiencia obtenida anteriormente con condiciones similares a la obra que se va a diseñar. Las dimensiones de las barras pasajuntas son iguales a las usadas en las juntas de expansión. No se requieren casquillos pero debe lubricarse la mitad de cada barra para permitir el movimiento de la losa.

La otra alternativa de diseño considera el empleo de juntas de contracción con barras y acero distribuido. En este diseño las juntas de contracción no son espaciadas para controlar el agrietamiento, sino que el acero distribuido se diseña para evitar que las caras de las losas se separen después de que ocurre el agrietamiento y el espaciamiento de las juntas se basa en un análisis del costo relativo del acero distribuido y de las juntas con barras, para varios espaciamientos de las juntas. La cantidad y el costo del acero distribuido se incrementa con la longitud de la losa y el costo de las juntas aumenta si la longitud de la losa disminuye.

Los costos del acero distribuido y de las juntas con barras varían considerablemente, dependiendo de los costos locales de materiales y mano de obra por los diversos elementos involucrados. Estudios detallados de costos hechos para varios Estados del medio-oeste de Estados Unidos, muestran que el espaciamiento más económico de las juntas es generalmente de 40 a 50 pies.

Un análisis completo de diseño, frecuentemente muestra que la combinación menos costosa de juntas con barras y acero distribuidos no es el diseño de juntas más económico. Cuando un espaciamiento entre juntas de más de 15 pies puede controlar el agrietamiento transversal, la comparación de costos demostrará por lo general que un pavimento de concreto simple, diseñado con juntas de contracción con barras, resultará de menor costo. El espaciamiento más económico de juntas, para un diseño usando barras y acero distribuido es de 40 pies. El costo de las juntas y del acero distribuido por milla de longitud y 4 carriles es de \$ 22,200 Dls. Un espaciamiento entre juntas de 20 pies es más que adecuado para el control del agrietamiento usando agregados gruesos de los que existen en Illinois, E.U., que es el caso de la comparación. El costo de las juntas por milla de longitud y 4 carriles, para un pavimento de concreto simple con juntas de contracción con barras espaciadas cada 20 pies es de \$ 18,300 Dls, permitiendo un ahorro de casi \$ 4,000 Dls por milla de cuatro carriles. Hay una ventaja adicional en el diseño de pavimentos de concreto simple. Mientras más cortas sean las losas, más pequeñas serán las aberturas de las juntas durante los períodos de contracción del pavimento y el sellado será más efectivo en evitar la introducción de materiales incomprensibles dentro de las propias juntas.

JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN

Los detalles de las juntas longitudinales de construcción se muestran en la figura No 9 y fueron discutidos al hablar de las juntas longitudinales. Las juntas transversales de construcción se diseñan para interrupciones planeadas durante las operaciones de pavimentación como la que ocurre al final de cada día de trabajo. Interrupciones de emergencia debidas a la lluvia o a fallas del equipo, deben también tenerse presentes.

Las juntas de construcción planeadas se colocan en lugares de juntas normales y consisten en una junta a tope con barras para transferencia de cargas. El tamaño de las barras y el espaciamiento son semejantes a los de las otras juntas con barras. Para garantizar el movimiento de la junta, los extremos de las barras que salen de losas deben lubricarse antes de continuar con la pavimentación.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

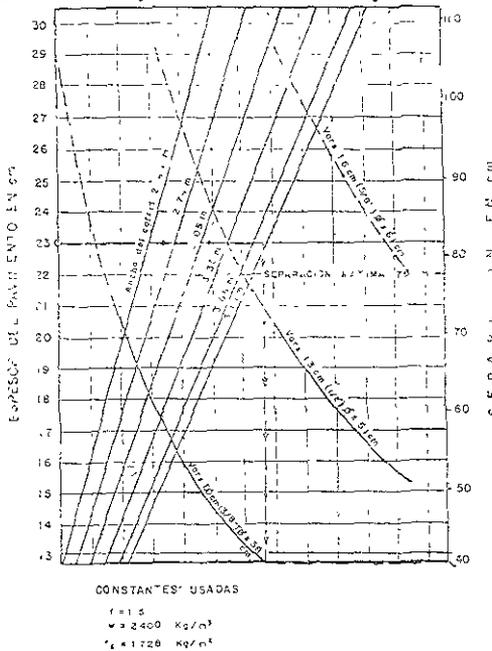
Si una emergencia hace necesario colocar una junta de construcción entre juntas espaciadas normalmente, esta junta de emergencia debe ser del tipo machihembrada y sujeta. Si la junta de emergencia no se sujeta para evitar su movimiento, se desarrollará una grieta de mal aspecto en la losa adyacente. Pueden usarse bien sea barras corrugadas o pernos con ganchos, para mantener firmemente unida la junta de emergencia.

Las juntas de construcción planeadas como las de emergencia, se extienden a través de los dos carriles que se van pavimentando, no es necesario que sean del tipo machihembradas y sujetadas para el caso de interrupciones de emergencia que tengan lugar entre juntas transversales espaciadas normalmente. Sin embargo, por lo general se usan juntas machihembradas y sujetadas, debido a que las juntas a tope con barras son más costosas.

EJEMPLOS DE CALCULO DE VARILLAS DE LIGA (CORRUGADAS) Y DE PASAJUNTAS (VARILLAS LISAS), PARA JUNTAS DE PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICA.

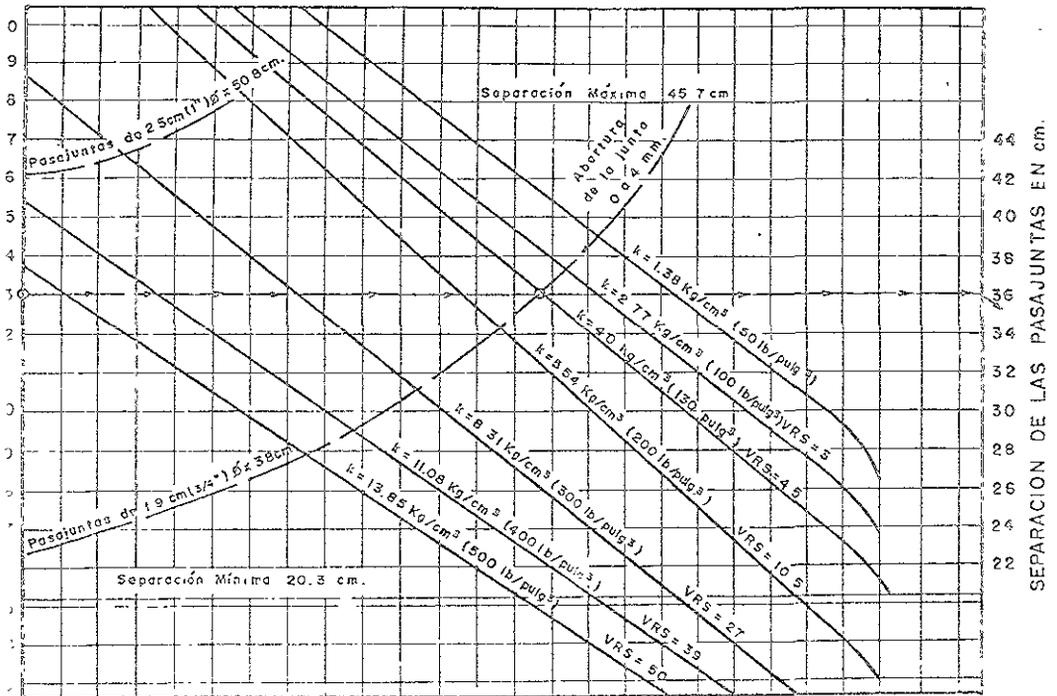
Como quedó asentado anteriormente, en los pavimentos de concreto hidráulico no reforzado, es decir que no llevan acero distribuido dentro de toda la losa, el acero se usa generalmente en forma de varillas de liga y pasajuntas. Las varillas de liga son usadas principalmente a través de juntas longitudinales para unir y mantener juntas dos losas. Las pasajuntas se usan a través de juntas transversales y constituyen uno de los medios para transmitir carga de una losa a la contigua.

El tamaño y espaciamiento de las varillas de liga requeridas a través de una junta, puede determinarse por medio de cálculo o directamente de la gráfica No. 10. La determinación del diámetro, longitud y espaciamiento de las pasajuntas, puede hacerse utilizando las gráficas Nos. 11 y 12, según se trate de juntas de contracción o juntas de dilatación, respectivamente.



GRAFICA No. 10 DETERMINACION DEL DIAMETRO, LONGITUD Y SEPARACION DE LAS VARILLAS DE LIGA

TESIS PROFESIONAL
 "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"



GRAFICA No 11 PARA PROYECTO DE PASAJUNTAS DE VARILLAS REDONDAS Y LISAS USADAS A TRAVES DE LAS JUNTAS DE CONTRACCION

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Como ejemplo ilustrativo calcularemos las varillas de liga y pasajuntas para el diseño de espesores 1-A. Los datos requeridos para el cálculo son los siguientes:

Espesor de la losa = 9 pulgadas = 23 cm.

Ancho de losa = 12 pies = 3.70 m

Longitud de losa = 12 pies = 3.70 m

a) VARILLAS DE LIGA (CORRUGADAS)

El área de acero requerida en varillas de liga, por metro de longitud de junta, se calcula por medio de la fórmula (3), que implica el equilibrio entre la fuerza de fricción que se desarrolla entre el pavimento y la superficie de apoyo, al tratar de moverse la losa y la fuerza resistente de las varillas de acero a lo largo de la junta

$$A_s = \frac{b \cdot f \cdot w \cdot e}{f_s} \quad (3)$$

En la que:

A_s = Área de acero requerida por metro de longitud de la junta, en cm^2

b = Distancia entre la junta de que se trata y la junta libre y orilla más próxima, en m; por lo general será igual a la anchura de la losa.

f = Coeficiente de fricción entre el pavimento y la capa subrasante o subbase (generalmente se usa 1.5).

w = Peso por m^3 de concreto (2,400 kg/m^3).

e = Espesor promedio de la losa, en m

f_s = Esfuerzo permisible de trabajo a la tensión, del acero, en kg/cm^2 (1728 kg/cm^2).

El número de varillas en la junta será

$$n = \frac{A_s \cdot L}{A_v} \quad (4)$$

n = Número de varillas en la junta

A_s = Área total de acero requerida, en cm^2/m de junta.

A_v = Área de una varilla, en cm^2 .

L = Longitud de la losa, en m = Longitud de la junta, en m.

El espaciamiento de las varillas será

$$E = \frac{L}{n} = \frac{A_v}{A_s} \quad (5)$$

E = Espaciamiento, en m

n , A_v , A_s , L , definidos para la fórmula (4)

Para el caso de nuestro ejemplo

$$A_s = \frac{b \cdot f \cdot w \cdot e}{f_s} = \frac{3.70 \times 1.5 \times 2400 \times 0.23}{1728} = 1.78 \text{ cm}^2/\text{m de junta}$$

Seleccionando varillas de 3/8" de diámetro, con $A_v = 0.71 \text{ cm}^2$

$$n = \frac{1.78 \times 3.70}{0.71} = 9 \text{ varillas}$$

$$E = \frac{A_v}{A_s} = \frac{0.71}{1.78} = 0.40 \text{ m}$$

La longitud de cualquier varilla de liga deberá ser cuando menos, el doble de la requerida para desarrollar una resistencia de adherencia igual al esfuerzo de trabajo del acero.

Se calcula por la siguiente fórmula, que implica el equilibrio entre la fuerza de tensión de la varilla ($A_v f_s$) y la fuerza de adherencia de la mitad de la varilla anclada en el concreto ($1/2 l p u$):

$$l = \frac{2 f_s A_v}{u p}$$

En la que:

l = Longitud de la varilla, en cm.

f_s = Esfuerzo permisible de trabajo a la tensión del acero, en kg/cm².

A_v = Área de la sección de una varilla, en cm².

u = Esfuerzo permisible de adherencia en varillas corrugadas = 25 kg/cm².

p = Perímetro de la varilla, en cm.

Para nuestro ejemplo:

$$l = \frac{2 \times 1728 \times 0.71}{25 \times 3} = 33 \text{ cm}$$

Para asegurar que la longitud mínima necesaria de la varilla quede empotrada en el concreto se recomienda aumentar la longitud calculada en 5 cm, entonces:

$$l = 33 \times 5 = 38 \text{ cm}$$

b) PASAJUNTAS DE CONTRACCIÓN (VARILLAS LISAS)

Datos:

Espesor de la losa = 23 cm.

k = Módulo de reacción de la capa subrasante = 130 pci = 4.0 kg/cm³ (supuesto)

Abertura de la junta = 0 a 4 mm.

