



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE
CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS
APLICADAS EN MÉXICO, REINO UNIDO Y ESPAÑA”**

T E S I S

QUE PARA OBTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A:

ING. CARMEN PILAR INCIARTE MELEAN

TUTOR:

M.I. JAIME ANTONIO MARTINEZ MIER

2012



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez

Secretario: M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas

Vocal: M.I. Jaime Antonio Martínez Mier

1^{er}. Suplente: M.I. Dahlhaus Parkman Enrique Samuel

2^{do}. Suplente: M.I. Jesús Antonio Esteva Medina

MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA 2012

TUTOR DE TESIS:

M.I. JAIME ANTONIO MARTINEZ MIER

FIRMA

DEDICATORIA

*A Dios, a mis padres, a mi familia y a mis amigos que terminan siendo parte de mi familia
Por todo el amor, comprensión y apoyo, que con constancia
y paciencia me dieron alas para alcanzar mis metas.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza y la voluntad para realizar mis metas.

A mis padres, por ser un ejemplo a seguir, por su apoyo y confianza.

Al M.I. Jaime Martínez Mier por su apoyo para la realización de esta tesis.

A mis amigos y compañeros de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que me otorgó para la realización de mis estudios de Maestría.

A todos aquellos expositores, empresarios y maestros que dedicaron su tiempo en compartir sus conocimientos durante la realización de mis estudios de Maestría.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	9
DEFINICIÓN Y TIPOS DE PAVIMENTO	9
1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTOS DE CONCRETO EN MÉXICO.	10
CAPÍTULO 2. CRITERIOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	13
2.1. CRITERIOS DE DISEÑO APLICADOS EN MÉXICO	13
2.1.1. Especificaciones de los vehículos.....	13
2.1.2. Método AASHTO.....	16
2.1.3. Método de la Asociación del Cemento Portland (PCA)	28
2.2. CRITERIO DE DISEÑO APLICADOS EN REINO UNIDO.	34
2.2.1. Factores de diseño.....	35
2.2.2. Diseño del pavimento.....	44
2.3. CRITERIOS DE DISEÑO APLICADOS EN ESPAÑA.	47
2.3.1. Factores de diseño.....	49
2.3.2. Catálogo de secciones de pavimentos	53
CAPITULO 3. CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	55
3.1. TERRACERÍAS Y CAPA SUBRASATE.....	55
3.3. DRENAJE Y SUBDRENAJE.....	60
3.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS LOSAS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	62
3.5. JUNTAS DE CONTROL.....	66
3.6. CONTROL DE CALIDAD.....	69
3.7. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS MEXICANAS.....	71
3.8. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS BRITÁNICAS.....	72
3.9. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS ESPAÑOLAS	73
CAPITULO 4. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO APLICADOS EN MÉXICO, REINO UNIDO Y ESPAÑA.	75
4.1. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO.....	75
4.2. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN	85
ANEXOS	93
ANEXO A. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	94
ANEXO B. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS	99
ANEXO C. NOMOGRAMA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS, MÉTODO PCA.	108
ANEXO D. ESFUERZOS EQUIVALENTES kg/cm^2	111

ANEXO E. FACTORES DE EROSIÓN.....	113
ANEXO F. FORMACIÓN DE LA SUBRASANTE SEGÚN NORMAS ESPAÑOLAS.	117
ANEXO G. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS ESPAÑOLAS.	118
ANEXO H. VALORES DE CALIDAD PARA MATERIALES DE TERRAPLÉN, CAPA SUBYACENTE, SUBRASANTE Y SUB-BASE.	120
ANEXO I. ZONAS GRANULOMÉTRICAS RECOMENDABLES PARA MATERIALES DE SUB-BASES.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Pavimentos asfálticos o flexibles.	9
Fig. 1.2. Pavimentos de concreto hidráulico o rígidos.	10
Fig. 1.3. Otros tipos de pavimentos (a) adoquines, (b) empedrados, (c) suelo-cemento.	10
Fig. 1.4. Cuadro cronológico del desarrollo de los pavimentos en México.	11
Fig. 1.5. Recursos aprobados para obras de carretera y contrato.	12
Fig. 2.1. Comportamiento de una junta entre losas de concreto.	23
Fig. 2.2. Esquema de una prueba de placa.	26
Fig. 2.3. Correlación 1 con SUCS y VRS.	26
Fig. 2.4. Análisis por fatiga, método de la PCA.	28
Fig. 2.5. Análisis por erosión, método de la PCA.	29
Fig. 2.6. Proporción de vehículos circulando por el carril de baja velocidad en una vialidad de 2 ó 3 carriles.	32
Fig. 2.7. Porcentaje mínimo de vehículos clase OGV2 para construcción nueva.	36
Fig. 2.8. Tránsito de diseño para 40 años de vida útil.	37
Fig. 2.9. Porcentaje de vehículos comerciales en el carril más cargado (P).	37
Fig. 2.10. Estructura de la cimentación de la losa de concreto.	40
Fig. 2.11. Opciones de diseño restringido para sub-base o capa de protección.	41
Fig. 2.12. Opciones de diseño restringido para sub-base clase 2 sobre capa de protección.	41
Fig. 2.13. Diagrama de flujo de diseño por rendimiento.	43
Fig. 2.14. Diseño de espesor para pavimento rígido continuo reforzado.	45
Fig. 3.1. Sección transversal de un terraplén.	57
Fig. 3.2. Esquema y fotografía de una pavimentadora con cimbras deslizantes.	64
Fig. 3.3. Sellado de juntas.	68
Fig. 3.4. Refuerzo de un pavimento de concreto hidráulico con ampliación.	73
Fig. 3.5. Esquema de anchos y sobrecanchos del pavimento.	74
Fig. 3.6. Variación de espesor.	74
Fig. A.1. Condición del camino respecto al Índice de Servicio Actual (ISA).	96
Fig. A.2. Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos.	96
Fig. C.1. Método PCA 1984, análisis por fatiga. Acotamiento con y sin pavimento.	108
Fig. C.2. Método PCA 1984, análisis por erosión. Acotamiento sin pavimento.	109
Fig. C.3. Método PCA 1984, análisis por erosión. Acotamiento pavimentado.	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de vehículos según su clase, nomenclatura, número de ejes y llantas	14
Tabla 2.2. Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino	15
Tabla 2.3. Peso bruto vehicular máximo autorizado por clase de vehículo y camino	16
Tabla 2.4. Valores frecuentes de tasas de crecimiento.....	19
Tabla 2.5. Valores del factor de carril recomendado por la AASHTO.....	20
Tabla 2.6. Valores de confiabilidad recomendados para México.....	21
Tabla 2.7. Factor de seguridad AASHTO para diferentes valores de S_o y R.	21
Tabla 2.8. Valores de desviación normal estándar para diferentes valores de “R”	22
Tabla 2.9. Escala de serviciabilidad.....	22
Tabla 2.10. Factor de transferencia de carga.....	23
Tabla 2.11. Selección de barras	24
Tabla 2.12. Módulos de ruptura recomendados.....	25
Tabla 2.13. Valores típicos de la desviación estándar	25
Tabla 2.14. Correlación 2 con el SUCS y el VRS	27
Tabla 2.15. Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una base granular	30
Tabla 2.16. Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una base granular cementada	30
Tabla 2.17. Clases y categorías de vehículos comerciales	36
Tabla 2.18. Composición de flujo promedio típico de vehículos comerciales en Reino Unido.....	36
Tabla 2.19. Factor de desgaste para clases y categorías de cv	38
Tabla 2.20. Requerimientos de módulo de superficie del subrasante	43
Tabla 2.21. Categoría de tránsito pesado T00 a T2	51
Tabla 2.22. Categoría de tránsito pesado T3 y T4.....	51
Tabla 2.23. Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga	51
Tabla 2.24. Materiales para la formación de la subrasante	53
Tabla 3.1. Requisitos de granulometría para materiales de sub-base	60
Tabla 3.2. Valores de los sobreanchos.....	73
Tabla 4.1. Cuadro comparativo de normas aplicadas al diseño de pavimentos de concreto hidráulico en México, Reino Unido y España.....	78
Tabla 4.2. Cuadro comparativo de normas aplicadas a la construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México, Reino Unido y España.....	88
Tabla B.1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes sencillos Pt de 2.0	99
Tabla B.2. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tandem Pt de 2.0	100
Tabla B.3. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes triple Pt de 2.0	101
Tabla B.4. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes sencillos Pt de 2.5	102
Tabla B.5. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tandem Pt de 2.5	103

Tabla B.6. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes triple Pt de 2.5	104
Tabla B.7. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes sencillos Pt de 3.0	105
Tabla B.8. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tandem Pt de 3.0	106
Tabla B.9. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes triple Pt de 3.0	107
Tabla D.1. Esfuerzo equivalente en kg/cm^2 , acotamiento sin pavimentar	111
Tabla D.2. Esfuerzo equivalente en kg/cm^2 , acotamiento pavimentado	112
Tabla E.1. Factor de erosión, junta con pasajuntas - acotamiento sin pavimento	113
Tabla E.2. Factor de erosión, junta sin pasajuntas - acotamiento sin pavimentar	114
Tabla E.3. Factor de erosión, junta con pasajuntas - acotamiento pavimentado	115
Tabla E.4. Factor de erosión, junta sin pasajuntas - acotamiento pavimentado	116

INTRODUCCIÓN

Las vías de comunicación y de entre ellas las carreteras, son base importante del desarrollo de un país. La calidad de una carretera requiere de un diseño, construcción y mantenimiento adecuado, ya que su pavimento tiende a degradarse por el uso y el clima.

La red carretera de la República Mexicana se ha ido modernizando en los últimos años, y el uso de pavimentos de concreto hidráulico se ha vuelto cada vez más frecuente. Una de las principales preocupaciones en la conservación de las carreteras es el deterioro de los pavimentos, por lo que desde el punto de vista de durabilidad juega un papel importante su evaluación.

Las carreteras de altas especificaciones que operan en la República Mexicana han sido proyectadas para mejorar los índices de seguridad, de velocidad y economía, que las convierten en mejores y más seguras si cuentan con adecuadas especificaciones geométricas de curvatura, mayor distancia de visibilidad, pendientes moderadas, señalamientos, y mayores dimensiones de sus carriles y acotamientos.

El objetivo de este trabajo es realizar una comparación de los métodos de diseño y construcción que se aplican en México para pavimentos de concreto hidráulico con la normatividad de otras reconocidas internacionalmente por tener vialidades con altas especificaciones.

En el Capítulo 1 de esta tesis se presentan definiciones básicas sobre los pavimentos, tipos, y su estructura. Se hace mención sobre la situación actual de las autopistas de pavimentos de concreto hidráulico de la República Mexicana.

El Capítulo 2 resume los criterios de diseño de pavimentos de concreto hidráulico según normas aplicadas en México, Reino Unido y España, y se tratan los factores de diseño que considera cada método.

En el Capítulo 3 se trata el proceso constructivo de los pavimentos de concreto hidráulico, abarcando las actividades de terracerías y capa subrasante, capa sub-base, construcción de la losa de concreto hidráulico, curado, juntas y control de calidad; también se hace referencia a los aspectos constructivos aplicados en México, Reino Unido y España.

En el Capítulo 4 se realiza un análisis comparativo de las normas aplicadas en México, Reino Unido y España, en cuanto al diseño y construcción de los pavimentos de concreto hidráulico.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. DEFINICIÓN Y TIPOS DE PAVIMENTO

Los pavimentos se definen como el conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento.

Las capas que constituyen usualmente un pavimento y su cimentación son:

- Subrasante. Capa de suelo compactado que constituye propiamente la cimentación de la estructura del pavimento.
- Sub-base. Capa intermedia construida con material granular (grava y arena), sobre la subrasante.
- Base. Capa de apoyo de la carpeta, construida con material granular más grueso que la sub-base.
- Carpeta. Capa superior del pavimento.

En general, los pavimentos pueden ser asfálticos (flexibles) o de concreto hidráulico (rígidos).

Los pavimentos asfálticos o flexibles están constituidos por una capa relativamente delgada de mezcla asfáltica, construida sobre la base y la sub-base, que a su vez descansan en la subrasante (Fig. 1.1).

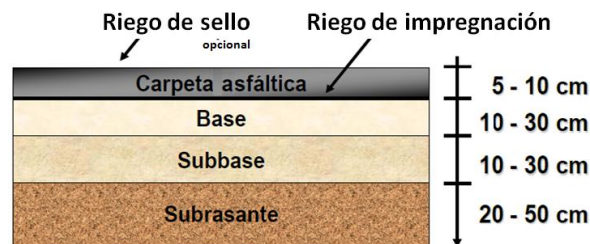


Fig. 1.1. Pavimentos asfálticos o flexibles.

Los pavimentos de concreto hidráulico o rígidos están formados por una losa de concreto hidráulico de cemento Portland, apoyada en la sub-base, que a su vez descansa en la capa subrasante (Fig. 1.2). Los sistemas de pavimentos rígidos más comunes son los siguientes:

- Pavimentos de concreto sin refuerzo (*Unreinforced Concrete Pavements, URC*). Son un sistema de losas de concreto simple, unidas entre sí por juntas transversales y longitudinales.
- Pavimentos de concreto reforzado con juntas (*Jointed Reinforced Concrete Pavements, JRC*). Corresponden a un sistema de losas de concreto armado, unidas entre sí por juntas transversales y longitudinales.
- Pavimentos de concreto con refuerzo continuo (*Continuously Reinforced Concrete Pavements, CRC*). Consisten en un sistema de losas de concreto armado, unidas entre sí por acero de refuerzo.

Se pueden encontrar, además, pavimentos de concreto pre-esforzados, postensados, reforzados con fibras de acero y concretos rodillados (compactados con rodillos).

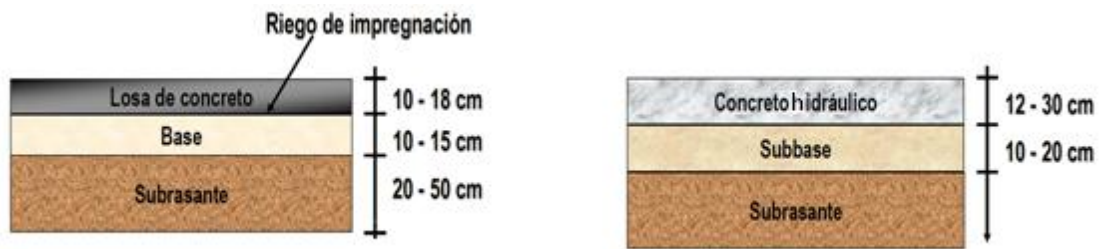


Fig. 1.2. Pavimentos de concreto hidráulico o rígidos.

Existen también otros tipos de pavimento, como son los adoquines, empedrados y capas de suelo-cemento (Fig. 1.3).