Entrando a la gráfica No. 11, en el eje de la izquierda, con el espesor $d = 23$ cm, se continúa horizontalmente hasta la curva correspondiente a $k = 4.0$ kg/cm³; luego, verticalmente hasta la curva de abertura de 0 a 4 mm; en la parte inferior de esta curva se lee el tamaño y longitud de la varilla, 1.9 cm (3/4") de diámetro por 38 1/2 cm de largo, se sigue horizontalmente hasta la orilla derecha y se lee la separación de 36 cm

c) PASAJUNTAS DE DILATACION (VARILLAS LISAS)

Se emplea la gráfica No 12

Datos:

Abertura de la junta = 2.5 cm

$k = 130 \text{ pci} = 4.0 \text{ kg/cm}^3$

Espesor de la losa = 23 cm.

Se entra a la gráfica en el eje vertical del lado izquierdo, con el espesor, $d = 23 \text{ cm}$; se continúa horizontalmente hasta la curva correspondiente a $k = 4.0 \text{ kg/cm}^3$; de ahí se sigue verticalmente hasta cortar la curva de 2.5 cm de abertura, en el extremo más bajo de esta curva se lee el tamaño de la pasajunta, de 1.9 cm (3/4") de diámetro y 33 cm de largo; luego se continúa horizontalmente hacia el eje de la derecha y se lee el espaciamiento de 27 cm.

V. ADOQUINES DE CONCRETO Y AVANCES TECNOLÓGICOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

V.1 PANORAMA ACTUAL Y USO EN OTROS PAÍSES

La imagen respecto al uso de adoquines de concreto en pavimentos, cambió radicalmente en 1962, cuando algunos miembros de la industria se encontraban en los países bajos en plan de estudio y pudieron observar que allí ya se utilizaban ampliamente los adoquines de concreto para pavimento, aunque eran sólo de forma rectangular.

Se pensó que en terrenos como el holandés debía de ser muy adecuado para este nuevo tipo de recubrimiento, pero que por muchas razones, resultaría imposible adaptarlo a las condiciones de otros países como Alemania; aún a largo plazo. Una de las razones mencionadas fue que esta forma de pavimento que consistía en colocar, uno al lado de otro, pequeños elementos con muchas juntas, debía evitarse para impedir la penetración de agua

No obstante, las conclusiones resultaron falsas, ya que desde esa época, se han utilizado consistentemente los adoquines de concreto como los elementos más versátiles para la pavimentación de superficies de caminos, plazas y andadores. en escala nunca antes imaginada, por lo que podemos hablar de una "marcha triunfal" única. Así pues, el año pasado, la producción en la República Federal de Alemania, alcanzó la respetable cifra de unos ocho millones de toneladas. Uno de los motivos principales para el uso cada vez mayor de este material es probablemente su universalidad: el adoquín de concreto es adecuado para la construcción de andadores y senderos para bicicletas, así como de plazas y parques; también es adecuado para aplicaciones industriales y , en la actualidad, los adoquines de concreto se han utilizado con éxito en la construcción de caminos de tránsito pesado.

A pesar del estado general de depresión de la industria de la construcción durante los últimos años, se ha observado un considerable incremento en el uso de adoquines de concreto en países como Inglaterra, aunque las ventas per cápita son pequeñas en comparación con la de otros países del norte de Europa.

Antes de 1975 se producían adoquines de concreto, en pequeña escala, y las ventas eran también limitadas debido a la carencia de datos de diseño y de construcción. En esa época, se consideraba que los adoquines proporcionaban únicamente una superficie estética, pero eran muy pocos los que pensaban que este material pudiera tener mérito de ingeniería. Ahora la situación ha cambiado y la mayoría de los ingenieros responsables del diseño de andadores, carreteras, estacionamientos y pavimentos para áreas aledañas a los muelles, aceptan los adoquines como reemplazo idóneo de los otros materiales de pavimentación

El comportamiento de cualquier pavimento depende de muchos factores: de la capacidad portante de la subrasante, de las cargas de tránsito y de la frecuencia de éstas durante la vida de diseño, así como de las propiedades estructurales de las diversas capas que constituyen el pavimento. Además de su capacidad estructural, son también importantes una buena resistencia al derrape y el drenaje correcto del agua superficial. Por último, en algunos casos, la apariencia y el color pueden ser significativos.

Una característica del pavimento de adoquines, que se considera una ventaja sobre el pavimento común en obra es su facilidad de reinstalación, por ejemplo, en áreas donde es necesario tener acceso a servicios subterráneos

Aunque el pavimento con adoquines no es en sí nada nuevo, ya que se utilizó hace 150 años en Londres, en forma casi idéntica a la actual, la utilización del concreto en la construcción de adoquines para pavimento sí es relativamente nueva y se puede decir con toda confianza que, en el futuro, se utilizarán cada vez más los adoquines de concreto en los pavimentos.

Por ahora no se presumen cambios importantes respecto a los adoquines, si acaso algunas mejoras en los métodos de manejo. Ciertamente, puede asegurarse que el método de construcción está firmemente establecido y puede considerarse como un método más de pavimentación entre los usados comúnmente.

Las terminales de contenedores es también un buen lugar donde usar los adoquines, pues dos tercios de la inversión total, corresponde a trabajos de ingeniería civil, tales como los muros de muelles, patios de almacenamiento, edificios, etcétera. Una cuarta parte de estos dos tercios se necesita para la superficie de la terminal, y esto es aplicable, no sólo a las terminales de contenedores, o si no también a otras áreas industriales.

Los adoquines de concreto en pavimentos para construcciones industriales ha sido, durante treinta años, práctica común en países como en la República Federal de Alemania. El uso exitoso de los adoquines de concreto en la construcción de caminos (iniciada hace unos 80 años) ha contribuido al descubrimiento de que las propiedades especiales de los adoquines de concreto para pavimento, son adecuadas también para aplicaciones especiales en las construcciones industriales.

Aunque en la mayoría de los casos se usó inicialmente el adoquín rectangular para pavimento, con medida de 16x16x14 cms. (de acuerdo con los diseños de pavimentos acostumbrados entonces para caminos de tránsito pesado), se encuentran también numerosas aplicaciones de adoquines compuestos, de 8 a 10 cm. de espesor, en diferentes ramas de la industria, bajo diferentes modos de esfuerzo.

Alrededor del 50% de la producción del adoquín rectangular ya mencionado, se usa actualmente en aplicaciones industriales, y también en el pavimento que se construye entre los rieles de ferrocarril, en caminos urbanos de tránsito muy pesado, en instalaciones portuarias y en estructuras hidráulicas. Aún en nuestra época, la aplicación de los adoquines compuestos para pavimento, en construcciones industriales, es considerable, aunque es diferente de una u otra rama industrial. Depende no solamente de la infraestructura de campo industrial en el que se va a instalar el pavimento de concreto, sino también de las prácticas regionales de construcción, del criterio de los diseñadores y constructores y de la experiencia obtenida en el uso de piedras de concreto para pavimento.

En las construcciones industriales, muchas veces no existe otra opción sensata para la pavimentación que no sea la de adoquines de concreto. Esto es aplicable también a otros materiales de construcción preparados con cemento (concretos colados en obra, losas de gran tamaño), que no pueden ofrecer las ventajas especiales de los adoquines de concreto, ya sea debido a especificaciones técnicas o debido a su precio.

La incertidumbre para pavimentar, o no, con adoquines de concreto en las obras industriales, frecuentemente se debe a la ignorancia.

Examinando algunos de los pocos problemas que se han encontrado en obra y la manera en que han sido resueltos, obtuvimos las conclusiones siguientes:

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Los factores principales que afectan el diseño de áreas pavimentadas con adoquines de concreto son las cargas, y las características de la subrasante. Cuando se toman en consideración estos dos factores, puede determinarse el espesor de diseño, utilizando material ya comercializado para obtener un pavimento de larga vida y con bajos costos de mantenimiento. En áreas de asentamiento de la subrasante, los adoquines de concreto prefabricado ofrecen la mejor solución para superar este problema. En estas condiciones, la capacidad funcional de junteo del pavimento de adoquines de concreto permite la deformación del pavimento sin gran pérdida de su integridad estructural. Los adoquines también tienen la ventaja de ofrecer un método atractivo de recubrimiento, al que no afectan los derrames de aceite y que pueden levantarse fácilmente para reemplazarse cuando las circunstancias así lo requieran.

En sitios comerciales e industriales el pavimento de adoquines, puede usarse en casi cualquier circunstancia y proporciona un sistema económico de construcción que requiere equipo mínimo, y un pavimento que puede usarse inmediatamente después de terminar el proceso de construcción.

En lo que se refiere a los caminos en sí, los adoquines de concreto se usan limitadamente en calles de zonas residenciales, en caminos para velocidades máximas de 30 km/hr y en paradas de autobuses.

Analizando la posible aplicación de este tipo de pavimento en autopistas y carreteras principales, resultó que técnica y económicamente es posible introducir este tipo de pavimento en caminos primarios cumpliendo con los requerimientos existentes de seguridad y larga duración.

Entonces se tomó la decisión de probar los adoquines de concreto en el pavimento de la carretera principal 348 al sur de Viborg en Dinamarca.

El camino a prueba se construyó en el verano de 1977 y se abrió al tránsito el 10 de octubre del mismo año. Este contó con una longitud de 1.2 km y 3.5 m de ancho, un carril ascendente con pendiente longitudinal de 5%. A todo vehículo que no pudiera mantener una velocidad de 70 km/hr se le ordenó tomar el carril ascendente.

El pavimento de prueba es una extensión lateral del pavimento existente, y se construyó con adoquines de 8 cm, sobre capas de 3 cm de arena, 20 cm de cemento granular adherente, 10 cm de material granular de subbase y 40 cm de subbase de arena.

En general, el pavimento de prueba a funcionado bien y es de notarse que no se hayan observado marcas de ruedas. Es sorprendente, sin embargo, que la resistencia al derrape disminuyó rápidamente su magnitud inicial hasta la magnitud aceptable que conserva actualmente. No obstante, aún en el caso de aplicar una capa más gruesa de adherente bituminoso, es de dudarse que el pavimento para autopista y carreteras de primera clase, aunque es de esperarse que funcione adecuadamente en áreas urbanas, con velocidades máximas de 60 km/hr.

Por último, en general podemos decir que en estos últimos años habrá a escala mundial un uso considerablemente más amplio de los adoquines de concreto.

V.2 ADOQUINES DE CONCRETO PARA TRANSITO LIGERO Y PESADO

ADOQUINES DE CONCRETO PARA TRANSITO LIGERO

DISEÑO.

Un camino pavimentado con adoquines de concreto, incluye los siguientes elementos

- 1.- Subbase
- 2.- Plantilla - una capa de 5 cm de arena fina.
- 3.- Adoquinado - los propios adoquines.
- 4.- Guarnición - un borde firme, para evitar que los bloques se desplacen.

SUBBASE

Los adoquines de concreto se pueden colocar directamente sobre la subbase, la capa y la superficie de rodamiento es sustituida con 5 cm. De arena y con los adoquines, pues se demostró que los adoquines tienen una capacidad de distribución de carga similar a la del asfalto compactado de 16 cm.

En la Tabla No. 24, proporciona los espesores que se requieren para la subbase en 5 diferentes tipos de subrasante, utilizando la duración recomendada en el diseño, eso para fines prácticos. Los espesores se escogieron, suponiendo que el nivel de aguas freáticas está a más de 60 cm Por debajo del nivel de formación; en caso que sea mayor, se deberán utilizar los espesores proporcionados entre paréntesis.

Cuando la subbase sea transitada con frecuencia, y sufra algún daño, tendrá que repararse antes de colocar el pavimento.

El acabado final de la superficie de la subbase, debe ser el mismo que el del camino terminado, a fin de mantener una profundidad uniforme de la plantilla de arena. No se debe exceder el límite de ± 2 mm. Del nivel especificado en la subbase.

Una losa de concreto delgada, que sirva primordialmente como un camino de transporte para el tránsito de ese lugar puede ser una alternativa para la construcción de la subbase. Un espesor de 7.5 cm., de losa colocada directamente sobre la subrasante soportará mucho más que el tránsito normal, y esta podrá usarse en la construcción de por ejemplo un fraccionamiento de 1000 casas, por lo que este espesor de losa es el adecuado para camino de transporte en las etapas iniciales y, finalmente, se puede utilizar como subbase para la pavimentación con adoquines.