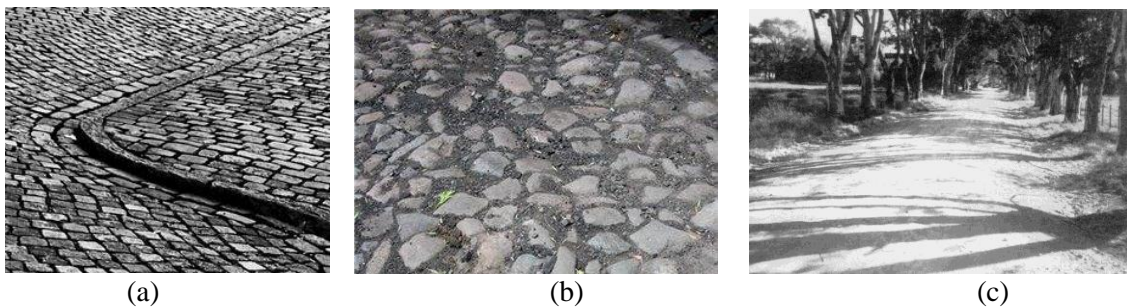


Fig. 1.3. Otros tipos de pavimentos (a) adoquines, (b) empedrados, (c) suelo-cemento.

1.2. SITUACIÓN ACTUAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTOS DE CONCRETO EN MÉXICO.

Las crecientes necesidades de desarrollo, la búsqueda de soluciones perdurables y la demanda de contar con más y mejores carreteras, han contribuido a la modernización y ampliación de la red carretera de México.

El País cuenta con gran diversidad de climas, suelos y zonas ambientales; su heterogeneidad ha marcado el camino del desarrollo y crecimiento. De alguna manera, esa diversidad ha influido en la conformación de la infraestructura carretera.

Una razón importante del bajo nivel de servicio de las carreteras en México se debe a que éstas se diseñaron y construyeron en su mayoría entre 1925 y 1970. La red se proyectó para soportar cargas vehiculares que varían entre las 6 y 8 t, pero en la actualidad llegan a transitar vehículos que alcanzan 60 t. Además del aumento en la carga de los vehículos, no se consideró el crecimiento del tránsito pesado en la red; en el diseño inicial el tránsito diario variaba entre 500 y 1,000 vehículos, mientras que en la actualidad se tienen valores significativamente mayores, que alcanzan 1,000,000 vehículos.

Hasta antes de 1993, el uso de pavimentos de concreto hidráulico en México fue relativamente escaso. Esto se ha atribuido a que, al ser el país un importante productor de petróleo (y por consiguiente de asfalto), además de existir un subsidio importante en el precio de éste, el costo de los pavimentos asfálticos resultaba muy inferior a los de concreto hidráulico; adicionalmente, había en algunos casos desinformación y desconocimiento sobre el diseño y construcción de los pavimentos de concreto hidráulico con nuevas tecnologías. Por otro lado, cuando se diseñaron las carreteras para el tránsito que se creía debían soportar, los pavimentos de asfalto eran una solución suficiente.

En 1993 se inicia a gran escala la construcción de pavimentos rígidos nuevos, así como la construcción de sobrecapas, ultradelgadas, de concreto hidráulico. Existen en la actualidad varios tramos de carreteras de concreto hidráulico en el país, entre los que destacan: la autopista Cárdenas, Tab. – Agua Dulce, Ver., con longitud de 84 km, la autopista Guadalajara, Tepic, con 34 km de longitud y el libramiento Querétaro - San Luis Potosí, con 38 km.

La longitud total de carreteras construidas o en proceso entre 1993 y febrero de 1997, está distribuida como sigue:

- Concreto simple: 110 km-carril de refuerzo y 64 km-carril de pavimento nuevo.
- Concreto con pasajuntas: 752 km-carril de pavimento reforzado y 1,272 km-carril de pavimento nuevo.

La Fig. 1.4 ilustra cronológicamente el desarrollo de los pavimentos en México:

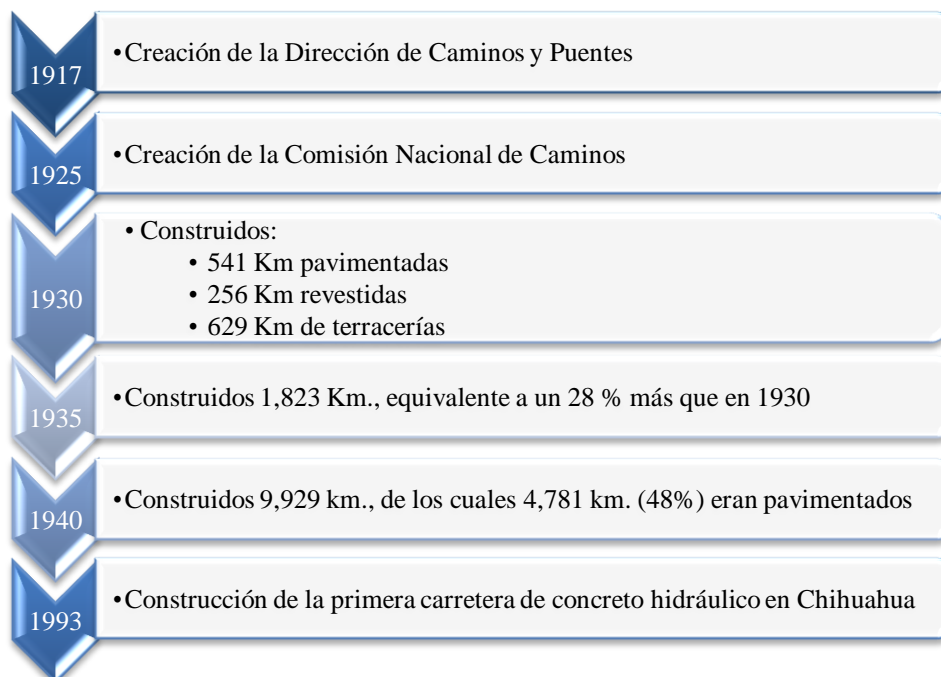


Fig. 1.4. Cuadro cronológico del desarrollo de los pavimentos en México.

Y en la Fig. 1.5 se muestra la inversión por entidades para los proyectos de obras de carreteras.



Fig. 1.5. Recursos aprobados para obras de carretera y contrato.

El deterioro de los pavimentos de concreto hidráulico construidos en la República Mexicana durante los últimos años ha sido un problema importante de la infraestructura vial. En el Anexo A de este trabajo se describe la metodología de evaluación de un pavimento de este tipo partiendo de criterios de durabilidad.

CAPÍTULO 2. CRITERIOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

En este capítulo se describen los métodos de diseño de pavimentos de concreto hidráulico más utilizados en México, Reino Unido y España.

2.1. CRITERIOS DE DISEÑO APLICADOS EN MÉXICO

Los dos criterios de diseño de pavimentos de concreto más utilizados en la República Mexicana, son el Método AASHTO y el Método de la Asociación del Cemento Portland (*Portland Cement Association, PCA*). Los métodos se aplican con las especificaciones de vehículos que se tratan en el siguiente punto.

2.1.1. Especificaciones de los vehículos

La Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008 establece el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte federal, servicios auxiliares y transporte privado, que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, excepto los vehículos tipo grúa de arrastre y arrastre y salvamento.

A los vehículos se les clasifica en los siguientes grupos:

- Autobuses (B). Vehículo automotor de seis o más llantas, de estructura integral o convencional con capacidad de más de 30 personas.
- Camión unitario (C). Vehículo automotor de seis o más llantas, destinado al transporte de carga con peso bruto vehicular mayor a 4 t.
- Camión remolque (C-R). Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un camión unitario con un remolque, acoplado mediante un convertidor.
- Tractocamión articulado (T-S). Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión y un semirremolque.
- Tractocamión doblemente articulado (T-S-R y T-S-S). Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión, un semirremolque y un remolque u otro semirremolque, acoplados mediante mecanismos de articulación.




En la Tabla 2.1 se presenta la clasificación de vehículos según su clase, nomenclatura, número de ejes y llantas.

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) clasifica técnicamente a las carreteras de la manera siguiente:

- Carretera tipo ET. Son aquellas cuyas características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso. Se

subdividen en ET4, que son carreteras de cuatro carriles, eje de transporte, y ET2 para carreteras de dos carriles, eje de transporte.

Tabla 2.1. Clasificación de vehículos según su clase, nomenclatura, número de ejes y llantas

Clase	Nomenclatura	Numero de ejes	Numero de llantas	Configuración del vehículo
Autobuses (B)	B2	2	6	
	B3	3	8 o 10	
	B4	4	10	
Camión unitario (C)	C2	2	6	
	C3	3	8-10	
Camión remolque (C-R)	C2-R2	4	14	
	C3-R2	5	18	
	C2-R3	5	18	
	C3-R3	6	22	
Tractocamión articulado (T-S)	T2-S1	3	10	
	T2-S2	4	14	
	T2-S3	5	18	
	T3-S1	4	14	
	T3-S2	5	18	
	T3-S3	6	22	
Tractocamión doblemente articulado (T-S-R y T-S-S)	T2-S1-R2	5	18	
	T2-S2-R2	6	22	
	T2-S1-R3	6	22	
	T3-S1-R2	6	22	
	T3-S1-R3	7	26	
	T3-S2-R2	7	26	
	T3-S2-R3	8	30	
	T3-S2-R4	9	34	
	T2-S2-S2	6	22	
	T3-S2-S2	7	26	

- Carretera tipo A. Son aquellas que por sus características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, excepto aquellos vehículos que por sus dimensiones y peso sólo se permitan en las carreteras tipo ET. Se subdividen en A4, correspondientes a carreteras de cuatro carriles y A2, para carreteras de dos carriles.
- Carretera tipo B. Conforman la red primaria y que atendiendo a sus características geométricas y estructurales prestan un servicio de comunicación interestatal, además de vincular el tránsito. Se dividen en B4, que son carreteras de cuatro carriles, red primaria y B2, para carreteras de dos carriles, red primaria.
- Carretera tipo C. Corresponde a una red secundaria y prestan servicio dentro del ámbito estatal con longitudes medias, estableciendo conexiones con la red primaria. Carretera de dos carriles, red secundaria.
- Carretera tipo D. Corresponde a una red alimentadora y prestan servicio dentro del ámbito municipal con longitudes relativamente cortas, estableciendo conexiones con la red secundaria. Carretera de dos carriles, red alimentadora.

Las concentraciones máximas de carga por daño a pavimentos por eje, de acuerdo al tipo de camino en que transitan, se denomina “peso máximo por eje”, y se indican en la Tabla 2.2. El peso bruto vehicular máximo autorizado para cada vehículo o configuración vehicular, según el tipo de camino en que transitan, es el indicado en la Tabla 2.3.

Tabla 2.2. Pesos máximos autorizados por tipo de eje y camino








Configuración de ejes		Tipo de camino			
		ET4 y ET2 A4 y A2	B4 y B2	C	D
	Sencillo dos llantas	6.50	6.00	5.50	5.00
	Sencillo cuatro llantas	10.00	9.50	8.00	7.00
	Motriz sencillo cuatro llantas	11.00	10.50	9.00	8.00
	Motriz doble o tándem seis llantas	15.00	13.00	11.50	11.00
	Doble o tándem ocho llantas	17.00	15.00	13.50	12.00
	Motriz doble o tándem ocho llantas	18.00	17.00	14.50	13.50
	Triple o tridem doce llantas	23.50	22.50	20.00	NA

Tabla 2.3. Peso bruto vehicular máximo autorizado por clase de vehículo y camino

Vehículo o configuración vehicular	Núm. ejes	Núm. llantas	Peso bruto vehicular (t)			
			ET y A	B	C	D
B2	2	6	17.5	16.5	14.5	13.0
B3	3	8	21.5	19.0	17.0	16.0
B3	3	10	24.5	23.0	20.0	18.5
B4	4	10	27.0	25.0	22.5	21.0
C2	2	6	17.5	16.5	14.5	13.0
C3	3	8	21.5	19.0	17.0	16.0
C3	3	10	24.5	23.0	20.0	18.5
C2-R2	4	14	37.5	35.5	NA	NA
C3-R2	5	18	44.5	42.0	NA	NA
C3-R3	6	22	51.5	47.5	NA	NA
C2-R3	5	18	44.5	41.0	NA	NA
T2-S1	3	10	27.5	26.0	22.5	NA
T2-S2	4	14	34.5	31.5	28.0	NA
T3-S2	5	18	41.5	38.0	33.5	NA
T3-S3	6	22	48.0	45.5	40.0	NA
T2-S3	5	18	41.0	39.0	34.5	NA
T3-S1	4	14	34.5	32.5	28.0	NA
T2-S1-R2	5	18	47.5	45.0	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	54.5	50.5	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54.5	50.5	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54.5	51.5	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	60.5	57.5	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60.5	57.5	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66.5	66.0	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	63.0	62.5	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60.0	60.0	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51.5	46.5	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58.5	53.0	NA	NA

2.1.2. Método AASHTO

El método de diseño recomendado por la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) está basada en los resultados de una prueba denominada “prueba AASHO” realizada entre 1951 y 1960 en Ottawa, Illinois, para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, ante cargas móviles de magnitudes y frecuencias también conocidas y bajo el efecto del medio ambiente. La planeación de la prueba inició en 1951 y la construcción en 1956; el tránsito controlado se aplicó durante más de dos años entre octubre de 1958 y noviembre de 1960.

En la prueba se obtuvieron relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento de diferentes espesores, conformados con bases y sub-bases sobre suelos de características conocidas, y las cargas aplicadas sobre ellas, con un número de repeticiones de ejes con cargas de diferente magnitud y disposición.

A. Ecuación de diseño

Con base a la prueba ya citada, la AASHTO obtuvo la siguiente expresión para el diseño de pavimentos rígidos:

$$\log_{10}(E18) = Z_r \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{(\Delta PSI)}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times p_t) \times \log_{10} \left\{ \frac{S'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right]} \right\} \quad (2.1)$$

donde:

E18 = Tránsito en ejes equivalentes de 8.2 t (18 kip)

Z_r= desviación normal estándar para “R”.

S_o= desviación estándar.

D = espesor.

ΔPSI = Diferencia de serviciabilidad.

P_t = Serviciabilidad final.

MR = Módulo de ruptura del concreto.

C_d = Coeficiente de drenaje.

J = Coeficiente de transferencia de carga.

E_c = Módulo de elasticidad del concreto.

k = Módulo de reacción de la subrasante.

B. Variables de diseño

Las principales variables que intervienen en el diseño de estos pavimentos son las siguientes:

i) Restricciones de tiempo

La guía de diseño de la AASTHO promueve usar períodos largos de análisis para infraestructuras con altos volúmenes de tránsito, incluyendo al menos un período de rehabilitación. Recomienda que el período de análisis sea igual o mayor que el período de operación, ya que permite una mejor evaluación de estrategias de alternativas a largo plazo basado en los costos del ciclo de vida.