Las cifras entre parentésis se deben de usar si el manto freático es menor de 60 cm por debajo del nivel de formación

La subbase de concreto se puede construir sin juntas o sin refuerzos debido a que se le debe colocar un revestimiento, por esto se provoca un agrietamiento. Por lo tanto hay que tener cuidado para asegurar que la losa no tenga ningún punto con un espesor menor de 7.5 cm y que la tolerancia en la superficie esté dentro de ± 2 cms.

Por otra parte, el tamaño máximo de los agregados del concreto empleado, deberá ser de 2 cms, con un alto porcentaje de trabajabilidad, y deberá diseñarse para tenga la resistencia característica de un cubo de concreto a los 28 días, de 300 kg/cms².

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA No. 24

ESPEORES DE LA SUBBASE FLEXIBE (en cm), PARA DIVERSOS TIPOS DE SUBRASANTE Y CAMINOS, CUANDO EL MANTO FREATICO ESTA A MAS DE 60 CM POR DEBAJO DEL NIVEL DE FORMACION

Tipo de Camino	Tipo de subrasante					
	Vida de diseño (años)	Arcilla Dura	Sedimento	Arcilla con Sedimentos	Arcilla Arenosa	Arena o Grava arena bien graduada
1.- Callejón u otro camino residencial de menor importancia	40	40 (55)	40 (55)	19 (30)	14 (23)	8 (8)
2.- Camino transversal o camino que soporta rutas regulares de autobuses hasta de 25 vehiculos de servicio público al día en ambas direcciones	40	45 (60)	45 (60)	22 (34)	17 (26)	15 (15)
3.- Camino transversal importante que soporta rutas regulares de autobuses con 25 o 50 vehiculos de servicio público al día en ambas direcciones	20	44 (59)	44 (59)	21 (34)	16 (26)	15 (15)

El tránsito sobre la losa de subbase se deberá impedir durante 14 días ahora bien, si se desea acelerar su uso para el tránsito, se podrá utilizar una mezcla con mejores propiedades, que alcance una resistencia característica a los 28 días de 400 kg/cm^2 . y permitir la circulación del tránsito a los 2 ó 3 días, siempre que la temperatura ambiente esté por encima de los 10°C , entre el momento de la colocación del concreto y la apertura al tránsito.

PLANTILLA

Consta de una capa de arena fina, que no tenga más del 30% de sedimentos y de arcilla por peso, ni más del 100% reterido en una malla de 0.5 cms. Esta se extiende para obtener un espesor, una vez compactada, de 5 cms. El perfil de la arena sin compactar, debiera ser semejante al de la superficie terminada.

ADOQUINADO

El adoquinado está constituido por los adoquines de concreto, estos se deben colocar de tal manera, que se origine un cuatrapeo. Para pavimentos residenciales, no es necesario utilizar adoquines con un espesor mayor de 8 cms, aún cuando se incluyan paradas de autobuses y área de carga.

El cuatrapeo evita que cualquier adocquín se desplace en relación a los adoquines adyacentes, también impide que las fuerzas producidas por vehiculos que aceleran o que frenan, desplacen a los adoquines horizontalmente o provoquen deslizamientos. Si se desplazaran horizontalmente una distancia de cierta importancia, la capacidad de los adoquines para distribuir cargas se destruiría, ya que las juntas se abrirían y se perderá el cuatrapeo vertical.

Los adoquines encajan perfectamente unos con otros, los espacios entre ellos generalmente entre 2 y 3 mm. Se llenan de partículas de arena y de polvo, esto impide que un solo adoquín se desplace, ya que asegura que la carga vertical sea soportada por dicho adoquín, además por los adoquines adyacentes y disminuyendo gradualmente, por los que se encuentren más distantes. Por lo tanto, la aplicación de una carga al pavimento, provoca que éste tenga un comportamiento que le podríamos llamar "flexible".

Los adoquines de forma patentada, pueden colocarse cuatrapeados, con el eje longitudinal a un ángulo aproximado de 90°, respecto al eje de circulación, o bien, en forma de petatillo como se colocan los adoquines rectangulares; éstos adoquines se deben colocar solamente en forma de petatillo en cualquier pavimento transitado por vehículos.

GUARNICION

Esta es de gran importancia para evitar que los adoquines se desplacen, que las juntas se abran y que el cuatrapeo se destruya.

Las guarniciones deben ser resistentes para soportar los daños ocasionados por los vehículos que transitan por el camino, y que accidentalmente exceden su velocidad, se puede usar cualquier tipo de guarnición. Comúnmente se utiliza una guarnición principal para los caminos urbanos; pero para caminos transitados por vehículos ligeros, es preferible emplear una guarnición del tipo integral a nivel.

El cortar los adoquines para que se ajusten contra un canal o contra una guarnición a nivel, es más rápido que cortarlos para que se ajusten a una guarnición vertical, ya que el obrero que coloca los adoquines, puede ver fácilmente donde se pueden efectuar los cortes; en cambio, cuando los adoquines se colocan contra una guarnición vertical, es necesario hacer mediciones, lo cual provoca atrasos en el ritmo de trabajo.

DRENAJE

Si el pavimento de adoquines ha estado en servicio durante poco tiempo, se sellan las juntas que se encuentran entre los adoquines. Por lo tanto, se deberá proporcionar un drenaje superficial, siguiendo la técnica establecida.

Por otra parte, con el fin de prevenir la formación de charcos, se recomienda que la pendiente tenga una inclinación mínima de 1:40. Cuando la pendiente por bombeo del camino sea menor de 1:40, son recomendables también los canales de drenaje frente a las guarniciones. Estos canales pueden construirse con unidades estándar de concreto prefabricado. En ningún caso se deben colocar canales de drenaje, cuando las pendientes sean menores de 1:180.

Los adoquines pueden cortarse para que encajen perfectamente, en caso de que se presentan obstáculos como las alcantarillas y las tapas para inspección.

DISEÑO GEOMETRICO

Los cambios en lo ancho de los caminos, las curvas y las uniones no presentan serias dificultades, debido a que los adoquines son pequeños, y se pueden colocar fácilmente para adaptarse a cualquier disposición del camino.

Las líneas y otras marcas, se pueden diseñar marcas permanentes en un pavimento, con el empleo de adoquines de diferentes colores, para indicar las paradas de autobuses, las áreas de estacionamiento para automóviles, los pasos para peatones y los carriles de tránsito.

CONSTRUCCION

Esta parte describe brevemente, las técnicas que tienen una mayor aceptación y los estándares que se pretenden lograr, para la colocación de los adoquines. Una buena planificación y un trabajo bien organizado, mejorarán en parte el ritmo de colocación de adoquines y, por consiguiente, se reducirán los costos.

En la preparación de la subbase, con el propósito de colocar la plantilla es muy frecuente que la plantilla y el adoquinado, no se coloquen sino hasta que las operaciones de construcción de las casas u otra obra estén terminadas, a fin de evitar que los adoquines se manchen con los desechos y los desperdicios de los constructores. Ahora bien, hay que tener en mente que, antes de colocar la plantilla, la superficie de la subbase deberá limpiarse, y se deberá reparar cualquier área defectuosa.

Construcción de la plantilla. El espesor requerido de la arena no compactada para la plantilla dependerá del contenido de humedad, de la granulometría y del grado de compactación previa. La arena de la plantilla necesita extenderse a una altura mayor que la de la capa compactada de 5 cms.

Es sumamente útil mantener constante la granulometría y el contenido de humedad de la arena, a fin de evitar el tener que ajustarla sobre carga durante la construcción. Por otra parte, es necesario asegurarse de que el espesor de la arena no compactada se mantenga correcto, haciendo revisiones periódicas del nivel de la superficie del pavimento.

Una vez esparcida la arena, ésta se debe emparejar con una regla, hasta obtener el nivel deseado. Para caminos con un ancho menor de 4.5 m. se podrán utilizar las guarniciones como guías de enrase, pero en caminos más anchos, es necesario colocar rieles temporales de enrase, para así nivelar la plantilla.

Durante el esparcimiento de la arena y el enrase, los trabajadores no deberán pararse sobre la arena, ya que se presentaría una compactación previa irregular, causando con ello imperfecciones en la superficie final del camino. Es recomendable evitar enrasar grandes distancias de arena frente a la cara de los adoquines, para así reducir el riesgo de que se presente alguna alteración.

Construcción del adoquinado. Esta comprende tres etapas: la colocación de los adoquines, el corte de los mismos en los bordes de las avenidas y, finalmente, el vibrado del área terminada. Las recomendaciones que aquí se dan, se aplican solamente a la forma más sencilla de colocación, en la que todos los adoquines tienen la misma forma.

Las primeras hileras de adoquines se deben colocar con sumo cuidado, para evitar que se desplacen los adoquines ya colocados. Una vez que las primeras hileras haya sido colocadas, las otras se podrán colocar rápidamente y con firmeza. Hay que tener en cuenta que en esta etapa, no se debe tratar de cortar los adoquines, para ajustarlos a los bordes.

Las personas que colocarán los adoquines deberán trabajar partiendo de los adoquines ya colocados, y debe evitar alterar tanto la arena enrasada, como la última hilera de adoquines ya colocada. Asimismo, deben verificar, paso a paso, que los adoquines encajen.

perfectamente. Por su parte, las áreas con aberturas anchas se deberán quitar y volver a colocarse

A las formas difíciles de manejar en los bordes, se les debe dar un acabado partiendo los adoquines con una cortadora, o con un cincel y un martillo. Por otra parte, se debe evitar el uso de adoquines muy pequeños o delgados, ya que es probable que se destruyan durante el vibrado.

Las rejillas de las alcantarillas, las tapas de acceso y las de inspección, deben tratarse de manera similar con respecto a los bordes, teniendo especial cuidado de asegurarse que los adoquines, al ser compactado, queden ligeramente más arriba (3 mm aproximadamente) que cualquier entrada de drenaje.

Algunas tapas de inspección y entradas de las alcantarillas, se fabrican con fierro fundido, reforzadas con perfiles verticales salientes. La colocación de los adoquines para el trabajo con fierro fundido, se simplificará si se efectúa un colado de concreto, reforzado unos días antes de la colocación de los adoquines, a fin de cubrir los perfiles

Una vez que se haya completado un tramo de camino, incluyendo a los bordes, los adoquines se deberán vibrar con una placa, vibradora. El número de veces que se deberá pasar la placa vibradora, dependerá de varios factores y se precisará por medio de experimentos en la obra. El número de veces determinado deberá ser suficiente para proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, y así evitar que los vehículos provoquen una mayor compactación. Normalmente será suficiente usar la placa vibradora dos o tres veces.

El vibrado no se deberá llevar a cabo en un metro aproximadamente en los adoquines sueltos; por otra parte; durante la noche, se debe dejar sin vibrar la menor cantidad posible del adoquinado.

Por último, se cepillará la arena sobre la superficie y la placa vibradora se pasará sobre ésta, dos o tres veces, para así terminar el cuatrapeo, y rellenar las juntas. Una vez terminado el vibrado, podrá hacerse uso del camino.

Las pequeñas aberturas que quedan en los bordes de la avenida, o alrededor de las entradas en las alcantarillas y en las tapas de acceso, se pueden llenar con un mortero de cemento-arena, no menor de 1.4, siempre que sea necesario

En una pavimentación, la operación de enrasado requerirá el trabajo de tres hombres, dos de ellos llevando la regla de enrasar y otro ayudando a rastrear la arena. Si estos tres hombres forman el equipo de colocación, emplearán entre un 10 y un 15% de su tiempo, para esparcir y enrasar la arena. Este tiempo variará de acuerdo a la complejidad de la propia obra.

El suministro de los adoquines frente al lugar de la colocación, ahorrará considerablemente, los costos de traslado de los adoquines en la obra. Los fabricantes pueden entregar los adoquines sobre tarimas, atados o empaquetados.

Las entregas diarias, a su vez se deben planificar de tal manera, que el camión del fabricante se acerque lo más posible al frente del lugar de la colocación, permitiendo con ello que se reduzca la distancia de movimiento, tanto de los adoquines como del equipo de construcción.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

La transportación de los adoquines en la obra, las tarimas hasta el frente del lugar de la colocación, puede representar más del 40% del tiempo de trabajo del equipo de colocación y, con frecuencia, es el factor principal para controlar el rendimiento de un hombre en un día

Ajuste perfecto en los bordes. No es necesario hacer el corte de los adoquines para que ajusten en los bordes, hasta que no se haya cubierto una área extensa, pero es preciso que los adoquines cortados sean colocados antes de que se efectúe el vibrado.

El vibrado es un trabajo en el cual no se invierte mucho tiempo; por lo general, sólo se requiere pasar dos o tres veces una placa de acero, para fijar completamente los adoquines. El vibrador debe mantenerse alejado de los lados que no tienen apoyo y de los extremos en las áreas cubiertas, de manera que los adoquines no se despiacen en estas áreas

Si después del vibrado inicial, se pasara el vibrador dos o tres veces más, durante las cuales se cepilla la arena que está sobre los adoquines para llenar las juntas. Una vez hecho esto, será posible abrir el camino al tránsito.

PRODUCTIVIDAD

Para alcanzar el índice máximo de productividad, se requiere de una buena planificación y de una amplia cooperación entre los miembros del equipo de trabajo. Para la pavimentación de caminos, se obtiene una productividad de 25 a 50 m²/hombre/día. Por lo general, el equipo estará formado por tres hombres, salvo en el caso de que el enrase sea complejo. En áreas extensas de pavimentación sencilla, se ha logrado una productividad que rebasa los 50m²/hombre/día, de donde se deduce que el frente amplio del lugar de la colocación, presenta grandes ventajas.

REINSTALACION DEL ADOQUINADO

La principal ventaja de los adoquines de concreto, comparados con otros materiales modernos usados en la pavimentación, consiste en que se pueden recuperar para volverse a usar en áreas donde hayan ocurrido hundimientos locales, que son el resultado de zanjas reellenadas en forma inadecuada, o por otras causas, también las áreas manchadas con mortero o con aceite derramado pueden cambiarse con facilidad, y una vez hecha la reinstalación, las reparaciones serán prácticamente invisibles. Incluso es posible reemplazar los adoquines en forma individual.

Las juntas entre los adoquines, después de estar colocados algún tiempo, quedan sellados, lo que dificulta la remoción de los adoquines; por esta razón, no pueden extraerse los adoquines con herramientas manuales. Será preciso romper algunos de ellos, para permitir que los adoquines adyacentes se levanten y se recuperen para ser utilizados de nuevo en la reinstalación misma.

Uno de los métodos usados para levantar adoquines, consiste en utilizar un zapapico que se clava hasta la plantilla.

A menos que se limpien perfectamente los adoquines, no será posible volverlos a usar

Después de levantar los adoquines, la arena de la plantilla se puede iraspalear y, en caso necesario, se almacena la arena para volver a usarla. Es obvio que en esta operación se perderá parte de la arena, por lo cual se necesitará agregar más.

REQUISITOS

Los adoquines de concreto usados en la construcción de caminos, deben ser de buena calidad para resistir el daño originado por el tránsito y por las variaciones en la temperatura: el efecto nocivo de las heladas sobre cualquier superficie pavimentada, aumenta considerablemente con el uso de sales descongelantes.

El concreto de buena calidad para pavimentaciones, debe obtener una resistencia característica a los 28 días, obtenida en un cubo de prueba de 300 kg/cm² y con un contenido aproximado de 4.5% de aire retenido, que lo hace resistente a los efectos nocivos de las sales descongelantes. Pero el concreto utilizado para adoquines de pavimentación debe tener, a fin de asegurar su durabilidad, un contenido alto de cemento, ya que los adoquines se fabrican en prensas vibradoras, a partir del concreto demasiado seco, para poder retener el aire.

Para asegurarse de que la superficie no se desgaste, sino que conserve una microtextura que le proporcione una resistencia aceptable a los deslizamientos a baja velocidad, no deberán usarse arenas que contengan más de 25% de materiales solubles en ácidos.

Por otra parte, para asegurar el cuatrpeo entre los adoquines, éstos deben fabricarse con medidas exactas, lo que permite colocarlos con espacio sumamente pequeños entre las propias juntas. Para la mayoría de los caminos residenciales, se recomienda un espesor de 8 cms., pero para los callejones e pueden emplear espesores de 6 a 6.5 cms.

La resistencia característica de los adoquines, una vez entregados y aprobados, no deberá ser menor de 550 kg/cms².

ADOQUINES DE CONCRETO PARA TRANSITO PESADO

Los adoquines de concreto proporcionan una superficie idónea para muchas formas de pavimentación, donde los vehículos transitan a bajas velocidades (entre 50 y 60 km./h), incluyendo varios tipos de caminos, patios de carga, áreas de almacenamiento, pavimentos para muelles y terminales de carga, descarga y de empaque

Los pavimentos industriales a menudo son sometidos a esfuerzos considerables en su superficie, debido a los gatos de camiones de remolque, a las ruedas compactas de poco diámetro, a los soportes pesados de depósitos, o a los materiales almacenados (por ejemplo, elementos de hierro fundido). Estos esfuerzos pueden causar, aún en los mejores materiales viscosos y elásticos para superficie, serias deformaciones, grietas o perforaciones provocadas por un esfuerzo cortante.

Cualquier pavimento debe diseñarse de tal manera, que resista una deformación excesiva o una falla estructural, que son resultado de la acumulación de los efectos nocivos producidos por los vehículos que transitan por él. La influencia destructora de un vehículo depende principalmente de las cargas axiales. La mayoría de los pavimentos soportan tránsito pesado y ligero por lo que la primera etapa de cualquier diseño, consiste en calcular la cantidad total de las distintas cargas axiales, que el pavimento debe resistir durante su diseño planeado.

Una vez que se conoce el total de las cargas axiales individuales, éstas pueden ser convertidas a un número equivalente de ejes estándar, y después ser integradas

SUBRASANTE

La subrasante puede estar constituida por el terreno natural, o por un material de terraplén. Su valor de soporte tendrá una influencia decisiva en el diseño y en comportamiento del pavimento.

Pero, debido a que los valores de soporte del suelo se ven afectados por la humedad, tendremos dos valores para cada tipo de suelo: si el manto freático es de 60 cms o menos bajo el nivel de la terracería, se debe adoptar el valor más bajo, para fines de diseño.

SUBBASE

El valor de soporte de algunos tipos de suelos es afectado en forma desfavorable por la congelación. Por otra parte, para la mayoría de los caminos donde se emplee este tipo de materiales, que la profundidad total de la construcción sobre el nivel de la terracería no sea menor de 45 cms.

Los adoquines de concreto y la plantilla de arena, tienen una capacidad para distribuir carga, similar a la del asfalto de 16 cms compactado.

BASE

Para las bases que se encuentran abajo de las superficies de adoquines de concreto, se aconseja el uso de material cohesivo.

Por otra parte, por razones exclusivamente prácticas, las bases combinadas con cemento, no deberán tener un espesor menor de 10 cms., y los materiales bituminosos no deberán tener un espesor menor de 7.5 cms.

PLANTILLA

Esta es una capa compacta con un espesor de 5 cms de arena fina y limpia la cual no contiene más de 3% de sedimentos y de arcilla, ni más de 10%, por peso retenido en una malla de 5 mm. Dicha capa se compacta después de que se han colado los adoquines, aplicándoles a éstos una determinada cantidad de vibrado, con un vibrador de placa, el cual provoca que una parte de la arena penetre en las juntas de los adoquines y los una parcialmente.

DRENAJE

En el pavimento con adoquines de concreto, se necesitan instalaciones de drenaje para el agua de la superficie, así como la formación de pendientes. Es posible que una pequeña cantidad del agua de la superficie pueda penetrar en las juntas de los adoquines recién colocados.

Con objeto de prevenir la formación de charcos, las pendientes transversales a los canales de drenaje, no deberán ser menores a la proporción 1:40. Si es necesario, las pendientes longitudinales al canal de drenaje, pueden reducirse a la proporción 1:180, usando para ello canales de concreto prefabricado, los adoquines deberán colocarse a un nivel ligeramente más alto (aproximadamente de 0.3 cms) en relación a los canales de drenaje y a las alcantarillas.

CONSTRUCCION

SUBBASE

La superficie de la subbase, debe tener una tolerancia de ± 1 cm a 3 cm del nivel de diseño. Por otra parte, donde el revestimiento de adoquines esté colocado directamente sobre una subbase, es preferible permitir una tolerancia de ± 2 cm, a fin de reducir la posibilidad de que se presenten profundidades excesivas en la plantilla de arena.

BASE

En el caso de los revestimientos de adoquines de concreto, una tolerancia de ± 2 cm, será satisfactoria; sin embargo si se logran mayores tolerancias, éstas serán de utilidad en la construcción, y así mejorarán la uniformidad del revestimiento final.

GUARNICION

Todos los bordes de un adoquinado de concreto necesitan de una guarnición, para evitar que los adoquines se desplacen fuera de su lugar, que las juntas se abran y que la unión entre éstas se pierda. Ahora bien, en áreas donde el pavimento de adoquines de concreto, se encuentre en servicio, antes de que la colocación de éstos se haya efectuado por completo, se deben tomar medidas para impedir que los vehículos pasen a una distancia menor de 1 m., de una orilla sin guarnición. Si desafortunadamente algunos adoquines, que están al borde y sin protección, se desplazan, será necesario retirarlos y colocar de nuevo la plantilla, antes de continuar el procedimiento.

PLANTILLA

Un espesor aproximadamente de 1.5 cm es útil para que se forme una profundidad compacta requerida de 5 cm. El valor real de la compactación depende de la granulometría y del contenido de humedad de la arena, por lo que quizá sea necesario determinarlo a través de experimentos. El mantener constantes el contenido de humedad y la granulometría de la arena, ayudará a obtener una superficie regular en el trabajo terminado.

ADOQUINADO

Los adoquines de concreto que forman el pavimento, son piezas rectangulares o pueden presentar otra forma, lo suficientemente pequeñas como para que puedan ser alzadas y se colocadas con una mano.

El espesor mínimo para adoquines utilizados, tanto en la pavimentación de cualquier camino, por el que transiten vehículos pesados, como en la pavimentación industrial, deberá ser de 8 cm no existen pruebas de que el uso de adoquines con mayor espesor, mejore la capacidad de distribución de carga, pero podría haber menor riesgo de giro en los adoquines, si éstos se encuentran sometidos a un tránsito muy intenso, lo cual puede ser la razón de su adopción en algunos pavimentos industriales, en otros países.

El adoquinado consta de adoquines de concreto, colocados uno junto al otro y unidos por juntas llenas de arena. En grandes áreas abiertas es posible obtener muchas ventajas, al contar con más de una persona que coloque los adoquines, debido al tamaño de la superficie que deberá ser pavimentada, pero siempre hay que tener en cuenta que se debe planificar la orientación correcta de los adoquines.

En todas las áreas transitadas por vehículos, los adoquines rectangulares deben colocarse con un modelo de petatillo, a fin de que se produzca una unión contra los empujes horizontales, originados por el tránsito.

Es necesario con frecuencia cortar los adoquines Colocados hasta la guarnición en los canales de drenaje, o alrededor de las rejillas de registro o de las alcantarillas de drenaje. Es fácil hacer esto con una cortadora hidráulica, y también se pueden emplear un cincel ancho y un martillo. Los huecos pequeños que aún queden, pueden llenarse con arena, pero donde los adoquines formen un canal de drenaje contra un reborde sobresaliente, es preferible utilizar una proporción de 4 tantos de arena por uno de mortero cemento.

Con un vibrador de placa se vibran los adoquines y se compacta la plantilla con objeto de producir una superficie plana. Para lograr lo anterior, son suficientes, normalmente, dos o tres aplicaciones con el vibrador de placa, sin que sea crítico el momento en que éstas se efectúan, aunque se recomienda llevarse a cabo cuando haya terminado un área razonable de pavimento, y antes de terminar la jornada de trabajo

El vibrador de placa deberá tener una cara de acero con una área plana de 0.35 a 0.5 m², cuando el vibrador opera con una frecuencia que varía de 75 a 100. Al vibrado inicial siguen otras etapas en las cuales se emplea el vibrador de placa, en las que se cepilla la arena que está sobre los adoquines, para rellenar las juntas. Tal vez sea necesario repetir esta operación algunos días después, pero mientras tanto, el pavimento puede ser sometido a la circulación de vehículos.

V.3 AVANCES TECNOLÓGICOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

Otra alternativa que se ha aplicado con éxito en la construcción de pavimentos en varios países como Australia, Canadá, Estados Unidos, España entre otros, es el concreto compactado con rodillos (CCR).