- **Período de operación.** Se refiere al tiempo que dura la estructura inicial del pavimento antes de que necesite rehabilitarse, ó al tiempo de funcionalidad entre las operaciones de rehabilitación. Puede estar afectado por factores como la clasificación funcional del pavimento, el tipo o nivel de mantenimiento aplicado, los fondos disponibles para iniciar la construcción, los costos del ciclo de vida, y otras consideraciones de ingeniería.
- **Período de análisis.** Es el período de tiempo que toda estrategia de diseño debe cubrir. Puede ser igual al período de operación seleccionado. Sin embargo, las limitaciones reales de operación pueden requerir de ciertas consideraciones en la etapa de construcción o en la rehabilitación planificada para el período de diseño deseado.

ii) Tránsito

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada con el número de repeticiones de carga que podrá soportar antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas. Emplea el número de repeticiones esperadas de carga de “ejes equivalentes”, por lo cual, antes de utilizar las fórmulas de diseño, se deben transformar los ejes de pesos normales de los vehículos que circularán en ejes simples equivalentes de 8.2 t (18 kip) conocidos en inglés como ESAL's.

La AASHTO diseña los pavimentos por fatiga, la cual puede entenderse como el número de repeticiones ó ciclos de carga y descarga que actúan sobre un elemento. Al establecer una vida útil de diseño, se busca estimar el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento en un cierto período de tiempo.

La vida útil mínima con la que se diseña un pavimento rígido es de 20 años, aunque es frecuente realizar diseños para más años. Adicionalmente, se debe considerar el crecimiento del tránsito durante la vida útil, que depende en gran medida del desarrollo económico, del mejoramiento de las características del pavimento y de la capacidad de tránsito de la vía.

El tránsito en la vida útil del pavimento se estima con la expresión:

$$T_{vu} = (T_{pa}) (FCT) \quad (2.2)$$

donde:

T_{vu} = Tránsito en la vida útil.

T_{pa} = Tránsito durante el primer año.

FCT = Factor de crecimiento del tránsito, que depende de la tasa de crecimiento anual y de la vida útil.

El factor de crecimiento del tránsito considera los años de vida útil más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vía. Se calcula con la expresión:

$$FCT = \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad (2.3)$$

donde:

g = Tasa de crecimiento.

n = Años de vida útil.

La tasa de crecimiento anual depende, entre otros factores, del desarrollo económico – social y de la capacidad de la vía. Es normal que el tránsito vehicular aumente con el paso del tiempo hasta que llega a un punto tal de saturación en que se mantiene prácticamente sin crecer. La tasa varía de acuerdo a los tipos de vehículos, los cuales pueden crecer más en unos casos que en otros. A medida que una vía se va congestionando de tránsito, su crecimiento se hace más lento; este efecto debe tomarse en cuenta estimando una tasa de crecimiento equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil. Es importante investigar adecuadamente la tasa de crecimiento para cada caso en particular. En la Tabla 2.4 se mencionan algunos casos y valores frecuentes de tasas de crecimiento:

Tabla 2.4. Valores frecuentes de tasas de crecimiento

Caso	Tasa de crecimiento
Crecimiento normal	1% a 3%
Vías completamente saturadas	0% a 1%
Con tránsito inducido*	4% a 5%
Alto crecimiento*	Mayor al 5%
*Solamente durante 3 a 5 años	

- Factor de sentido. Del total del tránsito estimado para el diseño de un pavimento, se determina el correspondiente a cada sentido de circulación. Esto se realiza introduciendo un factor de sentido, cuyos valores recomendados son:
 - Un sentido de circulación: 1.0
 - Dos sentidos de circulación: 2.0
- Factor de carril. Es un coeficiente que permite estimar el porcentaje del tránsito que circula por el carril de diseño. En una vía de un solo carril en el sentido de circulación de diseño, obviamente el 100% del tránsito circulará por ese carril, el cual se denomina “carril de diseño”. En una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de vía (carretero ó urbano) y de su saturación, puede ocurrir que en el carril de diseño circule entre un 50 y 80% del tránsito en ese sentido. La AASHTO recomienda los factores mostrados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Valores del factor de carril recomendado por la AASHTO

Número de carriles	Factor de carril
1	1.00
2	0.80 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75

Nota: estos se asemejan más a los de carreteras

- Factor de equivalencia del tránsito. Las fórmulas que permiten convertir el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes dependen del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final que se pretende para el pavimento. Las fórmulas son las siguientes:

$$Fec = -\frac{W_{t18}}{W_{tx}} \quad (2.4)$$

$$\text{Log} \frac{W_{t18}}{W_{tx}} = 4.62 \text{Log}(18 + 1) - 4.62 \text{Log}(L_x + L_2) + 3.28 \text{Log}(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (2.5)$$

$$G_t = \text{Log} \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5} \quad (2.6)$$

$$\beta_x = 1 + \frac{3.63(L_x + L_2)^{5.20}}{(D+1)^{8.45}(L_2)^{3.52}} \quad (2.7)$$

donde:

W_{tx} = Número de aplicaciones de carga definida al final del tiempo t.

W_{t18} = Número de aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t.

L_x = Carga del eje en kip (factor de conversión 1 ton = 2.2046 kip).

L_2 = Código de eje cargado:

$L_2 = 1$, para eje simple.

$L_2 = 2$, para eje tándem.

$L_2 = 3$, para eje tridem.

β_{18} = Valor de β_x cuando $L_x=18$ y $L_2 = 1$.

P_t = Serviciabilidad final.

G_t = viene dada por la ecuación 2.6.

Los ejes equivalentes se calculan de manera diferente para un pavimento rígido que para uno flexible. Cuando se multiplica el tránsito por los diferentes factores de equivalencias, se obtienen los ESAL's (ejes sencillos equivalentes).

El tránsito pesado es el que mayor daño produce a los pavimentos, por lo que debe estimarse con la mayor precisión posible.

Otro factor importante a considerar es la sobrecarga. Se deben conocer con la mayor certeza posible los pesos de los ejes de los vehículos que estarán circulando sobre el pavimento, ya que las sobrecargas le generan un daño severo y su crecimiento es de orden exponencial. En el Anexo B se presentan las tablas de factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos.

iii) Confiabilidad

Los factores estadísticos que influyen en el comportamiento de los pavimentos son:

- Confiabilidad, R.
- Desviación estándar, S_o .

La confiabilidad está definida como la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función, durante su vida útil, en condiciones adecuadas para su operación.

Los valores de confiabilidad recomendados para México se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Valores de confiabilidad recomendados para México

Tipo de pavimento	Confiabilidad R
Autopistas	95%
Carreteras	80%
Rurales	70%
Zonas industriales	65%
Urbanas principales	60%
Urbanas secundarias	50%

Puede entenderse a la confiabilidad como un factor de seguridad. En la Tabla 2.7 se presentan los factores de seguridad de la AASHTO aproximados a los que corresponde una confiabilidad R, asociados con una desviación estándar " S_o ".

Tabla 2.7. Factor de seguridad AASHTO para diferentes valores de S_o y R.

Desviación estándar S_o	Confiabilidad R					
	50%	60%	70%	80%	90%	95%
0.30	1.00	1.19	1.44	1.79	2.42	3.12
0.35	1.00	1.23	1.53	1.97	2.81	3.76
0.39	1.00	1.26	1.60	2.13	3.16	4.38
0.40	1.00	1.26	1.62	2.17	3.26	4.55

Los valores de la Tabla 2.7 se calculan con la fórmula:

$$FS_{AASHTO} = 10^{(-Z_r * S_o)} \quad (2.8)$$

donde:

Z_r = desviación normal estándar para "R" (véase Tabla 2.8).

S_o = desviación estándar. El rango sugerido por AASHTO se encuentra entre: $0.30 \leq S_o \leq 0.40$

iv) Serviciabilidad

El procedimiento de diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (ΔP_{si}) para varios niveles de tránsito y cargas de ejes. Entre mayor sea el valor de ΔP_{si} , mayor será la capacidad de carga del pavimento antes de fallar.

Tabla 2.8. Valores de desviación normal estándar para diferentes valores de “R”

% Confiabilidad R	Desviación normal estándar, Zr
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

La serviciabilidad o índice de servicio se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tránsito (autos y camiones) que circulan en la vía. Se mide en una escala del 0 al 5, en donde 0 significa una calificación para pavimento intransitable y 5 un pavimento excelente, como ilustra la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Escala de serviciabilidad

Índice de servicio	Calificación
5	Excelente
4	Muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

- Serviciabilidad inicial P_o . Es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo. Los valores recomendados por la AASHTO para este parámetro son:
 - Para pavimento de concreto: 4.5
 - Para pavimento de asfalto: 4.2
- Serviciabilidad final P_f . Tiene que ver con la calificación que se esperan tenga el pavimento al final de su vida útil. Los valores para el caso de México, son:
 - Autopistas: 2.5
 - Carreteras: 2.0
 - Zonas industriales: 1.8
 - Pavimentos urbanos principales: 1.8
 - Pavimentos urbanos secundarios: 1.5

v) Transferencia de carga

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes, con el objeto de minimizar los esfuerzos y las deformaciones en la estructura del pavimento. Mientras mejor sea la transferencia de cargas, mejor será el comportamiento de las losas. El método AASHTO considera la transferencia de carga mediante el factor de transferencia J (véase Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Factor de transferencia de carga J.

Millones de ejes equivalente	Con pasajuntas y reforzada con malla		Junta sin pasajuntas (fricción)		Con refuerzo continuo		Tipo de pavimento
	No	Si	No	Si	No	Si	
Hasta 0.3	3.2	2.7	3.2	2.8	-	-	Calles y caminos vecinales
0.3 a 1	3.2	2.7	3.4	3.0	-	-	
1 a 3	3.2	2.7	3.6	3.1	-	-	
3 a 10	3.2	2.7	3.8	3.2	2.9	2.5	Caminos principales y autopistas
10 a 30	3.2	2.7	4.1	3.4	3.0	2.6	
Más de 30	3.2	2.7	4.3	3.6	3.1	2.6	

La efectividad de la transferencia de carga entre losas adyacentes depende de varios factores; entre ellos:

- Cantidad de tránsito.
- Utilización de pasajuntas.
- Soporte lateral de las losas.

Se recomienda emplear los siguientes dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas.

- a) Cuando el tránsito pesado sea mayor al 25% del tránsito total.
- b) Cuando el número de ejes equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de ejes equivalentes o Esal's.

El coeficiente de transferencia de carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta. En la Fig. 2.1 se muestra un esquema del comportamiento de una junta entre losas de concreto.

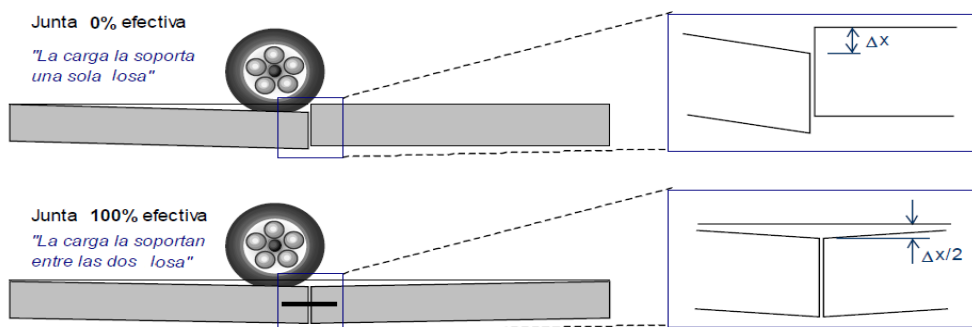
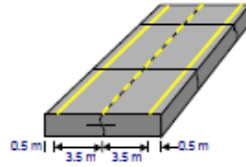


Fig. 2.1. Comportamiento de una junta entre losas de concreto

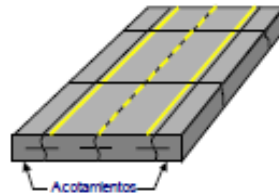
- Soporte lateral. El confinamiento que produce el soporte lateral contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:
 - Ancho de carril ≥ 4.0 m



- Confinamiento con guarniciones o banquetas



- Con acotamientos laterales



- Pasajuntas. Son barras de acero redondo, liso, con esfuerzo de fluencia $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$, las cuales no se deben de adherir al concreto para permitir el libre movimiento de las losas longitudinalmente, pero sí deben transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa a la adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa.

El diámetro, longitud y separación de las pasajuntas está en función del espesor de las losas. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de las barras son las mencionadas en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Selección de barras

Espesor de losa		Barras pasajuntas					
		Diámetro		Longitud		Separación	
cm	in	mm	in	cm	in	cm	in
13 a 15	5 a 6	19	¾	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 ¼	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 ½	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 ¾	56	22	46	18

vi) Propiedades del concreto

Dos son las propiedades principales del concreto que influyen en el diseño de un pavimento y en su comportamiento a lo largo de su vida útil: a) La resistencia a la tensión por flexión (σ'_c), también definida a través del módulo de ruptura (MR) y b) el módulo de elasticidad del concreto (E_c).

- Módulo de ruptura (MR). Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión, es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello. Por esa razón el diseño considera la resistencia del concreto a la flexión por tensión (σ'_c) o módulo de ruptura (MR), especificada normalmente a los 28 días.

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto a las que se aplican cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba está normalizada por la ASTM C78.

Los valores recomendados para el módulo de ruptura varían desde los 41 kg/cm² (583 psi) hasta los 50 kg/cm² (711 psi) a los 28 días, dependiendo del uso que vayan a tener. En la Tabla 2.12 se presentan los valores recomendados.

Tabla 2.12. Módulos de ruptura recomendados

Tipo de Pavimento	MR recomendado	
	kg/cm ²	psi
Autopistas	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas industriales	45.0	640.1
Urbanas principales	45.0	640.1
Urbanas secundarias	42.0	597.4

- Módulo de ruptura promedio (MR_{prom}). La metodología de diseño AASHTO permite utilizar la resistencia a la flexión promedio, obtenida de ensayos a flexión de elementos elaborados con mezclas diseñadas para cumplir la resistencia especificada del proyecto. Estos resultados dependen de las condiciones de control y calidad que tenga el fabricante del concreto en sus procesos. En la Tabla 2.13 se indican valores típicos de la desviación estándar.

$$MR_{promedio} = MR_{especificado} + (Z_r) (S_o \text{ del } MR) \quad (2.9)$$

Tabla 2.13. Valores típicos de la desviación estándar

Tipo	Desviación estándar	Promedio
Concreto premezclado	6% a 12%	9.0%
Mezclado central	5% a 10%	7.5%

- Módulo de elasticidad (E_c). Está íntimamente relacionado con su módulo de ruptura y se determina conforme a la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que puede estimarse a partir del módulo de ruptura; los dos más utilizados son:

$$E_c = (6,750)(14.22 MR) \quad (2.10)$$

$$E_c = (26,454)(14.22 MR)^{0.77} \quad (2.11)$$

vii) Resistencia y deformabilidad de la subrasante

En el método AASHTO, la resistencia de la subrasante es considerada por medio del módulo de reacción del suelo k , el cual se puede obtener directamente de pruebas de placa (Fig. 2.2) realizadas conforme a la norma ASTM D1195 y D1196.