El concreto compactado con rodillos, se puede definir como una tecnología constructiva que utiliza una mezcla de concreto con revenimiento cero, bajo contenido de cemento (de 80 a 100 kg. por m³), relación agua/ cemento muy baja, buena graduación de agregados con un tamaño máximo del orden de 3", que generalmente se mezcla en plantas de proceso continuo y se transporta y coloca usando equipos para movimientos de tierras, en capas del orden de 15 cm y sometiendo cada capa a compactación con equipo vibratorio.

El CCR es un material que esta teniendo gran aceptación, sobre todo en pavimentación, debido a las pesadas cargas que es capaz de soportar y su bajo costo. Desde 1876 existen registros del uso de CCR y de su comportamiento adecuado.

La ventaja mas obvia de emplear pavimentos de CCR es su bajo costo, el cual se logra sobre todo mediante el empleo de equipo de menor costo y de menos trabajadores que en el caso de pavimentos de concreto convencional.

Lo mas interesante es la comparación que se muestra en la siguiente tabla, entre los costos de pavimentos equivalentes: de asfalto, concreto convencional, suelo cemento y CCR, resultando este ultimo el mas económico y señalando la ventaja de que el pavimento se puede usar inmediatamente después de terminada la compactación.

TABLA No. 25 COSTOS DURANTE LA VIDA ÚTIL DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN. COSTO BÁSICO UNITARIO (DLS. US/M².)

ALTERNATIVA	COSTO INICIAL	COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO ESTIMADO	COSTO ESTIMADO A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL (1)
CONCRETO ASFALTICO, MEZCLA CALIENTE 30 CMS. DE ESPESOR	17.92	1.97	40.53
CONCRETO HIDRÁULICA CONVENCIONAL 25 CMS. DE ESPESOR	29.86	0.15	31.57
CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS 30 CMS. DE ESPESOR	19.11	0.19	21.31
SUELO CEMENTO 30 CM. DE ESPESOR	9.56	2.09 (2)	33.53

(1) Suponiendo vida útil de 20 año, intereses de 6% anual e inflación del 5% anual.

(2) Sustitución de toda la capa a los cinco años, más bacheo

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

Aunque la expresión concreto compactado con rodillos es de origen reciente (de principio de los setentas), mezclas similares de cemento, agregado y agua se han utilizado durante mucho tiempo. Estas mezclas se han denominado base tratada con cemento, mezcla de agregado-cemento o suelo cemento. Sin embargo estas, usualmente presentan una resistencia a la compresión mas baja a los 28 días, menor de 1000 lb/pulg². El CCR al usarse en pavimentos puede diseñarse para alcanzar a los 28 días resistencias a la compresión similares a las del concreto convencional

A la fecha se han realizado diversos trabajos sobre el diseño y construcción de pavimentos de CCR, tanto en sus aplicaciones del tipo industrial como en caminos, que han dado como resultado los siguientes puntos:

- 1.- Se señala la formación natural de fisuras con espaciamentos de entre 15 y 20 mts. generalmente.
- 2.- La necesidad de una compactación adecuada mediante equipo pesado y capas suficientemente delgadas (de 15 a 25 cm.) Pudiendo utilizar combinaciones de equipo de compactación estático, vibratorio y neumático o únicamente equipo vibratorio con pesos desde menos de 10 ton. Hasta más de 14 ton.
- 3.- Debido a la baja relación agua cemento y la alta densidad, el CCR tiene una permeabilidad muy reducida que lo hace ideal para condiciones de congelación o descongelación en carreteras ubicadas en climas extremos.
- 4.- Recomienda en todos los casos la construcción de tramos de prueba para afirmar las mezclas propuestas por el laboratorio y verificar algunos puntos importantes tales como.
 - a) Eficiencia del equipo de mezclado, así como uniformidad de la mezcla y tiempo de mezclado.
 - b).- Rendimiento de la mezcla de concreto.
 - c).- Segregación del material durante el transporte.
 - d).- Contenido de humedad del CCR así como pérdida de humedad por temperatura ambiental.
 - e) - Espesores abundados y compactados.
 - f).- Número de pasadas del equipo para lograr el porcentaje de compactación.
 - g).- Los agregados para la fabricación del CCR deberán tener las siguientes características:

- Tamaño máximo de agregado	3/4"
- % que pasa la malia #4	56
- Relación de agua/puzolana	0.39

DISEÑO DE ESPESORES DE PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLOS.

El concreto compactado con rodillos es capaz de proporcionar un concreto de relativa alta resistencia en el lugar y su comportamiento ingenieril es similar al del concreto convencional. El concreto compacto se está utilizando como material de pavimentación en instalaciones fuera de carretera tales como puertos de contenedores, patios de maniobras, grandes patios de distribución, áreas de estacionamiento de camiones y plataformas para tanques.

La técnica de diseño utilizada para pavimentos de CCR es similar al procedimiento utilizado por la Asociación de Cemento Portland (PCA) para el diseño de pavimentos de concreto en aeropuertos y en zonas industriales.

El procedimiento propuesto requiere el cálculo del esfuerzo admisible en el pavimento basado en el número de aplicaciones totales de carga y del esfuerzo esperado en el pavimento debido a la carga por rueda de diseño. Se selecciona un espesor de diseño tal que el esfuerzo esperado sea menor que el admisible. El procedimiento propuesto es también aplicable para cargas de tránsito mezclado.

Para resumir la experiencia adquirida en la construcción de pavimentos con CCR, se señalan los puntos siguientes:

- 1 - El CCR generalmente se mezcla en un aparato de doble cañón.
- 2 - El contenido de cemento utilizado ha variado de 300 a 600 lb/yd³. En algunos proyectos, se utilizó ceniza volante en proporción de 15 a 20% en peso, respecto a los materiales cementantes.
- 3 - El CCR usualmente se coloca mediante una máquina extendidora de mezclas asfálticas. El espesor compacto máximo que puede colocarse mediante las extendedoras usuales es del orden de 9" a 10". Sin embargo, estas máquinas pueden modificarse para ser un espesor compacto de hasta 12".
- 4 - El CCR se compacta utilizando rodillos vibratorios de 10 a 12 ton para obtener la densidad especificada.
- 5.- En los pavimentos con CCR no se dejan juntas de contratación de preferencia, se permite que las grietas por contratación ocurran en forma espontánea. El espaciado de este tipo de grietas es del orden de 50 a 60 pies.
- 6.- Los pavimentos construidos con CCR exhiben un comportamiento excelente bajo cargas de vehículo muy pesados.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

Aunque el CCR se ha utilizado para pavimentación por muchos años no se ha realizado ningún estudio detallado para investigar sus propiedades ingenieriles y para establecer un procedimiento de diseño de espesor. Recientemente la Asociación de Cemento Portland (PCA) patrocinó un estudio para desarrollar datos ingenieriles y procedimientos para diseñar los pavimentos con CCR. Dicho estudio comprende lo siguiente:

- 1 - Evaluación de las propiedades ingenieriles de CCR

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

- 2 - Evaluación de los procedimientos para proporcionar la mezcla
- 3 - Evaluación de la durabilidad del CCR
- 4.- Establecimiento de un procedimiento de diseño de espesor para pavimentos de CCR

El presente estudio contiene un procedimiento para diseño de espesor de pavimentos con CCR. La investigación sobre la durabilidad del CCR aún está en progreso

PROPIEDADES INGENIERILES DEL CCR

La evaluación efectuada por la PCA de las propiedades ingenieriles del CCR indica que su comportamiento es similar al del concreto convencional. Esta evaluación se basó en la prueba de especímenes obtenidos de una sección de prueba a escala natural y en la revisión de datos de prueba de varios proyectos de pavimentos de CCR. El concreto compactado rodillado puede fabricarse con 3 a 6 bolsas de cemento por yarda cúbica de CCR. Dependiendo del contenido de cemento, la resistencia a la compresión a los 28 días del CCR puede variar desde 3500 hasta 5000 lb/pulg² y la resistencia a la flexión puede variar desde 500 hasta 700 lb/pulg².

COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DEL CCR

Como parte de la investigación de la PCA, se efectuaron pruebas para determinar las características de fatiga por flexión del CCR. Las pruebas de fatiga por flexión se realizaron en especímenes de viga obtenidos de una sección de prueba a escala natural.

En la tabla 26 se incluye información para la curva de fatiga para diseño

TABLA 26.- RELACIÓN DE ESFUERZO Y REPETICIONES DE CARGA ADMISIBLE PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CCR.

Relación de Esfuerzo	Repeticiones Admisibles	Relación de Esfuerzo	Repeticiones Admisibles
0.40	600,000	0.56	9,700
0.41	465,000	0.57	7,500
0.42	360,000	0.58	5,800
0.43	280,000	0.59	4,500
0.44	210,000	0.60	3,500
0.45	165,000	0.61	2,700
0.46	130,000	0.62	2,100
0.47	100,000	0.63	1,600
0.48	78,000	0.64	1,200
0.49	59,000	0.65	950
0.50	46,000	0.66	740
0.51	35,000	0.67	570
0.52	27,000	0.68	440
0.53	21,000	0.69	340
0.54	16,000	0.70	260
0.55	12,000		

NOTAS

(1) La relación de esfuerzo es el esfuerzo en el pavimento debido a la carga por rueda dividido entre la resistencia a la flexión del CCR

(2) Ecuación de fatiga de diseño para CCR.

$$\text{Log } (N) = 10.258 - 11.198 (\text{SR})$$

donde: N= repeticiones de carga admisibles

SR= relación de esfuerzo

DISEÑO DE ESPESOR DE PAVIMENTOS CCR

Aunque los pavimentos de CCR se han utilizado principalmente para instalaciones fuera de carretera, también pueden utilizarse en zonas de circulación de vehículos en áreas industriales y en áreas de estacionamiento de camiones. Como se mencionó antes en este informe, el comportamiento ingenieril del CCR puede considerarse que es similar al del concreto convencional, a niveles de resistencia iguales. Si se diseña y construye apropiadamente, el CCR puede proporcionar resistencias a la compresión y a la flexión comparables a las que generalmente se especifican para el concreto convencional

REQUERIMIENTO DE DISEÑO

En virtud de que las propiedades ingenieriles del CCR son muy similares a las del concreto convencional, pueden aplicarse directamente los procedimientos de diseño del espesor utilizados para pavimentos de concreto, al diseño de pavimentos de CCR. Los parámetros principales que efectúan el diseño del espesor de parámetros de concreto son la resistencia a la flexión y el comportamiento a la fatiga del concreto. La relación de fatiga para diseño del CCR que se presentó antes se considera aplicable al diseño de espesor de pavimentos de CCR.

Para instalaciones en las que se utilizan pavimentos de CCR, se considera que la carga crítica se localiza en el interior de pavimento. La colocación de la carga en el interior se basa en siguiente razonamiento:

- 1.- El espaciamiento transversal de las grietas de contracción para pavimentos de CCR generalmente es del orden de 50 a 60 pies, con ligero agrietamiento intermedio
- 2.- El tránsito en las instalaciones fuera de carretera, en las calles industriales y en los patios de maniobras se realiza a relativamente bajas velocidades y generalmente es bidireccional. De esta manera, los problemas de fallas y bombeo en juntas se minimizan o simplemente no existen
- 3 - Las inspecciones de campo de las instalaciones en las que se han colocado pavimentos de CCR indican que no existen problemas asociados con las grietas de contracción

El procedimiento de diseño que se propone para pavimentos de CCR es similar al que utiliza la PCA para el diseño de pavimentos de concreto en aeropuertos y en áreas altamente industriales.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

En las instalaciones con pavimento de CCR pueden encontrarse varios tipos de vehículos. Estos vehículos incluyen camiones levanta horcones de gran capacidad, aplicadores de troncos y camiones de carga pesada. Las cargas por rueda en estos vehículos pueden llegar a las 100,000 lb, excediendo por mucho las de los camiones que transitan en las carreteras.

Las cargas totales en estos vehículos son iguales y a veces mayores que las de las aeronaves comerciales más pesadas.