Cuando se diseña un pavimento es probable que se tengan diferentes valores de k a lo largo de un tramo. El método AASHTO recomienda utilizar el valor promedio de los módulos k .

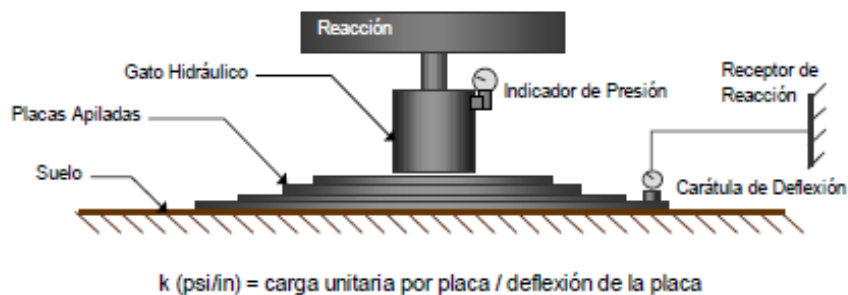


Fig. 2.2. Esquema de una prueba de placa

- Estimación con correlaciones de k . Con base en un gran número de ensayos y estudios se han obtenido correlaciones del valor del módulo de reacción del suelo con diferentes propiedades. En la Fig. 2.3 y en Tabla 2.14 se presenta una correlación de k con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y al Valor Relativo de Soporte VRS o CBR (California Bearing Ratio).

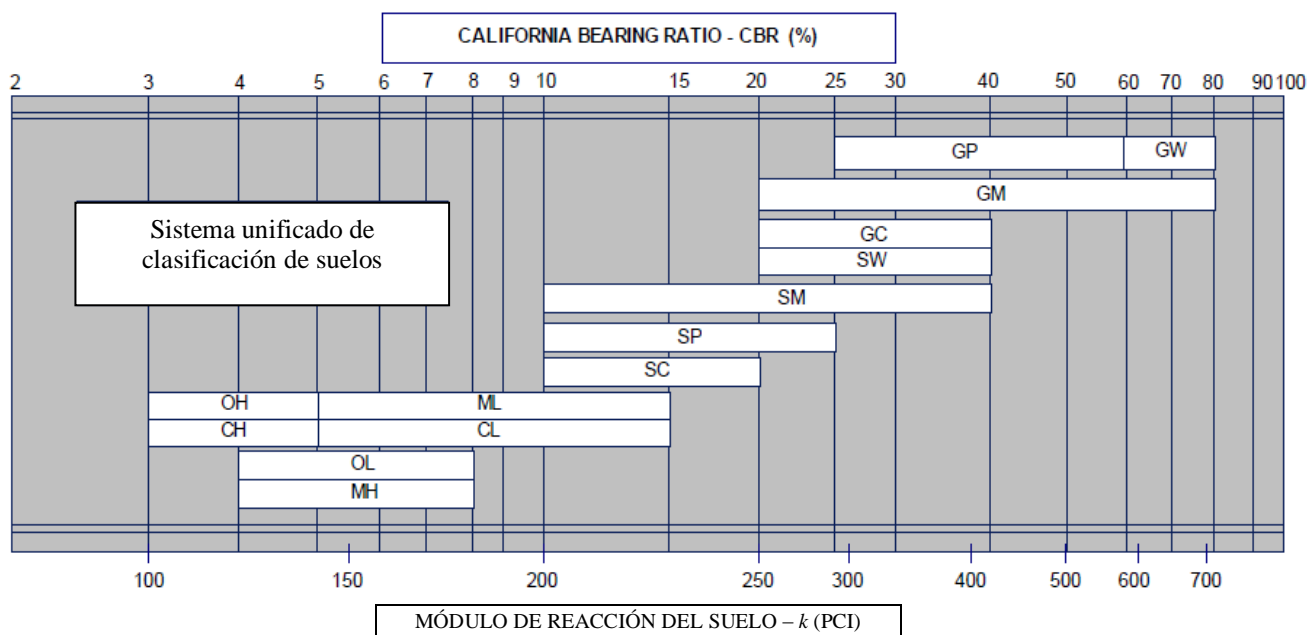


Fig. 2.3. Correlación 1 con SUCS y VRS

Tabla 2.14. Correlación 2 con el SUCS y el VRS

Tipo de Suelo	SUCS	Densidad Seca lb/ft ³	CRB %	K * pci
Suelos Granulares				
Grava	GW, GP	125 a 140	60 a 80	300 a 450
		120 a 130	35 a 60	300 a 400
Arena Gruesa	SW	110 a 130	20 a 40	200 a 400
Arena Fina	SP	105 a 120	15 a 25	150 a 300
Suelos de Material Granular con Alto Contenido de Finos				
Grava - Limosa Grava - Areno - Limosa	GM	130 a 145	40 a 80	300 a 500
Arena - Limosa Arena - Limo - Gravosa				
Grava - Arcillosa Grava - Areno - Arcillosa	GC	120 a 140	20 a 40	200 a 450
Arena - Arcillosa				
Suelos de Material Fino **				
Limo	ML, OL	90 a 105	4 a 8	25 a 165
Limo - Arenoso Limo - Gravoso		100 a 125	5 a 15	40 a 220
Limo Mal Graduado	MH	80 a 100	4 a 8	25 a 190
Arcilla Plástica	CL	100 a 125	5 a 15	25 a 255
Arcila Medianamente Plástica	CL, OL	95 a 125	4 a 15	25 a 215
Arcilla Altamente Plástica	CH, OH	80 a 110	3 a 5	40 a 220

* estos rangos de K aplican para estratos homogéneos de suelo de por lo menos 3 metros de espesor. Si un estrato de suelo de menos de 3 metros existe sobre un suelo más blando, el valor de K deberá corresponder al del suelo blando inferior y se podrá considerar el incremento de K debido al estrato superior. Si por el contrario existiera un estrato de roca el valor de K deberá ser ajustado.

** el valor de K de los suelos finos depende en gran medida del grado de saturación, por lo que se recomienda realizar una corrección de por este efecto.

viii) Drenaje

En cualquier tipo de pavimento el drenaje es un factor determinante en el comportamiento de su estructura a lo largo de su vida útil, por lo que también lo es en el diseño del mismo. Es muy importante evitar que exista agua en la estructura de soporte, dado que afectará en gran medida la respuesta del pavimento.

Algunos aspectos que deben de cuidarse para evitar que el agua penetre en la estructura de soporte son:

- Mantener perfectamente selladas las juntas del pavimento.
- Sellar las juntas entre pavimento y acotamiento o cuneta.
- Colocar barreras rompedoras de capilaridad donde se requieran.
- Utilizar un sistema de drenaje adecuado con cunetas, bordillos, lavaderos, contra-cunetas y subdrenajes.

Los valores que se recomiendan para el coeficiente de drenaje varían entre 1.0 y 1.1.

2.1.3. Método de la Asociación del Cemento Portland (PCA)

El método de diseño de la Portland Cement Association (PCA) para autopistas y carreteras fue publicado inicialmente en 1966. En 1984 se presentó una nueva versión que toma en cuenta aspectos adicionales de diseño como:

- Modos de falla por fatiga no tradicionales, tales como erosión del terreno de cimentación del pavimento.
- Concreto sin refuerzo como capa de sub-base.
- Acotamientos de concreto.
- Pavimentos sin mecanismos de transferencia de cargas en las juntas transversales (pasajuntas). El trabajo entre juntas se desarrolla por fricción entre los agregados del concreto.

El criterio de la PCA está basado en diseños de pavimentos generales, funcionamiento, e investigación de experiencias, incluyendo la correlación del desempeño de los pavimentos en la prueba AASHO y los estudios de falla.

A. Criterio de diseño

Uno de los principales aspectos de diseño en el método de la PCA es la inclusión de un análisis por erosión, adicional al análisis por fatiga. Mientras que el análisis por fatiga reconoce que el pavimento puede fallar por esta causa en el concreto, en el análisis por erosión, el pavimento puede fallar por drenaje, erosión de la cimentación y por defecto de juntas.

i) Análisis por fatiga

Se basa en análisis de esfuerzos-deflexiones críticos debido a las posiciones de carga mostradas en la Fig. 2.4, este análisis se utiliza para mantener los esfuerzos que se producen dentro de los límites de seguridad, ya que el paso de cargas sobre las losas del pavimento producen esfuerzos que se convierten en agrietamientos.

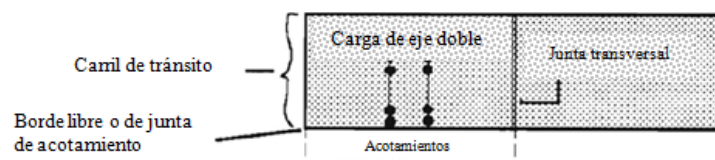


Fig. 2.4. Análisis por fatiga, método de la PCA.

ii) Análisis por erosión

Los problemas que se presentan en los pavimentos tales como drenaje, erosión del terreno de cimentación y defecto de juntas están más relacionados con deflexiones en el pavimento que con esfuerzos por flexión. La

deflexión más crítica ocurre en la esquina de la losa cuando una carga de eje está colocada en la junta cerca de la esquina, como se muestra en la Fig. 2.5.

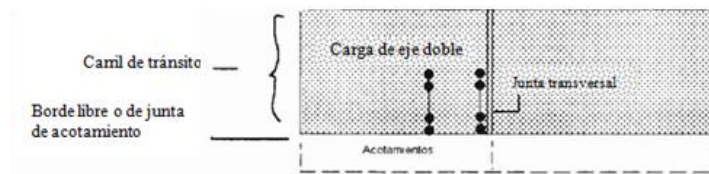


Fig. 2.5. Análisis por erosión, método de la PCA.

B. Factores de diseño

Una vez seleccionado el tipo de pavimento de concreto, sub-base y acotamiento, la determinación del espesor se basa en cuatro factores: 1) resistencia a la flexión del concreto (módulo de ruptura MR), 2) soporte de la subrasante y sub-base (módulo de reacción k), 3) periodo de diseño y 4) tránsito.

i) Resistencia a la flexión del concreto.

Para la resistencia a la flexión del concreto se aplica el procedimiento tratado en el criterio de fatiga, que controla el agrietamiento del pavimento bajo la repetición de cargas. Esa resistencia se determina con pruebas del módulo de ruptura realizadas en vigas de 15 x 15 x 75 cm (6 x 6 x 30 pulgadas). El módulo de ruptura se obtiene aplicando la carga ya sea: a) en cantiliver, b) en el punto medio ó c) en tres puntos. Una diferencia importante en las pruebas es que al aplicar la carga en tres puntos se obtiene la mínima resistencia del tercio medio de la viga de prueba, mientras que las otras dos pruebas se determina la resistencia en un solo punto.

El valor obtenido en el método de aplicación de carga de tres puntos (ASTM C78) es el que utiliza la PCA. En este procedimiento, los efectos de las variaciones en la resistencia del concreto de punto a punto del pavimento y el incremento de resistencia con el paso del tiempo están incorporados en las gráficas y tablas de diseño. En ellas se ingresa el valor de la resistencia promedio a los 28 días. Para México se recomienda como mínimo 41 kg/cm² (583 psi) y como máximo 50 kg/cm² (711 psi).

ii) Soporte de la subrasante y sub-base

El soporte dado por la subrasante y la sub-base a los pavimentos de concreto, es el segundo factor en el diseño de espesores. La subrasante está definida en términos del módulo de reacción (k) definido por la relación:

$$k=p/\delta \quad (2.12)$$

donde:

p = presión (esfuerzo) aplicada en kg/cm².

δ = deflexión de la placa en cm.

k = módulo de reacción.

Los valores de k son expresados normalmente como $\text{kg/cm}^2/\text{cm}$ ó con más frecuencia en kg/cm^3 . El módulo de reacción k de las capas de apoyo generalmente se determina con placas de 76.2 cm (30”) de diámetro; también se utiliza una serie de placas de 45 a 60 cm, apiladas, para minimizar los efectos de flexión. En otros países se emplean placas hasta de 30 cm de diámetro para obtener las capacidades de carga superficiales y también los módulos de reacción. Las cargas pueden aplicarse con ayuda de gatos hidráulicos.

Dado que las pruebas de placa implican tiempo y costo, es frecuente que los valores de k se estimen mediante correlaciones con pruebas más simples, como es el valor relativo de soporte VRS . El resultado es suficientemente válido ya que no se requiere una exacta determinación del valor de k , que en variaciones normales no afecta significativamente los requerimientos de espesor del pavimento.

En la “prueba AASHO” se comprobó que la reducción de pérdida de soporte del terreno durante los períodos de descongelamiento tiene poco efecto en el espesor requerido de los pavimentos de concreto.

Contar con una sub-base permite incrementar el valor de k que se utilizará en el diseño de espesores. Si la sub-base es de material granular no tratado ó mejorado, el incremento puede no ser muy significativo como se aprecia en la Tabla 2.15. Las sub-bases mejoradas ó tratadas con cemento aportan mayor capacidad de carga y su comportamiento a largo plazo es mucho mejor, por lo que son muy utilizadas para pavimentos de concreto con tránsito pesado. Los valores de diseño de k para sub-bases cementadas que cumplen con éste criterio se muestran en la Tabla 2.16.

Tabla 2.15. Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una sub-base granular

k de la subrasante		k de la sub-base							
kg/cm^3	pci	4 in (10.16 cm)		6 in (15.24 cm)		9 in (22.86 cm)		12 in (30.48 cm)	
		kg/cm^3	pci	kg/cm^3	pci	kg/cm^3	pci	kg/cm^3	pci
1.38	50	1.74	63	2.08	75	2.35	85	3.04	110
2.77	100	3.60	130	3.88	140	4.43	160	5.26	190
5.54	200	6.09	220	6.37	230	7.47	270	8.86	320
8.30	300	8.86	320	9.13	330	10.24	370	11.90	430

Tabla 2.16. Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una sub-base granular cementada

k de la subrasante		k de la sub-base							
kg/cm^3	pci	4 in (10.16 cm)		6 in (15.24 cm)		8 in (20.32 cm)		10 in (25.40 cm)	
		kg/cm^3	pci	kg/cm^3	pci	kg/cm^3	pci	kg/cm^3	pci
1.38	50	4.71	170	6.37	230	8.58	310	10.80	390
2.77	100	7.75	280	11.07	400	14.39	520	17.72	640
5.54	200	13.01	470	17.72	640	22.97	830	-	-

iii) Período de diseño

Debido a que el tránsito no puede predecirse con suficiente precisión por un período muy largo, en el diseño de pavimentos se emplean comúnmente 20 años. El período seleccionado afecta el espesor de diseño ya que determina por cuantos años y, por tanto, a cuantos camiones debe servir el pavimento.

iv) Tránsito

Toda la información referente al tránsito es necesaria para conocer el número de repeticiones esperadas durante el período de diseño de cada tipo de eje. Para obtener esos valores se requieren conocer factores como: 1) el tránsito promedio diario anual (TPDA), 2) el porcentaje que representa cada tipo de eje en el TPDA, 3) el factor de crecimiento del tránsito, 4) el factor de sentido, 5) el factor de carril y 6) el período de diseño.

- Número de repeticiones esperadas (R_e). Se determina mediante la expresión:

$$R_e = (TPDA) (\%T_e)(FS)(FC)(P_d)(FCA)(365) \quad (2.13)$$

donde:

$TPDA$ = Tránsito Promedio Diario Anual.

$\% T_e$ = % del TPDA para cada tipo de eje.

FS = Factor de Sentido.

FC = Factor de Carril.

P_d = Período de Diseño.

FCA = Factor de Crecimiento Anual.

365 = días de un año.

- Tránsito promedio diario anual (TPDA). Este valor puede obtenerse de aforos especializados ó de registros de algún organismo relacionado con el transporte, municipal, estatal ó federal. Debe especificarse la composición del tránsito, detallando por tipo de vehículo, para poder identificar los pesos de los ejes que circularán sobre el pavimento. El método de diseño de la PCA recomienda considerar únicamente al tránsito pesado, despreciando el tránsito ligero, como son los automóviles y pick-ups de 2 ejes.
- Factor de crecimiento anual (FCA). Para conocer este factor se requiere asumir el período de diseño en años y la tasa de crecimiento anual y se calcula con la expresión:

$$FCA = \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad (2.14)$$

donde:

g = Tasa de crecimiento.

n = Años de vida útil.

Los siguientes factores influyen en las tasas de crecimiento anual y proyecciones de tránsito:

- El tránsito atraído ó desviado. Se refiere al incremento del tránsito debido a la rehabilitación de algún camino existente.

- Crecimiento normal de tránsito. Es el ocasionado por el incremento del número de vehículos.
 - Tránsito generado. Se refiere al incremento provocado por los vehículos que no circularían por la vía si ésta no se hubiese construido.
 - Tránsito por desarrollo. Es el incremento provocado por cambios en el uso del suelo debido a la construcción de la nueva facilidad.
- Factor de sentido (*FS*). Se emplea para diferenciar las vialidades de un sentido de las de doble sentido, de manera que para las segundas se utiliza un factor de 0.5 y para las primeras un factor de 1.0
 - Factor de carril (*FC*). Está referido al porcentaje de vehículos que circulan por el carril de la derecha, que es el carril con más tránsito. La PCA recomienda emplear la Fig. 2.6 en la cual este factor depende del número de carriles por sentido ó dirección del tránsito y del tránsito promedio diario anual en un solo sentido.

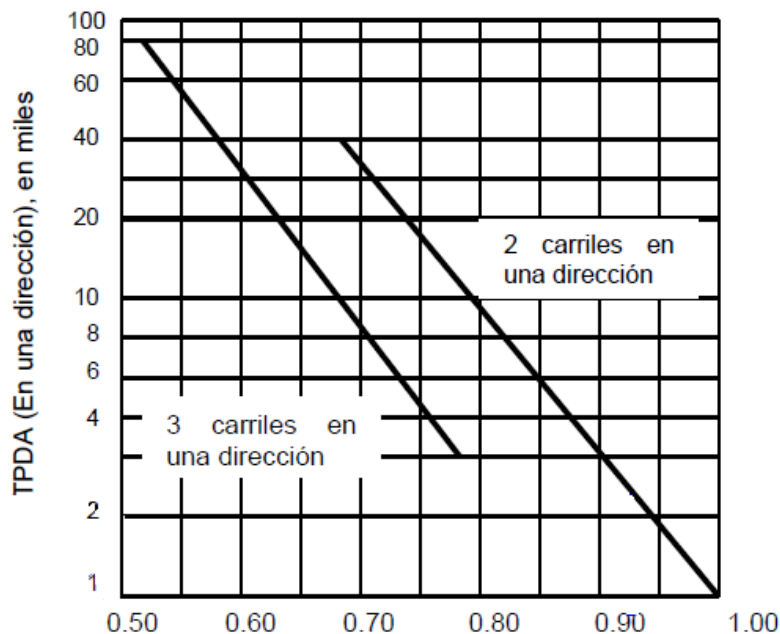


Fig. 2.6. Proporción de vehículos circulando por el carril de baja velocidad en una vialidad de 2 ó 3 carriles.

- Factor de seguridad de carga. Una vez que se conoce la distribución de carga por eje, es decir el número de repeticiones que se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarlo por las cargas por eje. Los factores de seguridad de carga recomendados son:
 - Casos especiales con muy altos volúmenes de tránsito pesado y cero mantenimiento: 1.3
 - Para autopistas ó vialidades de varios carriles en donde se presentará un flujo ininterrumpido de tránsito y altos volúmenes de tránsito pesado: 1.2
 - Autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tránsito pesado: 1.1
 - Caminos y calles secundarias con muy poco tránsito pesado: 1.0

C. Diseño del pavimento

El análisis por fatiga (control de agrietamiento por fatiga) generalmente controla el diseño de pavimentos de tránsito ligero y de tránsito medio con pasajuntas; por su parte, el análisis de erosión rige usualmente el diseño de pavimentos de tránsito medio y pesado sin pasajuntas y de pavimentos de tránsito pesado con pasajuntas.

i) Diseño por fatiga

Considera el número permisible de repeticiones de carga de un grupo dado de ellas, en función de la relación entre el esfuerzo flexionante actuante y la resistencia a la flexión del concreto a los 28 días, la cual es conocida como “relación de esfuerzos”. Ésta se define por la relación del daño acumulado en el periodo de diseño, se calcula el número de repeticiones permitidas para un rango de cargas (por tránsito) dado, valor que se compara con el número de repeticiones esperadas en un período de diseño.

$$D_r = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.15)$$

donde:

D_r = relación del daño acumulado en el periodo de diseño.

m = total de grupos de carga.

n_i = número pronosticado de repeticiones del grupo de cargas “i”.

N_i = número de repeticiones de carga permisibles del grupo de carga “i”.

La curva de diseño entre repeticiones permisibles y la relación de esfuerzos se introducen en el nomograma de dimensionamiento de pavimentos de la Fig. C.1, del Anexo C.

Se acepta que si un grupo de carga no consume la totalidad de fatiga permisible, el remanente estará disponible para los otros grupos. La sumatoria de todos los consumos de fatiga nunca deberá ser mayor al 100 %.

Con este método los esfuerzos por fatiga se determinan en las orillas, de manera que los pavimentos sin acotamientos de concreto tendrán mayores concentraciones de esfuerzo. Es por ello que para obtener los esfuerzos equivalentes en estas dos condiciones, la PCA presenta las tablas del Anexo D. Una vez definidos los esfuerzos equivalentes, la proporción o razón de esfuerzos se determina dividiendo aquellos entre la resistencia a la flexión, para obtener las repeticiones admisibles en el nomograma de la Fig. C.1, del Anexo C.

El valor del módulo de ruptura que se considera es a los 28 días. El nomograma cubre dos casos: pavimentos con y sin pasajuntas. En caso de que el número de repeticiones admisibles se localice fuera de los límites contemplados en la gráfica, entonces se asume que tal número es ilimitado.

ii) Diseño por erosión

El criterio de diseño por erosión se apoya en correlaciones respecto a lo observado en los tramos de la prueba AASHO, ya que en ellos los tipos de falla de los pavimentos de concreto se relacionan más con las deflexiones excesivas y problemas de bombeo por erosión en la sub-base y/o subrasante.

La erosión generada en las esquinas de las losas promueve la generación de esfuerzos críticos; su magnitud queda determinada por el tipo y la disposición de juntas. En el Anexo E se presentan los factores de erosión para el caso de pavimentos con pasajuntas y sin acotamientos, los factores para el caso de que la transferencia de carga entre losas sea a través de fricción, y también sin acotamientos y los factores correspondientes al pavimento que cuenten con acotamientos ligados también de concreto.

Una vez fijado el factor de erosión, se determina el número de repeticiones admisible a través de los nomogramas de las Fig. C.2 y Fig. C.3, del Anexo C.

2.2. CRITERIO DE DISEÑO APLICADOS EN REINO UNIDO.

El manual de diseño para carreteras y puentes (*Design Manual for Roads and Bridges*, DMRB) fue introducido en 1992 en Inglaterra y Gales, y posteriormente en Escocia e Irlanda del Norte. Una versión modificada es el Manual de diseño para carreteras y puentes de la Autoridad Nacional de Caminos (*National Roads Authority Design Manual for Roads and Bridges*, NRA DMRB), fue formalmente introducida para su uso en Irlanda a partir de 2001. El Manual se desarrolló con la contribución de una serie de documentos publicados por las Organizaciones de Supervisión de Inglaterra (*The Highways Agency*), Escocia (*The Scottish Office Development Department*), Gales (*The Welsh Office*) e Irlanda del Norte (*The Department of the Environment for Northern Ireland*). Estos documentos, junto con adiciones posteriores, han sido recopilados en una serie consecuente de volúmenes dentro del manual.

El método de diseño de pavimentos en el Reino Unido se ha desarrollado de la combinación de experiencias, investigaciones de laboratorio y pruebas en pavimentos de concreto a escala natural. La mayor parte de las investigaciones han sido realizadas durante años por el Laboratorio de Investigación de Transporte (*Transport Research Laboratory*, TRL) que operaba anteriormente como Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (*Transport and Road Research Laboratory*, TRRL).

La publicación del TRL RR87 (Mayhew & Harding, 1987) proporciona resultados del estudio del comportamiento de los pavimentos de concreto sin refuerzo (URC) y de pavimentos de concreto reforzado con juntas (JRC) en pistas de prueba, en las que se consideró una vida útil de 30 años, sujetas a cargas de tránsito de más de 30 millones de ejes simples.

El diseño es puramente empírico y está basado en el monitoreo del comportamiento de un número significativo de vialidades en el Reino Unido, así como en los resultados de pruebas de pavimentos de concreto a escala natural, usando métodos analíticos para racionalizar y ampliar los datos.

2.2.1. Factores de diseño

En Reino Unido se considera que el desgaste estructural de los pavimentos en carreteras por efecto del tránsito, es decir, el agrietamiento por fatiga en los límites de las capas del pavimento y/o deformación excesiva de la subrasante y el diseño de pavimento, están intrínsecamente relacionadas.

El desgaste estructural de un pavimento de carretera se calcula mediante factores de desgaste basados en cargas por eje del vehículo. Los factores de desgaste presentados en las normas británicas fueron generados utilizando cargas reales, medidas con sensores de peso en movimiento instalados en la red de carretera del Reino Unido.

A. Tránsito de diseño

El tránsito de diseño corresponde a la carga de vehículos comerciales durante un cierto período, expresado como el número de ejes equivalentes estándar de 8.2 t (80 kN). Se calcula utilizando el flujo de vehículos comerciales, factores de crecimiento del tránsito y factores de desgaste por efecto del tránsito.

El flujo futuro de tránsito acumulado, en términos de millones de ejes estándar (msa) para cada clase de vehículo, T_i se determina con la ecuación:

$$T_i = (365)(F)(Y)(G)(W)(P)(10^{-6}) \quad (2.16)$$

$$T = \sum T_i \quad (2.17)$$

donde:

F = Flujo de vehículo comercial.

Y = Periodo de diseño.

G = Factor de crecimiento.

P = Porcentaje de vehículos comerciales en el carril más cargado.









W = Factor de desgaste.

i) Flujo de vehículo comercial (F).

Este parámetro se expresa como el promedio anual de flujo diario (AADF) y corresponde al flujo medido en una dirección. Si el tránsito es medido en ambas direcciones, se convierte en AADF suponiendo una división direccional de 50:50, a menos que el recuento de tránsito o estudios muestren una tendencia direccional significativa.

Los vehículos comerciales son aquellos con peso bruto vehicular mayor a 3.5 t. El desgaste estructural causado por el tránsito ligero (motocicletas, autos y vehículos de carga ligeros) se considera insignificante. La Tabla 2.17 identifica las clases y categorías de vehículos comerciales (cv) consideradas en la Norma.

Tabla 2.17. Clases y categorías de vehículos comerciales

Vehículo comercial (cv)	Clase *	Categoría
	Autobuses	PSV
	2 - ejes rígidos	OGV1
	3 - ejes rígidos	
	3 - ejes articulado	OGV2
	4 - ejes rígido	
	4 - ejes articulado	
	5 - ejes articulado	
	6 - ejes articulado	
*Clasificados según ejes en contacto con el pavimento. PSV: Vehículos de servicio público. OGV: Otros vehículos de carga		

La composición de flujo promedio típico de vehículos comerciales se presentan en la Tabla 2.18 (Departamento de Transporte RU, 2003). Existe una amplia variación en la proporción de vehículos comerciales en la red carretera de Reino Unido y los valores de la tabla pueden ser superados en muchos casos. Para el diseño de carreteras nuevas, el porcentaje de vehículos OGV2 se obtiene por cálculo o estudios, pero no puede ser inferior al porcentaje dado en la Fig. 2.7.