Para el diseño de pavimentos de CCR se han preparado gráficas para facilitar el cálculo del espesor requerido. Estas gráficas fueron preparadas utilizando la extensión de Pickett del análisis de Westergaard para cargas en el interior de una losa soportada por una subrasante líquida densa. La extensión de Pickett del análisis de Westergaard puede resolverse mediante computadora utilizando computadoras personales compatibles IBM. Las gráficas de diseño presentadas para carga de rueda sencilla y para carga de rueda doble requieren la información siguiente:

- 1.- Resistencia de apoyo de la subrasante
- 2 - Características del vehículo
 - Cargas por rueda
 - Configuración de ruedas
 - Características de los neumáticos
- 3 - Resistencia a la flexión del CCR
- 4.- Módulo de elasticidad del CCR

Apoyo de la subrasante

El apoyo proporcionado al pavimento de CCR por la subrasante y por la subbase, si se utiliza, es un elemento primordial en el diseño del espesor. El apoyo de la subrasante y de la subbase se expresa en términos del módulo de reacción de la subrasante de Westergaard (K). El incremento aproximado de K puede obtenerse de la tabla No 27.

TABLA 27.- EFECTO DEL ESPESOR DE LA SUBBASE EN LOS VALORES DE K
Valor K de la subbase, lb/in³

a) Subbase granular

Valor K de la subrasante, lb/in ³	4 puig.	6 puig.	8 puig.	12 puig.
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

b) Subbase estabilizada

Valor K de la subrasante, lb/in ³	4 puig.	6 puig.	8 puig.
50	170	230	310
100	280	400	520
200	470	640	830

Cargas de los vehículos

Para el diseño del pavimento es importante estimar el tránsito esperado. La información requerida del tránsito incluye la magnitud de las cargas por rueda, la configuración de las ruedas y la frecuencia de las operaciones de los vehículos más pesados que harán uso del pavimento. Deberá hacerse acopio de la mayor cantidad de datos posible sobre los tipos de vehículos que transitarán por el pavimento, recurriendo a los departamentos de planeación y operación y al fabricante

Usualmente el vehículo que presente la carga por rueda más pesada controlará el diseño, pero éste deberá revisarse para ver si es suficiente respecto a otras cargas que sean casi tan pesadas y que actúen con frecuencia en el pavimento

La máxima carga por rueda es la mitad de la carga por eje más pesado cuando el vehículo se encuentra cargado a su máxima capacidad. Normalmente esta información puede obtenerse del fabricante del vehículo

El área de contacto de la carga que se utiliza en las gráficas es el área de contacto de cada rueda que lleva la máxima carga con la losa. Puede estimarse dividiendo la carga por rueda entre la presión de inflado. El área de contacto a utilizar algunas veces se refiere al área de contacto burda, es decir, el área total comprendida por la envolvente de contacto, independientemente del dibujo de la llanta.

La distancia entre ruedas del vehículo puede ser un factor de diseño importante. Si las ruedas se encuentran cerca una de otra (más cerca que el triple del radio de rigidez relativa) es necesario considerar el efecto de más de una rueda en el cálculo del esfuerzo en el pavimento. A este respecto, la configuración de las ruedas de casi todos los vehículos pesados en terminales y en áreas de almacenamiento industrial se clasifican en cualquiera de las dos formas siguientes: una carga de rueda sencilla (o sea una rueda sencilla a cada lado de un eje) y una carga de rueda doble (o sea doble rueda a cada lado de un eje: en este caso dos ruedas están ubicadas lo suficientemente cerca como para que se considere su efecto combinando en el esfuerzo en el pavimento). Una carga sobre rueda doble induce menos esfuerzos en el pavimento que la misma carga actuando sobre una rueda sencilla. Por esta razón se incluyen gráficas de diseño separadas para cargas en rueda sencilla y doble

Esfuerzo Admisible en el Pavimento

El procedimiento de diseño de pavimentos de CCR requiere la determinación del esfuerzo admisible en el pavimento y del esfuerzo esperado debido a las cargas de las ruedas. Se selecciona un espesor de diseño de manera que el esfuerzo esperado sea menor que el esfuerzo admisible.

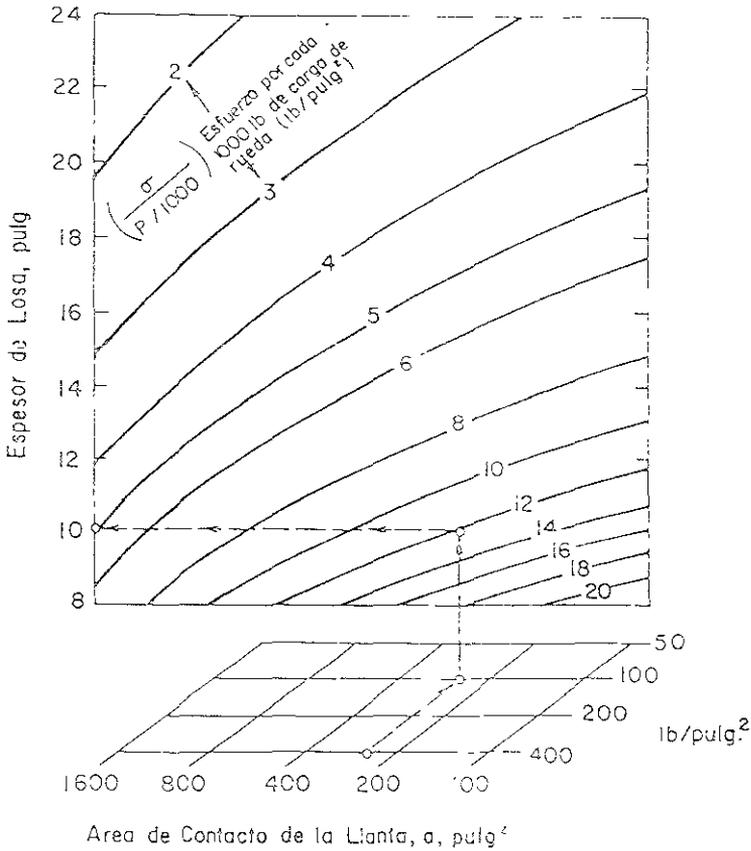
El esfuerzo admisible depende del número de repeticiones de carga de las cargas de rueda de diseño anticipadas durante el periodo de diseño. Conociendo el número de repeticiones de carga durante el periodo de diseño, se obtiene la relación de esfuerzo admisible, SR, de la Tabla 26. Entonces el esfuerzo admisible en el pavimento se calcula como sigue:

Esfuerzo admisible = Relación de esfuerzo x Resistencia del CCR a la flexión

A continuación se expone la determinación del espesor de diseño debido a cargas sencillas y dobles

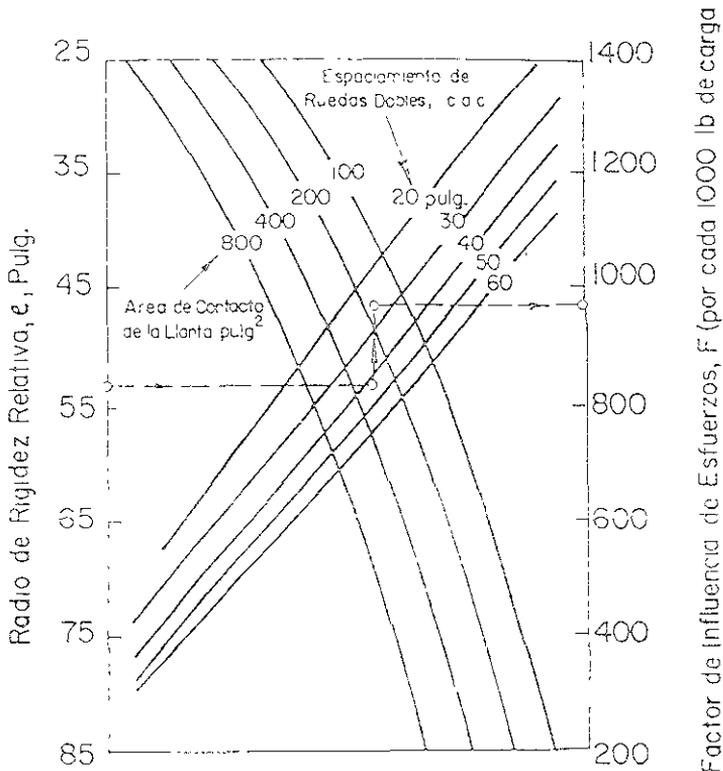
Gráficas para determinar el espesor de pavimento

La gráfica No 13 sirve para calcular el esfuerzo debido a carga de rueda sencilla y la gráfica No. 14 es para calcular el esfuerzo debido a cargas de rueda doble.



GRAFICA No. 13 DISEÑO PARA CARGA DE RUEDA SENCILLA

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"



$$\sigma = \frac{P/1000}{h^2} \times F \text{ lb/pulg.}^2$$

P = Carga de Rueda Doble, lb

h = Espesor de Losa, Pulg.

(Sequencia e haca crea haca espaciamento haca F)

GRAFICA No. 14 DISEÑO PARA RUEDAS DOBLES

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS"

Para ilustrar el uso de las gráficas de diseño, se presentan algunos ejemplos. La gráfica de diseño para cargas de rueda doble requiere un valor para el radio de rigidez relativa

El valor se obtiene como sigue.

$$\rho = \left[\frac{Eh^3}{12(1-u^2)k} \right]^{0.25}$$

donde:

- E = Módulo de elasticidad del CCR, lb/pulg²
- h = Espesor de pavimento de CCR, pulg.
- u = Relación de Poisson del CCR, usualmente se supone de 0.15
- K = Módulo de reacción de la subrasante, lb/pulg³

Los valores de ρ se proporcionan en la Tabla No. 28.

Ejemplo de diseño 1 (Rueda sencilla)

Transportador pesado

Número de ruedas = 4

Máxima carga por rueda sencilla = 26,000 lb

Presión de inflado de las llantas = 100 lb/pulg².

Area de contacto de la llanta = 260 pulg².

Resistencia a la flexión del CCR = $f_r = 700$ lb/pulg².

Resistencia de la subrasante, $K = 100$ lg/pulg³.

Número diario de aplicaciones de carga de rueda canalizadas (diseño) = 20

Número de aplicaciones de carga de rueda durante un período de diseño de 20 años = 146 000.

Relación de esfuerzo de diseño (Tabla 26), SR = 0.45

Esfuerzo admisible $\sigma = f_s \times SR = 700 \times 0.45 = 315$ lb/pulg².

Esfuerzo admisible por cada 1000 lb de carga = $\frac{\sigma}{P/1000} = \frac{315}{26}$

= 12.1 lb/pulg²/1000 lb

Entre a la gráfica de diseño para ruedas sencillas en la parte inferior con un área de contacto de 260 pulg² y un valor de K de 100 lb/pulg³. Para un esfuerzo admisible de 12 1 lb/pulg²/1000 lb se requiere un espesor de losa de 10.1 pulg. (úsense 10 pulg)

El uso de la gráfica se indica mediante la línea punteada de flechas.

Ejemplo de diseño 2 (Ruedas dobles)

Grúa móvil (capacidad de carga 40 ton)

Número de ruedas = 8 (4 dobles)

Carga máxima de rueda doble = 90 000 lb

Espaciamiento entre ruedas dobles = 26 pulg (centro a centro).

Presión de inflado de las llantas = 160 lb/pulg².

Área de contacto de cada llanta = $90\,000/2/160 = 281$ pulg².

Resistencia a la flexión del CCR, $f_r = 700$ lb/pulg².

Resistencia de la subrasante - subbase, $K = 200$ lb/pulg³.

Número diario de aplicaciones de carga de rueda doble canalizadas = 40

Número de aplicaciones de carga en un periodo de diseño de 20 años = 292,000.

Relación de esfuerzo de diseño (Tabla 26), $SR = 0.43$

Esfuerzo admisible $\sigma = f_s \times SR = 700 \times 0.43 = 301$ lb/pulg².