Tabla 2.18. Composición de flujo promedio típico de vehículos comerciales en Reino Unido

Tipo de carretera	Autopista o troncal	Principal
Porcentaje de vehículos comerciales (% cv) en AADF	11	4
% OGV2	65	38

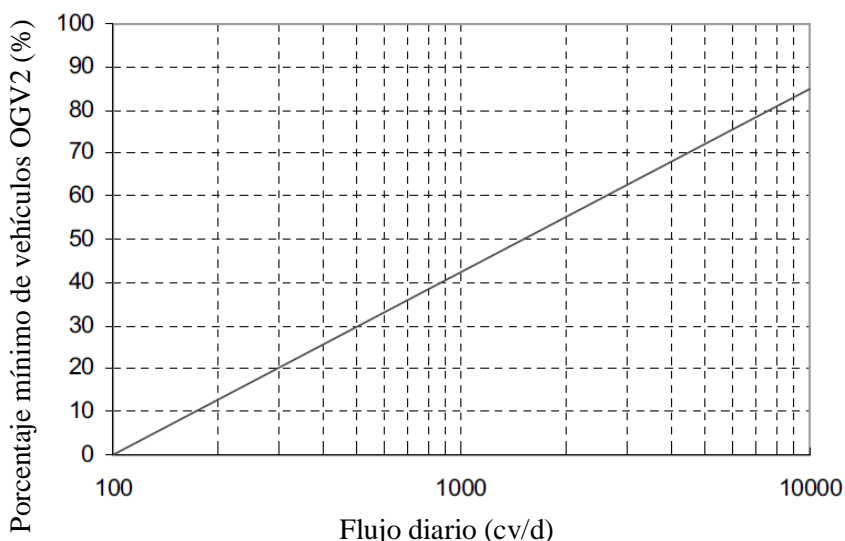


Fig. 2.7. Porcentaje mínimo de vehículos clase OGV2 para construcción nueva

ii) Periodo de diseño (Y)

Se refiere al número de años en el que el tránsito es evaluado. Para el tránsito pasado, se toma generalmente el número de años transcurridos desde la apertura o el último mantenimiento estructural importante. Para el tránsito de diseño futuro, usualmente se considera de 40 años.

iii) Porcentaje de vehículos comerciales en el carril más cargado (P)

Todos los carriles se diseñan bajo el régimen de carga del carril más cargado. Las Fig. 2.8 y Fig. 2.9 se utilizan para calcular el tránsito de diseño del flujo total, es decir, para todos los carriles en una sola dirección, durante un período de 40 años. El carril más cargado para carreteras con dos o tres carriles es comúnmente el carril interno conocido como carril 1; sin embargo, para carreteras con cuatro o más carriles no es siempre el carril 1. Se considera además que las intersecciones con carriles de salida y de entrada de vehículos influyen en el flujo de vehículos en cada carril.

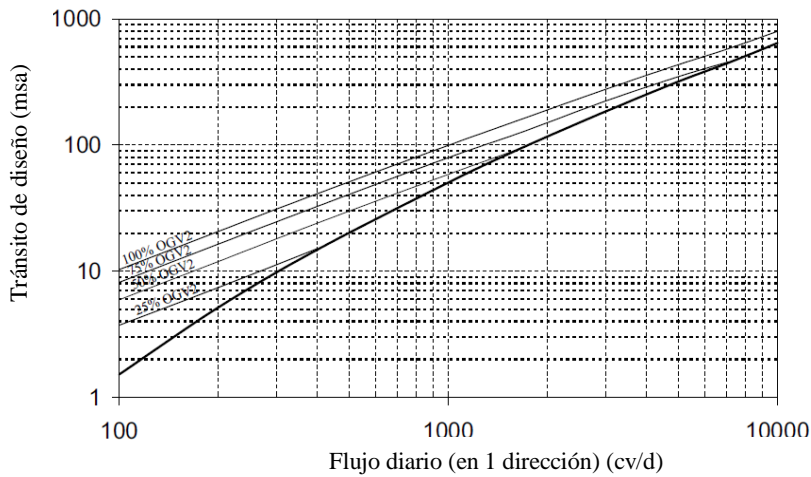


Fig. 2.8. Tránsito de diseño para 40 años de vida útil

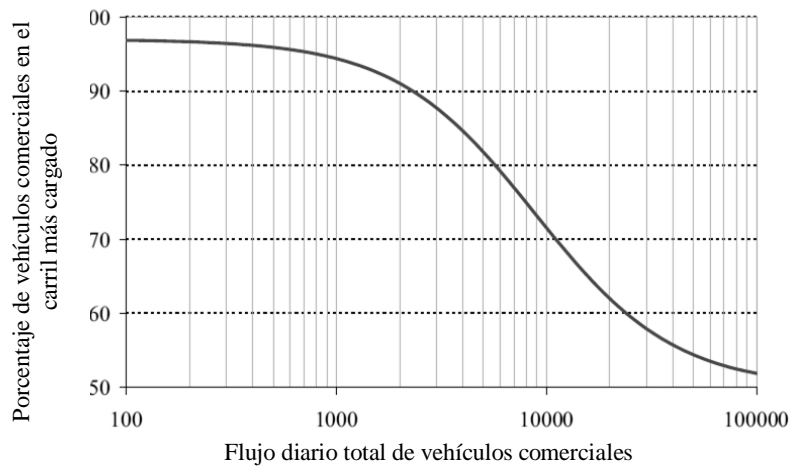


Fig. 2.9. Porcentaje de vehículos comerciales en el carril más cargado (P)

iv) Factor de crecimiento (G)

El factor de crecimiento representa la diferencia proporcional entre el flujo de vehículos promedio durante el período de diseño completo y el flujo actual (o flujo en la apertura). Los estudios de conteo de tránsito por periodos de al menos 10 años, pueden utilizarse como un indicador de las tendencias futuras en una situación particular. El Pronóstico Nacional de Tráfico en Caminos (*National Road Traffic Forecast*, NRTF) para Reino Unido es publicado en intervalos de ocho años y predice futuras tendencias. Sin embargo, la norma permite usar datos locales más confiables.

v) Factor de desgaste (W)

El desgaste estructural de una carretera está asociado a cada vehículo que circula. El desgaste se incrementa significativamente con el aumento de la carga por eje. Aunque existen otros métodos, el desgaste estructural para fines de diseño de pavimentos en el Reino Unido se supone proporcional a la cuarta potencia de la carga por eje.

$$\text{Desgaste por eje} \propto L^4 \quad (2.18)$$

donde:

$$L = \text{Carga por eje}$$

Por lo tanto, un aumento del 50% de la carga por eje resulta en un incremento de cinco veces el desgaste estructural calculado.

Un eje estándar se define como el eje que ejerce o aplica una fuerza de 8.2 t (80 kN). La Tabla 2.19 presenta los factores de desgaste para el diseño de pavimentos de concreto, derivados del reporte del TRL PPR 066 (2006). Los datos utilizados para calcular estos factores fueron obtenidos a partir de doce sitios principales de censo situados a lo largo de la red carretera de la Dirección General de Carreteras y de datos de tránsito recopilados en 2003.

Tabla 2.19. Factor de desgaste para clases y categorías de vehículos comerciales

Vehículo comercial cv		Factor de desgaste W
Clase	Buses	3.9
	2 - ejes rígidos	0.6
	3 - ejes rígidos	3.4
	4 - ejes rígido	4.6
	3 y 4 - ejes articulados	2.5
	5 - ejes articulado	4.4
	6 - ejes articulado	5.6
Categoría	OGV1 + PSV	1.0
	OGV2	4.4

B. Diseño de la sub-base y subrasante

Las normas británicas consideran a la sub-base y subrasante como la “cimentación” de las losas de concreto, y tiene como propósito principal distribuir en el terreno subyacente las cargas vehiculares aplicadas.

La Norma considera cuatro tipos de “cimentación” de las losas, definidas por el “módulo superficial de cimentación”, que es una medida del “módulo de rigidez” (*stiffnes modulus*) de las capas subyacentes. A este módulo de rigidez, las normas lo definen como la relación del esfuerzo aplicado entre la deformación unitaria inducida, y se calcula a partir del valor de CBR, con la siguiente fórmula:

$$E = 17.6(CBR)^{0.64} \quad (2.19)$$

donde:

E : valor del módulo superficial de la cimentación, en MPa

CBR^1 : valor de CBR de la cimentación

El módulo superficial de cimentación está basado en la aplicación de una carga conocida en la parte superior de la sub-base y es un valor compuesto con aportaciones de todas las capas bajo ellas.

Las cuatro clases son las siguientes²:

- Clase 1 $\geq 510 \text{ kg/cm}^2$ (50 MPa)
- Clase 2 $\geq 1020 \text{ kg/cm}^2$ (100 MPa)
- Clase 3 $\geq 2040 \text{ kg/cm}^2$ (200 MPa)
- Clase 4 $\geq 4080 \text{ kg/cm}^2$ (400 MPa)

Las capas que comprenden esa cimentación son la sub-base (sea granulares o de suelos estabilizados), la capa de protección (*capping*) y la subrasante, ya sea de relleno compactado o del terreno natural, como se muestra en la Fig. 2.10.

Para el diseño de la subrasante, la Norma considera dos métodos de diseño: i) diseño restringido y ii) diseño por rendimiento.

¹ El valor de CBR se determina con la prueba de placa conforme a la norma BS 1377-9 1990, la norma incluye una correlación del CBR con el módulo de reacción, a través de la siguiente fórmula:

$$CBR = 6.1 \times 10^{-8} (k_{762})^{1.733}$$

donde:

CBR: valor de CBR de la cimentación, en %.

k_{762} : es el módulo de reacción, se define como la presión (MPa) aplicada en la placa de carga dividida por el desplazamiento, que es normalmente 1.25 mm, con una placa de 762 mm de diámetro.

² Factor de conversión: 1MPa = 10.1972 kg/cm².

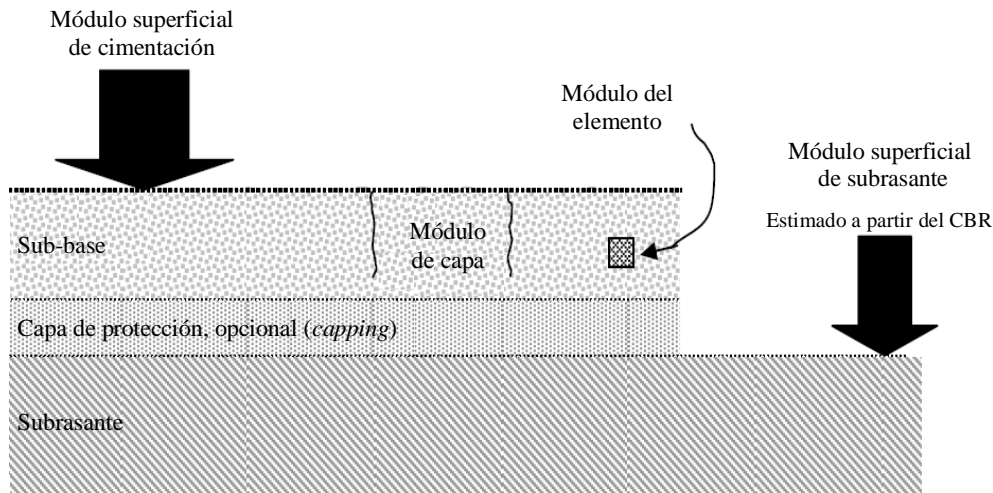


Fig. 2.10. Estructura de la cimentación de la losa de concreto

El diseño restringido permite un número limitado de diseños que se aplicarán sólo para cimentaciones de las clases 1, 2 y 3, particularmente destinados a proyectos de alcance limitado. Los diseños son conservadores, previendo la incertidumbre en el comportamiento de los materiales y en el espesor de la capa.

El diseño por rendimiento abarca los cuatro tipos de cimentaciones y reconoce que no todos los materiales tienen propiedades iguales, lo que permite aprovechar materiales mejorados y ensayados en campo, ajustando el diseño de acuerdo a los resultados obtenidos en esos ensayos. Lo anterior permite reducciones en el espesor de las capas superiores y asegurar que se cumplan los requisitos de diseño.

i) Diseño restringido

Este diseño se utiliza en los casos en que no puedan llevarse a cabo todas las pruebas requeridas por las especificaciones relacionadas con el comportamiento de las cimentaciones.

- Requerimientos de la subrasante. El módulo de superficie de la subrasante se estima a partir del valor relativo de soporte, VRS (CBR); para el diseño se utiliza su valor más bajo a largo y a corto plazo. La Norma permite la utilización de otros métodos siempre que pueda demostrarse una correlación satisfactoria con el método de referencia. Antes de iniciar la construcción de la cimentación de la losa debe comprobarse el valor del VRS in-situ, el cual debe ser igual o mayor que el de diseño. Si el VRS in-situ es menor que el de diseño (2.5% menor), la subrasante debe mejorarse hasta alcanzar el valor de diseño o rediseñar la “cimentación”.
- Diseño de espesor. El diseño restringido sólo es aplicable a las cimentaciones Clases 1, 2 y 3. Los espesores requeridos para cada clase de cimentación se muestran en la Fig. 2.11 y en la Fig. 2.12. Las

figuras hacen referencia tanto a los valores de rigidez en MPa, como a los valores de VRS de la superficie de la subrasante, %. El espesor de diseño se redondea a los 10 mm superiores más cercanos.

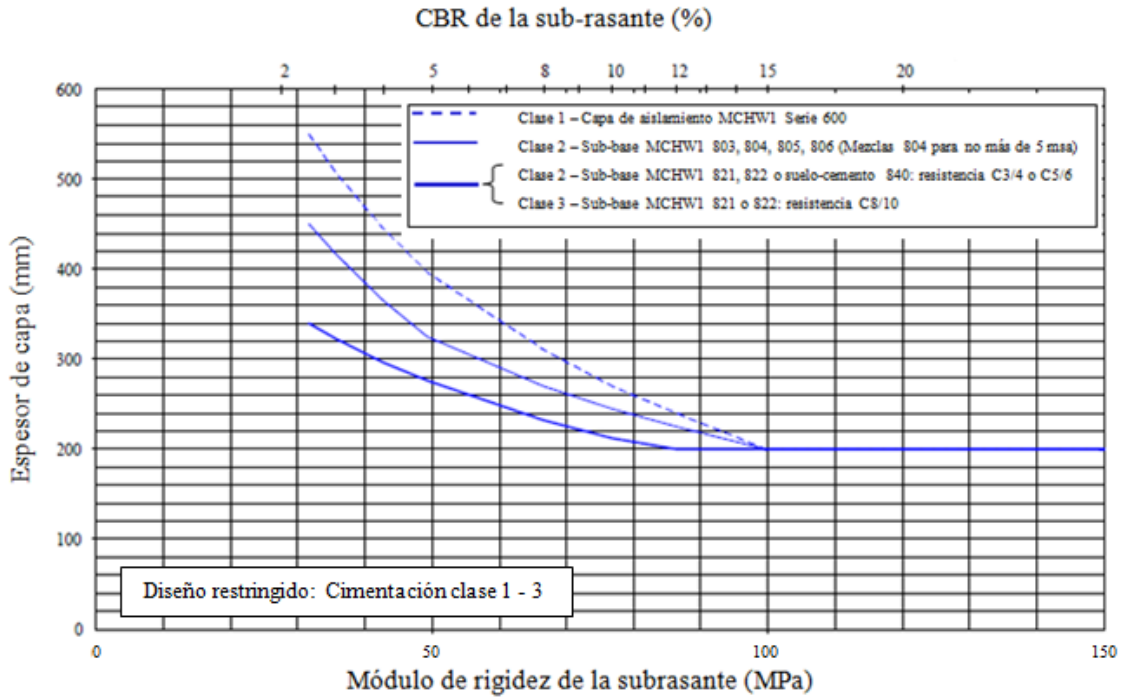


Fig. 2.11. Opciones de diseño restringido para sub-base o capa de protección

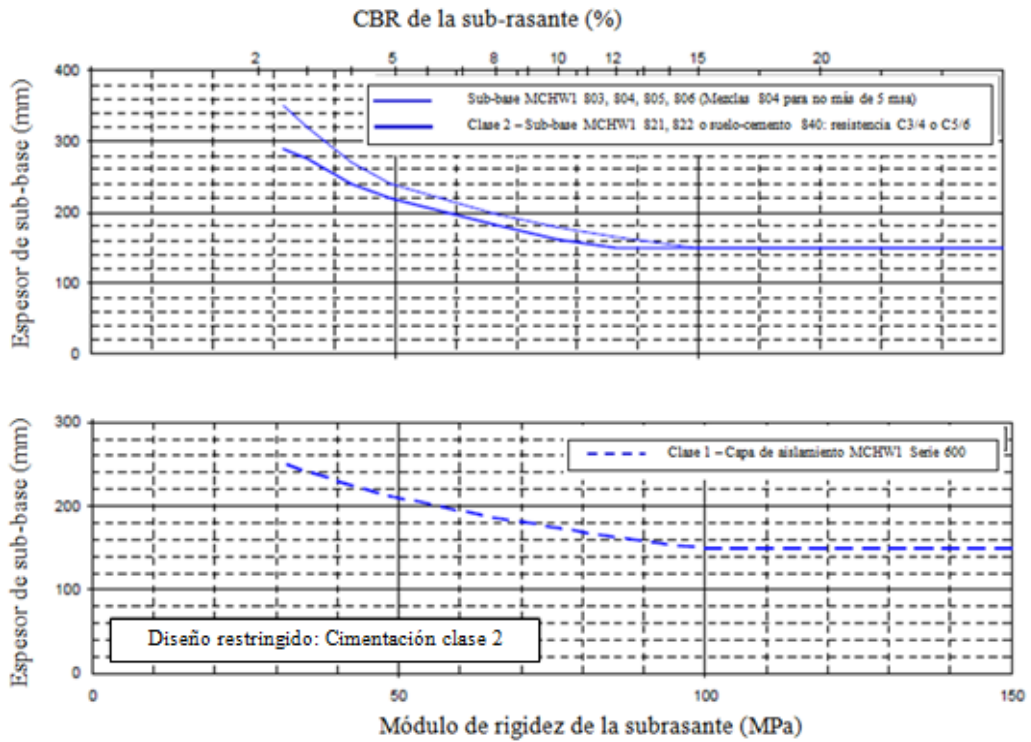


Fig. 2.12. Opciones de diseño restringido para sub-base clase 2 sobre capa de protección

– Subrasante Clase 1³

Está incluido en el diseño restringido, pero no puede utilizarse en autopistas diseñadas para más de 20 msa, debido a que aumenta la probabilidad de daños durante su construcción. Para su uso se requiere diseñarla por rendimiento.

– Subrasante Clase 2⁴

En las gráficas de las Fig. 2.11 y Fig. 2.12 se presentan cuatro opciones de diseño diferentes dependiendo si se utilizan: sub-bases granulares, cementadas, y si se utiliza una capa de protección (*capping*). Se puede hacer uso de mezclas de sub-base granular (*Granular Subbase Mixtures*, cláusulas 803, 805 y 806 de la serie 800), mezclas de suelo granular cementado (*Cement Bound Granular Mixtures*, cláusulas 821 y 822 de la serie 800) y suelo-cemento (*Soil Cement*, cláusula 840 de la serie 800).

La capa de protección puede incorporarse como parte de la cimentación (ver Fig. 2.10). Las mezclas de suelo granular cementado y de suelo-cemento deben alcanzar por lo menos la resistencia a la compresión C3/4⁵. Las mezclas de sub-base granular (cláusula 804 de la serie 800) pueden usarse para pavimentos con niveles de tránsito de diseño mayores de 5 msa.

– Subrasante Clase 3

Está limitada a mezclas de suelo granular cementado (*Cement Bound Granular Mixtures*, cláusulas 821 y 822 de la serie 800) que alcancen al menos la resistencia a la compresión C8/10.

Para todas las clases de cimentaciones, el uso de una capa de protección brinda beneficios prácticos, proporcionando una plataforma de trabajo y una buena base para la compactación de las capas superiores, lo cual puede ser particularmente apropiado para sub-bases de menor resistencia.

ii) Diseño por rendimiento

Este método se basa en pruebas de capacidad para confirmar las propiedades físicas que son críticas para el proceso de diseño, a fin de garantizar la uniformidad entre los diferentes materiales y minimizar la exclusión

³ Puede usarse cualquier capa de protección (*capping*, usada para proteger la subrasante de daños) dadas en la Tabla 6/1 de la Serie 600. La superficie terminada debe seguir los criterios de la Serie 700 de las especificaciones del Manual de documentos contractuales para obras de carreteras (*Manual of Contract Documents for Highway Works*, MCDHW).

⁴ Serie 800 de las especificaciones del Manual de documentos contractuales para obras de carreteras (*Manual of Contract Documents for Highway Works*, MCHW).

⁵ De acuerdo con las Normas BS EN 206-1:2000, BS 8500:2002 y BS EN 206-1, la clase de concreto según la resistencia a la compresión, se expresa:

- Prefijo: “C” para concreto normal y pesado o “LC” para concreto liviano.
- Mínima resistencia a la compresión requerida de un cilindro de concreto de 150 × 300 mm.
- Una barra invertida (/).
- Mínima resistencia a la compresión requerida de un cubo de concreto de 150 mm (en RU 100 mm).

innecesaria de materiales. El proceso de diseño, construcción y pruebas de capacidad se resume en la Fig. 2.13.

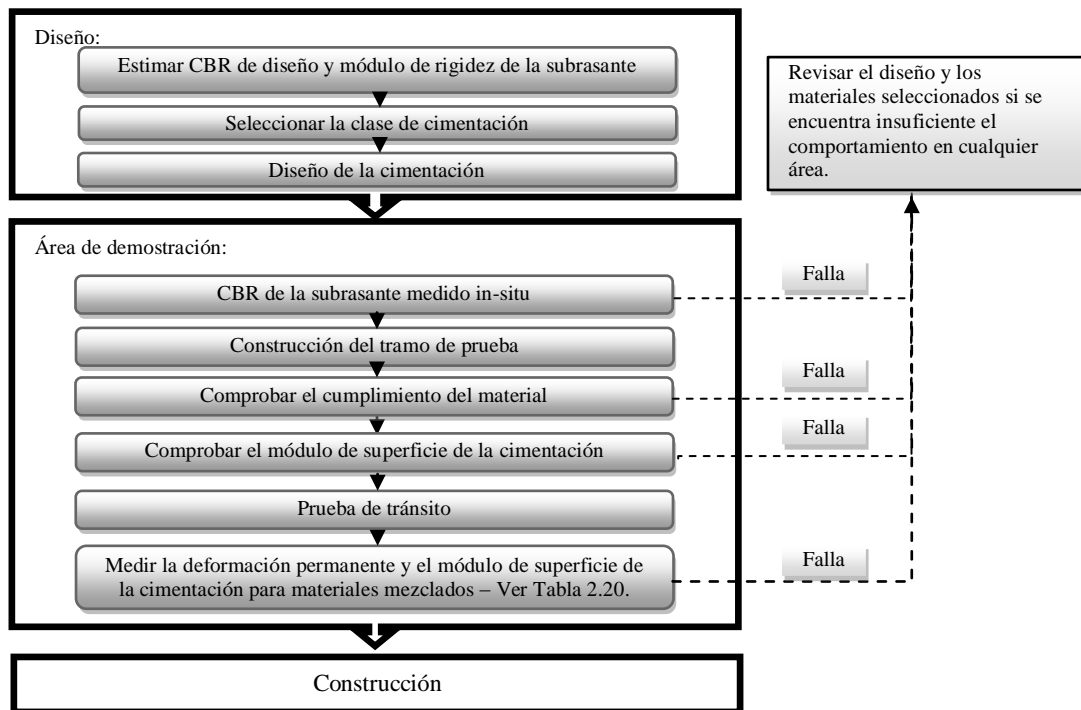


Fig. 2.13. Diagrama de flujo de diseño por rendimiento

Tabla 2.20. Requerimientos de módulo de superficie del subrasante

		Módulo de superficie (MPa)			
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Módulo de superficie en servicio a largo plazo		≥ 50	≥ 100	≥ 200	≥ 400
Módulo de superficie de la cimentación medio	Mezclas no tratadas	40 ♦	80 ◇	*	*
	Mezclas de fraguado rápido	50 ♦	100	300	600
	Mezclas de fraguado lento	40 ♦	80	150	300
Módulo de superficie de la cimentación mínimo	Mezclas no tratadas	25 ♦	50 ◇	*	*
	Mezclas de fraguado rápido	25 ♦	50	150	300
	Mezclas de fraguado lento	25 ♦	50	75	150

♦ Sólo está permitido en carreteras como las autopistas que están diseñados para no más de 20 msa (Norma HD26).
 ◇ No permitida para pavimentos diseñados para 80 msa o superior.
 * Materiales no tratados con pocas probabilidades de alcanzar los requisitos de los terraplenes Clase 3 y 4.
 Factor de conversión: 1MPa = 10.1972 kg/cm²

en las que:

- Mezclas no tratadas. Mezclas incluidas en las especificaciones de la Serie 800.
- Mezclas de fraguado rápido. Mezclas tratadas que alcanzan más del 50% de su resistencia a la compresión después de 28 días de curado a 20°C.
- Mezclas de fraguado lento. Mezclas tratadas que alcanzan el 50% o menos de su resistencia a la compresión después de 28 días de curado a 20°C.
- Módulo de superficie de la cimentación medio. Se define como la media de cinco mediciones consecutivas, in-situ, del módulo de superficie de la cimentación. Se espera que los resultados tengan una dispersión significativa debido a la variabilidad inherente de la subrasante, la inconsistencia de la sub-base y los materiales de recubrimiento.
- Módulo de superficie de la cimentación mínimo. Se define como el valor que debe ser excedido por todas las medidas individuales del módulo de superficie de la cimentación in-situ.

Para el área de demostración, los valores seleccionados de la Tabla 2.20, que deben alcanzarse o superarse, se ajustan mediante la siguiente ecuación:

$$E_{\text{ajustado}} = E (1 + (0.28 \text{Ln} (CBR_{\text{in-situ}}/CBR_{\text{diseño}}))) \quad (2.20)$$

donde:

E_{ajustado} : valor ajustado del módulo de superficie de la cimentación (medio o mínimo).

E : valor del módulo de superficie de la cimentación medio o mínimo tomado de la Tabla 20.

$CBR_{\text{in-situ}}$: actual CBR in-situ del área de demostración.

$CBR_{\text{diseño}}$: CBR de diseño.

2.2.2. Diseño del pavimento

El criterio de diseño está basado en el Reporte del TRL 630 para pavimentos rígidos continuo y en el Reporte del TRL RR87 (1987) para pavimentos rígidos con juntas.

A. Consideraciones para el diseño de espesores para pavimentos rígidos continuos reforzados.

Para un pavimento rígido, continuo, el espesor total se obtiene de la parte derecha CRCP (*Continuously Reinforced Concrete Pavement*) del nomograma de la Fig. 2.14 y de la parte izquierda CRCB (*Continuously Reinforced Concrete Base*) del nomograma para una base de concreto con refuerzo continuo. El espesor para un determinado tránsito de diseño depende de la resistencia a la flexión del concreto y del tipo de cimentación de la losa.

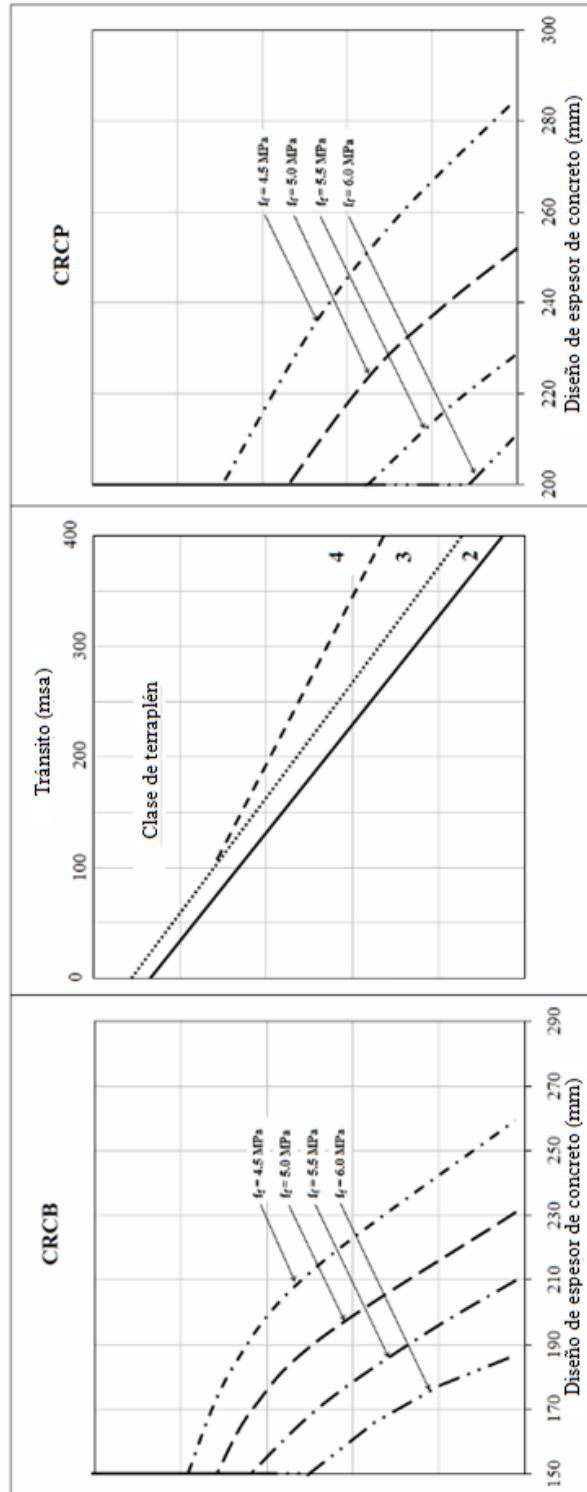


Fig. 2.14. Diseño de espesor para pavimento rígido continuo reforzado

El nomograma para pavimento rígido continuo reforzado (CRCP) considera la presencia de una franja de borde mínimo de 1 m o acotamientos ligados, adyacentes al carril con mayor tránsito pesado. En caso contrario, se debe incrementar el espesor en 30 mm.

El espesor mínimo permisible es de 200 mm de concreto para la construcción de CRCP y 150 mm para la de CRCB. El espesor del concreto en la Fig. 2.14 no incluye el asfaltado; el espesor mínimo permisible es de 100 mm de material asfáltico para la construcción de CRCB.