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

TABLA 28 VALORES DE ρ , RADIC DE RIGIDES RELATIVA * EN PULGADAS

h en pulg	K= 50	K= 100	K= 150	K= 200	K= 250	K= 300	K= 350	K= 400	K=500
6	34.84	29.30	26.47	24.63	23.30	22.26	21.42	20.72	19.59
6.5	36.99	31.11	28.11	26.16	24.74	23.64	22.74	22.00	20.80
7	39.11	32.89	29.72	27.65	26.15	24.99	24.04	23.25	21.99
7.5	41.19	34.63	31.29	29.12	27.54	26.32	25.32	24.49	23.16
8	43.23	36.35	32.85	30.57	28.91	27.63	26.58	25.70	24.31
8.5	45.24	38.04	34.37	31.99	30.25	28.91	27.81	26.90	25.44
9	47.22	39.71	35.88	33.39	31.58	30.17	29.03	28.08	26.55
9.5	49.17	41.35	37.36	34.77	32.89	31.42	30.23	29.24	27.65
10	51.10	42.97	38.83	36.14	34.17	32.65	31.42	30.39	29.74
10.5	53.10	44.57	40.28	37.48	35.45	33.87	32.59	31.52	29.81
11	54.89	46.16	41.71	38.81	36.71	35.07	33.75	32.64	30.87
11.5	56.75	47.72	43.12	40.13	37.95	36.26	34.89	33.74	31.91
12	58.59	49.27	44.52	41.43	39.18	37.44	36.02	34.84	32.95
12.5	60.41	50.80	45.90	42.72	40.40	38.60	37.14	35.92	33.97
13	62.22	52.32	47.27	43.99	41.61	39.75	38.25	36.99	34.99
13.5	64.00	53.82	48.63	45.26	42.80	40.89	39.35	38.06	35.99
14	65.77	55.31	49.98	46.51	43.98	42.02	40.44	39.11	36.99
14.5	67.53	56.78	51.31	47.75	45.16	43.15	41.51	40.15	37.97
15	69.27	58.25	52.63	48.98	46.32	44.26	42.58	41.19	38.95
15.5	70.99	59.70	53.94	50.20	47.47	45.36	43.64	42.21	39.92
16	72.70	61.13	55.24	51.41	48.62	46.45	44.70	43.23	40.88
16.5	74.40	62.56	56.53	52.61	49.75	47.54	45.74	44.24	41.84
17	76.08	63.98	57.81	53.80	50.88	48.61	46.77	45.24	42.78
17.5	77.75	65.38	59.48	54.98	52.00	49.68	47.80	46.23	43.72
18	79.41	66.78	60.35	56.16	53.11	50.74	48.82	47.22	44.66
19	82.70	69.54	62.84	58.48	55.31	52.84	50.84	49.17	46.51
20	85.95	72.27	65.30	60.77	57.47	54.92	52.84	51.10	48.33
21	89.15	74.97	67.74	63.04	59.62	56.96	54.81	53.01	50.13
22	92.31	77.63	70.14	65.28	61.73	58.98	56.75	54.89	51.91
23	95.44	80.63	72.52	67.49	63.83	60.98	58.68	56.75	53.67
24	98.54	82.86	74.87	69.68	65.90	62.96	60.58	58.59	55.41

* para $E = 4,000,000 \text{ lb/pulg}^2$, $\mu = 0.15$

$$\rho = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)K}}$$

- 1- El primer paso en el uso de la gráfica de diseño para ruedas dobles es suponer abiertamente un espesor de losa, digamos 15 pulg.
- 2.- Haciendo uso de la Tabla 28 se determina para dicho espesor y para un valor de K de 200 lb/pulg³ un valor ρ de 49.0

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

3.- A partir del valor de p determinado en la gráfica de diseño No. 14, diríjase a la derecha para intersectar el área de contacto de la llanta, entonces desplácese verticalmente para interceptarse con el espaciamento de ruedas dobles. De este punto muévase a la derecha para leer un valor de F (factor de influencia de esfuerzo por cada 1000 lb de carga de rueda doble) de 930.

4 - Calcule el esfuerzo debido a la carga como.

$$\text{Esfuerzo,} = \frac{\text{carga de rueda doble}}{1000} \cdot \frac{1}{(\text{Espesor de la losa})^2}$$

$$= \frac{90\,000}{1000} \cdot \frac{1}{(15)^2} \cdot 930 = 372 \text{ lb/pulg}^2$$

5.- Se repite el proceso determinando esfuerzos para otros espesores de losa supuestos y se tabulan los datos como sigue:

Espesor de losa supuesto pulg	Valor de p , pulg. de la tabla	F (de la gráfica de diseño)	Esfuerzo debido a la carga lb/pulg.
15	49.0	930	372
16	51.4	955	336
17	53.3	970	302

6.- Seleccione un espesor de losa de diseño para el cual el esfuerzo debido a la carga sea igual o menor que el esfuerzo admisible. En este ejemplo para un esfuerzo admisible de 301 lb/pulg. el espesor de diseño es 17 pulg.

Procedimiento de Diseño para Tránsito Mixto

El procedimiento de diseño presentado es aplicable cuando puede identificarse como carga de rueda de diseño un tipo sencillo de carga de rueda. Cuando existe tránsito mixto, entonces es necesario calcular el daño de fatiga acumulado debido al tránsito mixto. Esta técnica requiere los siguientes pasos:

- 1.- Seleccione el espesor del pavimento
- 2.- Calcule el esfuerzo en el pavimento, σ , utilizando la gráfica 13 o 14 para cada tipo de carga de rueda.
- 3 - Calcule la relación de esfuerzo, SR , para cada tipo de carga de rueda.
- 4 - Determine el número de repeticiones de carga admisible, N_a , para cada tipo de carga de rueda utilizando la Tabla 26.
- 5.- Determine el consumo de fatiga para cada tipo de carga de rueda como sigue:

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

$$F_n = \frac{N_e, n}{N_a, n}$$

donde: F_n = consumo de fatiga para la carga de rueda n
 N_e, n = número esperado de repeticiones de carga de rueda n durante el período de diseño
 N_a, n = número admisible de repeticiones de carga por rueda n (ver paso 4)

- 6.- Adicione el consumo de fatiga para todas las cargas por rueda.
- 7.- Si el consumo de fatiga es mayor o menor del 100% repita los pasos 2 a 6 con un mayor o menor espesor de pavimento, según sea el caso. El espesor de diseño es aquel para el cual el consumo total de fatiga sea de 100% o menos.

NOTAS ADICIONALES

El concreto compactado con rodillos se coloca de una sola vez cuando el espesor del pavimento es del orden de 10 pulg o menos. Cuando el espesor del pavimento es mayor de 10 pulg, el concreto puede colocarse en 2 ó 3 etapas. El espesor mínimo en una etapa es del orden de 5 pulg. Cuando el pavimento se construye en varias etapas, debe presentarse mucha atención al intervalo de tiempo que transcurre entre la colocación de capas sucesivas. En clima cálido, dicho intervalo de tiempo no deberá exceder de 1 hora. En clima frío y si las condiciones del viento lo permiten, pueden dejarse pasar de 2 a 3 horas. El intervalo de tiempo es crítico para asegurar una liga adecuada en la interfase de capas sucesivas. Si existe una liga adecuada en las interfaces se desarrollará una resistencia al corte de cuando menos 200 lb/pulg². a los 90 días. Si no se desarrolla una resistencia al corte adecuada en la interfase entonces cada capa puede actuar independiente de las otras. Esta situación tiende a reducir la capacidad de carga del pavimento. El procedimiento de diseño de espesor presentado en este artículo supone que el pavimento de CCR trabaja monolíticamente, aún cuando el espesor total de la losa se constituya por etapas. El concreto compactado con rodillos es un material muy denso que es mezclado, colado y compactado en un estado relativamente seco.

CONCLUSIONES

Durante los últimos 20 años, la industria de la pavimentación con concreto ha progresado considerablemente en la construcción de carreteras. Sólo recientemente se ha podido observar, en un trabajo de pavimentación escrapas, conformadoras, tractores con pala frontal, subrasantes para dar forma al pavimento y cuadrillas enormes de personal.

A medida que avanzaba la industria de la pavimentación la automatización se convirtió en la palabra clave. La industria y su equipo no sólo crecieron físicamente, sino y lo que es más importante se convirtieron en una industria técnicamente sofisticada, y el número de personal para pavimentación se redujo; al aumentar la automatización de las niveladoras y cimbras deslizantes se hizo posible este adelanto.

En primer lugar, apareció la nivelación automatizada. Se fabricaron cortadoras muy versátiles que podían cortar un camino de menos de 7 metros de ancho equipadas con controles automáticos para alineamientos, pendientes y taludes y podían cargar materiales sobrantes en unidades de transporte y excavar de 5 a 10 cm. de material. Estas máquinas produjeron un cambio muy importante en la economía global en el mercado de la pavimentación urbana.

Al poco tiempo, aparecieron en la ciudad máquinas pavimentadoras equipadas con cimbras deslizantes que satisfacían una gran variedad de requisitos de pavimentación. La pavimentación con cimbras deslizantes de un callejón de 3 metros, así como una avenida de 11 metros con garnición es tan común ahora, como lo era una mezcladora hace 15 años.

El cambio también se manifestó en el productor de concreto; se perfeccionó el nuevo concreto de bajo revenimiento y hubo que actualizar las flotas de tractores para acopiar la descarga en las pavimentadoras.

En la actualidad la industria de la construcción de carreteras tiene la facilidad de usar cimbras deslizantes de 10 metros de ancho e instalar barras de unión y acero de refuerzo, al mismo tiempo. El principal factor que podría marcar límites es la cantidad de cemento y agregado que puede transportarse hasta la pavimentadora. Este mismo tipo de cimbras deslizantes puede usarse en los aeropuertos, incluso cuando los espesores varían de 38 a 61 cm., lo que hace gran diferencia con los 3 metros que sólo se podían pavimentar hace algunos años.

La barrera de tamaño medio, hecha con concreto fue un paso importante para una mayor seguridad en las carreteras. Inicialmente, el prefabricado o cimbrado en obra, eran procedimientos lentos y costosos. En la actualidad, los trabajos se realizan con cimbras deslizantes y se construyen miles de metros diarios incluso con la colocación de acero de refuerzo y lo largo de todo el camino.

La pavimentación a base de concreto en las grandes ciudades se maneja de manera semejante a la de los aeropuertos o carreteras.

Ya no es necesario tener un contacto por muchos kilómetros de pavimentación para que la empresa o contratista disfrute de los beneficios económicos de la pavimentación automática.

Los accesos de alcantarillas, las cajas de registro y las banquetas, que antes constituían un problema, ahora se solucionan sobre la marcha en forma fácil y rápida. La pavimentación manual es ahora más la excepción que la regla.

Los parques industriales también ofrecen muchos metros cuadrados potenciales de

pavimentación con concreto, lo cual podía hacerse con los mismos métodos y equipo que se utiliza en las carreteras y calles citadinas.

Recubrimientos y reciclado, la última innovación en el mercado de trabajo con cimbras deslizantes (y probablemente la que cuenta con mayor potencial y entusiasmo por parte de los usuarios) son los recubrimientos de concreto que, mediante la nueva tecnología con cimbra deslizante, se han llevado a cabo con éxito en aeropuertos, carreteras y calles urbanas

Las técnicas de planeación que marcan y preparan el viejo pavimento para su restauración mediante finas capas de concreto, se están practicando actualmente y se mejoran para el futuro. Se han desarrollado nuevas técnicas en el campo del concreto reciclado.

El mezclado computarizado y los controles con rayos láser incrementan las perspectivas futuras.

Es importante considerar el papel que desempeñan los productores de concreto en el crecimiento de los avances tecnológicos. Las nuevas plantas de concreto de gran movilidad acercarán la producción de concreto a su uso final.

Las computadoras funcionan ya como cerebros de la planta de concreto y dan al productor y al usuario un control más positivo sobre el concreto. La exactitud del mezclado, el inventario del concreto, el control de registros y el control de las diferentes mezclas que se producen en el transcurso de un día o de una semana, pueden ser manejados por una computadora.

También tenemos el rayo láser que se ha estado utilizando para controlar las nivelaciones y los trabajos de las pavimentadoras. Hasta hace poco tiempo los rayos láser no eran propicios para ser utilizados en el medio ambiente que existe en la construcción de caminos y calles.

Sin embargo, los resultados de los avances recientes en el uso del láser en el equipo de construcción han tenido éxito.

LA INGENIERÍA DE SISTEMAS EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS

El diseño de pavimentos para carreteras y aeropistas involucra estudios complejos de suelo y materiales, su comportamiento bajo cargas y su habilidad para soportar el tránsito durante todas las condiciones climatológicas a lo largo de su vida de diseño útil.

El campo de diseño de los pavimentos debe ser dinámico conforme a la tecnología cambiante día con día y por los requerimientos impuestos por el creciente tráfico aéreo y carretero y las sobrecargas involucradas. En el pasado, la "regla del dedo" basada en experiencias previas gobernaba y triplicaba los diseños. Durante el período de 1920 a 1940, los ingenieros se concentraron en evaluar propiedades estructurales de los suelos, por lo que fue posible conseguir gran cantidad de información y datos que permitieron desarrollar teorías y modelos realísticos en el diseño de pavimentos. Debe recordarse la complejidad del sistema de pavimentos. Conscientes de ello, la investigación ha seguido su formato dinámico hasta llegar a las computadoras.

La ingeniería de Sistemas está siendo aplicada a la solución de problemas e implementación de los actuales métodos de diseño y construcción. Los programas resultantes que han sido creados para estos fines permiten al ingeniero de diseño realizar un sistema de análisis detallado y preciso de la vida y comportamiento de un pavimento sobre cualquier período de diseño.

Existen programas de computadora muy versátiles para pavimentos de caminos y aeropistas. Constantemente son experimentados y actualizados para cumplir con sus objetivos

eficientemente. Los hay para sistemas múltiples de capas que sirven para estudiar con detalle esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles y rígidos. Estos programas permiten analizar cada capa componente de la estructura y también la consideración de cargas múltiples repetidas en el diseño. Predicciones de fatiga son analizadas con precisión.

El ingeniero de diseño debe tomar en cuenta los costos iniciales de construcción, mantenimiento, intereses, amortización, etc., para integrar un sistema de aproximadamente 50 variables básicas de entrada al programa. Entonces, con el auxilio de la computadora se obtendrían múltiples alternativas de diseño de entre las que se seleccionarán aquellas óptimas basadas en el costo mínimo.

Ahora bien, debemos recordar que la computadora siendo una herramienta de mucha utilidad, a fin de cuentas es una máquina compleja que estará sujeta al criterio y arbitrio del ingeniero diseñador por lo que se refiere a programación.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

INDICE DE TABLAS, GRÁFICAS Y FIGURAS.

TABLAS

No.	TITULO	CAPITULO	PAGINA
1	Factores adicionales que determinan la elección del tipo de pavimento.	I 2	10
2	Clasificación de calles.	I 3	13
3	Correlaciones aproximadas entre los valores de soporte de los suelos	I 3	18
4	Valores de K	I.3	18
5	Tasas de crecimiento anual del tránsito y factores de proyección correspondientes.	II 1	29
6	Capacidad de diseño para carreteras de varios carriles	II 1	31
7	Capacidad de diseño para carreteras de 2 carriles con tránsito ininterrumpido	II 1	32
8	Números de ejes durante la vida de diseño método estándar de diseño de la P.C.A.	II.1	34
9	Efecto de la sub-base no tratada en los valores de K, lb/pulg ³ .	II.1	36
10	Valores de k de diseño para sub bases tratadas con cemento portland	II.1	36
11	Relaciones de esfuerzos y repeticiones permisibles de carga.	II.2	40
12	Características de las terracerías.	III.1	48
13	Estabilización de terracerías	III.1	49
14	Categoría de la subrasante.	III.1	52
15	Características de la subrasante.	III.1	53
16	Características de las sub bases	III.1	54
17	Características de las sub bases según su granulometría	III.1	55
18	Penetración en material patrón.	III.2	67
19	Clasificación del material según su valor relativo de soporte.	III.2	68
20	Resistencias del concreto a la compresión según su relación de agua - cemento.	II.2	70
21	Ejemplo de un proporcionamiento de mezclas basado en el factor de contenido mínimo de cemento y en una relación agua cemento máximo	III.3	73
22	Contenido de aire, según el tamaño máximo de agregado.	III.3	76
23	Esfuerzos de alabeo-Losas de 8" de espesor y 15 pies de longitud.	IV 3	92
24	Espesores de la sub base flexible para diversos tipos de subrasante y caminos, cuando el manto freático está a más de 60 cms. por debajo del nivel freático.	V 2	110
25	Costos durante la vida útil de diferentes alternativas de pavimentación.	V 3	119
26	Relación de esfuerzo y repeticiones de carga admisible para diseño de pavimentos de CCR.	V 3	122
27	Efecto del espesor de la sub base en los valores de K	V 3	124
28	Valores de r , radio de rigidez relativa	V 3	130

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

FIGURAS

No	TITULO	CAPITULO	PAGINA
1	Sección típica de pavimento rígido en calles.	I.3	11
2	Guarniciones típicas.	I.3	19
3	Juntas constructivas	I.3	21
4	Posiciones de las cargas y distribución del tránsito	II.1	25
5	Porcentajes de camiones en el carril derecho, para una carretera de 4 carriles, dividida en el centro.	II.3	41
6	Selección del equipo de compactación.	III.1	51
7	Patrones de grietas en un pavimento sin juntas.	IV.3	92
8	Juntas longitudinales	IV.3	94

GRÁFICAS

No	TITULO	CAPITULO	PAGINA
1	Diseño del espesor para calles residenciales y colectoras residenciales para un periodo de 35 años	I.3	14
2	Diseño del espesor para calles residenciales y colectoras residenciales para un periodo de 50 años.	I.3	14
3	Diseño del espesor para calles colectoras para periodos de diseño de 35 y 50 años	I.3	15
4	Diseño del espesor para arterias menores para periodos de diseño de 35 a 50 años	I.3	15
5	Diseño del espesor para arterias y calles comerciales para periodos de diseño de 35 y 50 años	I.3	16
6	Diseño del espesor para arterias mayores y calles industriales para periodos de diseño de 35 y 50 años	I.3	16
7	Cartas de diseño para cargas en eje sencillo, caso I	II.1	26
8	Cartas de diseño para cargas en eje tandem, caso I	II.1	27
9	Gráfica relación de % de humedad-peso volumétrico seco. Proctor	III.2	65
10	Gráfica para la determinación del diámetro, longitud y separación de las varillas de liga	IV.3	100
11	Gráfica para proyecto de pasajuntas de varillas redondas y lisas usadas a través de juntas de contracción.	IV.3	101
12	Gráfica para proyecto de pasajuntas de varillas redondas y lisas usadas a través de las juntas de dilatación.	IV.3	102
13	Gráfica de diseño para carga de rueda sencilla.	V.3	126
14	Gráfica de diseño para ruedas dobles.	V.3	127

FÓRMULAS

No	TITULO	CAPITULO	PAGINA
1	Tránsito promedio diario en ambas direcciones	II.1	30
2	Volumen total de vehículos por hora en una dirección.	II.2	31
3	Área de acero requerida en varillas de liga	IV.3	103
4	Números de varillas en la junta.	IV.3	103
5	Espaciamiento de las varillas	IV.3	103

REFERENCIAS

CAPITULO I

1. "Planes Municipales de Desarrollo, Guadalajara, Tlaquepaque y Zapopan Jalisco, Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Publicas, 1980
2. Apuntes Curso de Diseño y Construcción de Pavimentos I, División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1986.

CAPITULO II

1. Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
2. Thickness Desing for Concrete Pavements.- Portland Cement Association, U.S.A. 1966.
3. Estudios teóricos del comportamiento de losas de pavimentos, realizados por H. M Westergaard, G Pickett y otros investigadores
4. Pruebas en modelos y a escala natural, como las pruebas de Arlington, llevadas a cabo por la oficina de caminos públicos de E.U.A. (Burdeau of Public Roads) y las pruebas efectuadas en los laboratorios de la Asociación de Cemento Portland de los Estados Unidos (P.C.A.)

CAPITULO III

- 1 Apuntes Curso de Diseño y Construcción de Pavimentos i, División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1986

CAPITULO IV.1 y IV.2

- 1 Transportation Research Board. 2101 Constitution Ave., NW Washington, D.C., 20418."Aditivos para concreto : acelerantes, inclusores de aire, reductores de agua, retardantes, puzolanas", Informe Especial No. 119, 1971, 32 pp. "Desarrollo de guías para especificaciones de construcción practicas y realistas", Informe del NCHRP No. 17, 1965, 109 pp.
2. American Association of state highway and Transportation Officials, 341 National Press Building, Washington, D.C., 20004. "Especificaciones estándar de materiales para carreteras y métodos de muestrec y pruebas", 1ra. Parte, Especificaciones, y 2ª. Parte, Métodos de muestreo y pruebas, decimoprimer edición, 1974. (Las especificaciones AASHTO a las que se hace referencia en esta practica recomendable son la M 74, M182 y T 26). "Manual para la construcción de carreteras", 1968 "Guía de especificaciones para la construcción de carreteras", 1972.
- 3 American Society for Testing and Materials, 1916 Race St., Philadelphia, PA , 19103 Normas ASTM, 1973, Partes 4, 9, 10 y 11.

- 4 Federal Specifications and Standards, General Services Administration, Federal Supply Service, Superintendent of Documents, U S Government Printing Office, Washington, D C , 20402
5. American Concrete Institute, P.O Box 19150, Redford Station, Detroit, Mich 48219.

CAPITULO IV.3

- 1 Joint Desing for Concrete Pavements - Portland Cement Association, U.S A. 1961

CAPITULO V.1

- 1 M. P. Brokaw, Effect of Serviceability and Roughness at Transverse Joints of Performance and Desing of Plain Concrete Pavement, Highway Research Board 471, highway Research Board, 1973, pags. 91-98.
2. R. G. Packard, Design Considerations for Control of joint Faulting of Undoweled Pavement, Proceedings, International Conference on the Design of Concrete Pavement, Purdue University, 1977, pags. 121-136.
- 3 Concrete Pavements-Load Transfer at Transverse Contraction Joints and Design of Concrete Pavements, Report and Appendices of Subcommittee No. 1, Permant International Association of Road Congresses Technical Committee on Concrete Roads, septiembre 1979.

CAPITULO V.2

- 1 Lilley, A.A.; Concrete block paving for specializd traffif -- a desing method, Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1978, 11 pags., ADS/36.
2. Cement and Concrete Association, Concrete block paving – model specification clauses for roads subjet to adoption, Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1978, publicación 46.026.
- 3 Transport and Road Reserch Laboratory; A guide to the structural desing of pavements for new roads, tercera edición, Londres, H.M. Stationery Office, 1970, 36 pags., Road Note 29.
- 4 Knapton, J., The desing of concrete block roads, Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1976, 6 pags., informe técnico 42.515.
5. Departament of transport, Scottish Development Department and Welsh Office; Specification for road and bridge works, , Londres, H.M. Stationery Office, 1976. I-XIV, 194 pags.
- 6 Highway Research Board; The AASHO Road Test, Washington, D.C. National Academy of Sciences, National Research Council, 1962, Informes Especiales 61A y 61E.
7. Concrete Society. The; A Guide to good practice for road edge details, Informe de una cuadrilla de trabajo de la Concrete Society, Londres, 1974, 36 pags., informe técnico num. 10 de la Concrete Society, publicación 51.073.

TESIS PROFESIONAL
"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS RIGIDOS"

8. Lilley, A.A. y Collins, J R.; Laying concrete block paving, Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1976, 15 pags , publicación 46 022.

CAPITULO V.3

1. Tayabji, S.D. y Okamoto, P.A. "Engineering Properties of Roller Compacted Concrete," artículo presentado en la Reunión Anual de 1987 del Transportation Research Board, Washington, D.C., enero 1987.
2. Murdoch, J.W. y Kesler, C.E., "Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams," Revista del American Concrete Institute, Vol 30, No. 2, agosto de 1958.
3. Ballinger, C.A., "Cumulative Fatigue Damage Characteristics of Plain Concrete," Highway Reserch Record No. 370, Transportation Research Board, 1971.
4. Packard, R.G., "Thickness Design of Concrete Highway and street Pavements," Publicacion No. EB109, Portland Cement Association, 1984.
5. Tayabji, S.D., et al., "Evaluation of heavily loaded Stabilized Roadways," Transportation Research Record 839, Transportation Research Board, 1982.
6. Piggot, R.W., "Roller Compacted Concrete for Heavy Duty Pavements – Past Performance, Recent Projects and Recommended Construction Methods," artículo presentado en la Reunión Anual de 1986 del Transport Research Board, Washington, D.C. enero de 1986.
7. Pickett, G Y Ray, G K., "Influence Charts for Concrete Pavements", American Society of Civil Engineers, Transactions, Artículo No 2425, Vol. 116, 1951.
8. Westergaard, H.M. "theory of Concrete Pavement Design, "Memorias de la Septima Reunión Anual, Vol. 1, Highway Research Board, 1927.
9. Packard, R.G., "AIRPORT – Concrete Thickness Design for Airport and Industrial Pavements," Concrete Design Software Library Program No MC006X, Portland Cement Association, 1986.
10. "Standard Method for Non-repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation end Design of Airports and Highway Pavements," American Society for Testing and Materials, Designacion: d 1196, 1985.
- 11 Ragan, S., "Evaluation of the Frost Resistance of Rolier Compacted Concrete Pavements", Transportation Research Record No. 1062, Transportation Research Board, 1986.