El acero longitudinal para el control de grietas en el CRCP debe ser 0.6% de la sección transversal de la losa de concreto, que comprende barras de acero de 16 mm de diámetro y el acero transversal deben ser barras de 12 mm de diámetro con un espaciamiento de 600 mm.

El acero longitudinal para el control de grietas en el CRCB debe ser 0.4% de la sección transversal de la losa de concreto, que comprende barras de acero de 12 mm de diámetro y el acero transversal deben ser barras de 12 mm de diámetro con un espaciamiento de 600 mm.

El concreto de resistencia a la flexión de 56.1 kg/cm² (5.5 MPa) o más; se deben utilizar agregados que tengan un coeficiente de dilatación térmica inferior a 10×10^{-6} por ° C.

B. Consideraciones para el diseño de espesor para pavimento rígido con juntas.

En los pavimentos articulados de concreto, el esfuerzo inducido por las cargas en las esquinas y bordes de las losas es mayor que en el centro, requiriendo barras de pasador para distribuir las cargas entre las losas. Los esfuerzos en la junta ocurren principalmente cuando los pasadores no funcionan correctamente.

Los diseños para pavimentos de concreto con juntas están basados en el Reporte del TRL RR87 (1987) y están relacionados con la resistencia a la compresión del concreto.

Para pavimentos articulados de concreto sin refuerzo (URC), se aplica la ecuación:

$$\ln(H_1) = \{ \ln(T) - 3.466 \ln(R_c) - 0.484 \ln(E) + 40.483 \} / 5.094 \quad (2.21)$$

y para pavimentos de concreto reforzado con juntas (JRC):

$$\ln(H_1) = \{ \ln(T) - R - 3.171 \ln(R_c) - 0.326 \ln(E) + 45.150 \} / 4.786 \quad (2.22)$$

donde:

H_1 : es el espesor en mm de la losa de concreto, sin acotamientos ligados o franjas de borde de 1 m.

Mínimo 150 mm.

T : es el tránsito de diseño en millones de ejes estándar (msa). Máximo 400 msa.

R_c : es la media al cubo de la resistencia a la compresión a los 28 días (N/mm² o MPa).

E : es la rigidez de la clase de la cimentación en MPa.

$R = 8.812$ para $500 \text{ mm}^2/\text{m}$ de acero de refuerzo.

$R = 9.071$ para $600 \text{ mm}^2/\text{m}$ de acero de refuerzo.

$R = 9.289$ para $700 \text{ mm}^2/\text{m}$ de acero de refuerzo.

$R = 9.479$ para $800 \text{ mm}^2/\text{m}$ de acero de refuerzo.

El espesor de una losa de concreto con acotamientos ligados o franjas de borde de 1 m, se calcula con la expresión:

$$H_2 = 0.934 H_1 - 12.5 \quad (2.22)$$

donde:

H_2 : es el espesor en mm de la losa de concreto, con acotamientos ligados o franjas de borde de 1 m.

Para pavimentos URC, el máximo espaciamiento transversal entre juntas, es:

- Espesores de losas hasta 230 mm: 4 m juntas de contracción.
- Espesores de losas mayores a 230 mm: 5 m juntas de contracción.

En pavimentos RJC el máximo espaciamiento de juntas transversales es de 25 m, en los que los agregados tienen un coeficiente de dilatación térmica no menor a 10×10^{-6} por $^{\circ}\text{C}$; se hace excepción de las losas con acero de refuerzo menor a $600 \text{ mm}^2/\text{m}$, donde el máximo espaciamiento entre juntas depende del espesor de la losa, como se indican a continuación:

- Espesores de losas hasta 280 mm: máximo 25m.
- Espesores de losas hasta 290 mm: máximo 24m.
- Espesores de losas hasta 300 mm: máximo 23m.
- Espesores de losas hasta 310 mm: máximo 22m.
- Espesores de losas hasta 320 mm: máximo 21m.
- Espesores de losas mayores a 330 mm: máximo 20m.

En los pavimentos JRC, el refuerzo longitudinal mínimo permitido es de $500 \text{ mm}^2/\text{m}$. Si se utiliza concreto con agregados que tienen un coeficiente de dilatación térmica menor a 10×10^{-6} por $^{\circ}\text{C}$, el espaciamiento de las juntas transversales debe incrementarse 20%.

2.3. CRITERIOS DE DISEÑO APLICADOS EN ESPAÑA.

En agosto de 1939, dentro del Plan de Obras Públicas se aprobó la Primera Instrucción de Carreteras Españolas que contiene normas sobre secciones de pavimentos. Esta Instrucción estuvo vigente hasta junio

de 1961, cuando se derogó por las condiciones de tránsito y como consecuencia del Plan General de Carreteras de 1960.

La “Norma 6.1-IC. Firmes⁶ y Pavimentos Flexibles” fue aprobada por Orden Ministerial de 21 de Marzo de 1963 y la “Norma 6.2-IC. Pavimentos rígidos de hormigón hidráulico” por Orden Ministerial de 22 Abril de 1964. La primera está basada en el método CBR y en la experiencia española, pero la coincidencia de su publicación con los resultados del ensayo AASHO, y el aumento del límite legal de carga por eje simple de 10 a 13 t, así como el incremento de la circulación en los años siguientes, las dejaron prácticamente obsoletas.

En 1974, en la Dirección General de Carreteras se constituyó la Comisión Permanente de Normas, la cual luego de la revisión de las normas de 1963 y 1964, publicó en marzo de 1976 las Normas 6.1-IC y 6.2-IC de firmes flexibles y firmes rígidos vigentes hasta hace unos años. Las secciones de pavimentos se definieron según criterios de experiencia y tomando como base los dimensionamientos con los métodos AASHO, SHELL⁷, Asphalt Institute y Road Note 29.

En julio de 1986 se publica el documento “Secciones de firmes en autovías”, que deroga a la parte de las Normas 6.1-IC y 6.2-IC en lo que se opone a dicho documento. En mayo de 1989 se presenta la Instrucción 6.1 y 2-IC definitiva, que sustituye a la provisional de 1986 y que complementa a ésta en lo relativo a los tipos de vía y categoría de tránsito no contemplados en las vialidades urbanas.

Para adaptar el incremento del tránsito al estado actual de las carreteras españolas, a la evolución tecnológica de los materiales y a sistemas constructivos específicos de la pavimentación, en diciembre de 2003 se aprueba la Norma 6.1 IC “Secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras, derogando la Instrucción 6.1 y 2-IC “Secciones de firme” y aquellas disposiciones de igual o inferior rango a lo dispuesto en ésta. Por otra parte, esta norma presenta un nuevo cuadro de subrasantes que supone una mejora de las propiedades resistentes de las mismas, uniformidad estructural, durabilidad e insensibilidad frente a la acción del agua.

El catálogo de esta Norma se ha evaluado mediante métodos analíticos de dimensionamiento. Estos métodos permiten estimar los esfuerzos y deformaciones a los que está sometido el pavimento, para posteriormente compararlos con valores patrón dados por el criterio de falla. Son procedimientos que, aunque realizan una simplificación del fenómeno de la fatiga de un pavimento, permiten relacionar cualitativamente el comportamiento teórico de los pavimentos durante su vida útil.

El análisis del comportamiento estructural teórico de las distintas secciones de pavimento del catálogo de secciones de esta Norma se realizó por medio del método empírico de la AASTHO, en su versión de 1993, y

⁶ Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados, y generalmente tratados, que constituye la superestructura de la plataforma, resiste las cargas del tránsito y permite que la circulación tenga lugar con seguridad y comodidad.

⁷ El método SHELL considera la estructura del pavimento de concreto asfáltico como un sistema multicapa linealmente elástico, bajo la acción de las capas del tránsito.

sus resultados contrastados con el método analítico que recoge la Guía Técnica del Laboratorio Central de Caminos y Puentes (LCPC) de Francia⁸.

2.3.1. Factores de diseño

Se considera al tránsito y a la subrasante como dos factores fundamentales que afectan el comportamiento de los pavimentos. Todos los métodos modernos de diseño califican a estos factores mediante patrones similares que miden, respectivamente, el tránsito pesado que ha de resistir el pavimento y la capacidad de soporte de la subrasante.

A. Tránsito pesado

Durante su vida útil, la estructura del pavimento debe adecuarse a la acción del tránsito más pesado. Por ello, la sección estructural del pavimento depende en primer lugar de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que se prevea en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio. Esta intensidad se utiliza para establecer la categoría de tránsito pesado.

i) Periodo de servicio

Los pavimentos se proyectan para el tránsito previsto durante un cierto periodo de servicio, en el cual se espera que las fallas producidas no alcancen un grado incompatible con la comodidad del usuario; es decir, se supone que durante el periodo de servicio no será necesario un refuerzo mayor del considerado en la conservación ordinaria o en una rehabilitación.

El valor del periodo de proyecto no está definido en la Norma 6.1 IC, si bien desde 1975 habitualmente se adopta 20 años para los pavimentos flexibles, semiflexibles y semirrígidos, y 30 años para los de concreto hidráulico.

ii) Carril de diseño

El espesor del pavimento generalmente es uniforme, aún cuando no lo sea la sollicitación del tránsito a lo ancho de la calzada. Como carril de diseño se adopta aquél por el cual circula el mayor número de vehículos pesados, que son los determinantes en el diseño del pavimento.

En caso de no disponer de datos sobre asignación por carriles, en la determinación de la categoría de tránsito pesado se admite lo siguiente:

- a) En calzadas de dos carriles y con doble sentido de circulación, incide sobre cada carril la mitad de los vehículos pesados que circulan por la calzada.

⁸ A partir del 01 de enero 2011, el Laboratorio Central de Caminos y Puentes (LCPC) se fusionó con el Instituto Nacional de Investigación de Transportes y Seguridad (INRETS) creando el Instituto Francés de Ciencia y Tecnología de Transporte, Acondicionamiento y Redes (IFSTTAR).

- b) En calzadas de dos carriles por sentido de circulación, se considera en el carril exterior la categoría de tránsito pesado correspondiente a todos los vehículos pesados que circulan en ese sentido.
- c) En calzadas de tres o más carriles por sentido de circulación, se considera que actúa sobre el exterior el 85% de los vehículos pesados que circulan en ese sentido.

iii) Vehículos pesados

Para diseño sólo se consideran los vehículos pesados. La estructura del pavimento es función de la intensidad media diaria de los vehículos pesados (IMDp) prevista para el carril de diseño en el año de puesta en servicio. Esta intensidad puede estimarse a partir de los aforos, de la proporción de vehículos pesados y de datos disponibles, para prever su evolución, especialmente del tránsito generado después de la puesta en servicio.

Para estimar la evolución de tránsito pesado, se utiliza como tasa de crecimiento el valor medio de las obtenidas en los últimos 5 años en la estación de aforo permanente o de control más próxima al tramo de estudio.

Al adoptar en los cálculos un valor de IMDp máximo representativo de la categoría de tránsito pesado para la sección, se define un único valor (τ) que representa la categoría de tránsito, a partir del cual se pasaría a la categoría superior, con el siguiente criterio:

- Tránsito T00: $\tau = 7.000$ vehículos pesados (en ausencia de límite superior)
- Tránsitos T0, T1 y T2: τ dado por la expresión:

$$\frac{\log_{10} \tau}{\log_{10} IMDp_{max}} = 0.99 \quad (2.24)$$

- Tránsitos T31, T32, T41 y T42: τ dado por la expresión:

$$\frac{\log_{10} \tau}{\log_{10} IMDp_{max}} = 0.98 \quad (2.25)$$

donde:

τ : es el valor límite razonable de la categoría de tránsito. En las Tabla 2.21 y Tabla 2.22 se presentan los valores de límite razonable " τ " de categoría de tránsito.

$IMDp_{max}$: es el valor del extremo superior del intervalo que limita la categoría de tránsito a la que pertenece la IMDP.

iv) Categorías de tránsito

La Norma 6.1 IC, define 8 categorías de tránsito pesado, según la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp), que se prevea para el carril de proyecto en el año de puesta de servicio. La Tabla 2.21 presenta las categorías T00 a T2, y la Tabla 2.22 las categorías T3 y T4, que se dividen a su vez.

Tabla 2.21. Categoría de tránsito pesado T00 a T2

Categoría de tránsito pesado	T00	T0	T1	T2
IMDp (Vehículos pesados/día)	≥ 4000	< 4000 ≥ 2000	< 2000 ≥ 800	< 800 ≥ 200
τ (Valor límite razonable)	7000	3682	1854	748

Tabla 2.22. Categoría de tránsito pesado T3 y T4

Categoría de tránsito pesado	T31	T32	T41	T42
IMDp (Vehículos pesados/día)	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25
τ (Valor límite razonable)	171	87	44	22

En los casos que se justifique que los ejes de los vehículos pesados pudieran estar especialmente sobrecargados, debe adoptarse una categoría de tránsito pesado inmediatamente superior (en las inferiores a la T00), sobre todo en los valores próximos al límite superior de la categoría correspondiente. Del mismo modo se procede en los casos de tramos en rampa con inclinaciones medias superiores al 5%, o superiores al 3% en el caso de que la longitud sea superior a 500 m.

B. Formación de la subrasante

La Norma 6.1 IC establece tres categorías o tipos de subrasante, denominadas respectivamente E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Ev_2) de una prueba de carga con placa, obtenida según la Norma NLT-357, como ilustra la Tabla 2.23.

Tabla 2.23. Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga

Categoría de subrasante	E1	E2	E3
Ev_2 (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300
Factor de conversión: $1\text{MPa} = 1.0197 \times 10^{-6} \text{ t/m}^2$			

En el Anexo F, se indica la formación de las distintas categorías de subrasante, las cuales dependen del tipo del terreno de cimentación y, de las características y espesores de los materiales disponibles.

i) Criterio de aplicación

- Todos los espesores que se indican en el Anexo F son los mínimos especificados para cualquier punto de la sección transversal de la subrasante.
- Los materiales empleados deben cumplir las disposiciones contenidas en los artículos correspondientes del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales⁹ (PG-3), además de las complementarias presentada en la Norma 6.1 IC.
- En el Anexo F se estructura según el tipo de suelo de la subrasante en el caso de los desmontes, o de la terracería subyacente en el caso de los rellenos (terraplenes, pedraplenes o rellenos todo-uno). Se consideran los siguientes tipos:

IN, inadecuados y marginales.

0, tolerables.

1, adecuados.

2, seleccionados.

3, seleccionados con VRS (CBR) ≥ 20 en las condiciones de puesta en obra.

R, roca.

Para la aplicación de la norma, los pedraplenes (artículo 331 del PG-3) y los rellenos todo-uno (artículo 333 del PG-3), salvo que se proyecten con materiales marginales a los definidos en el artículo 330 del PG-3, son asimilables a los suelos tipo 3.

- Para asignar a los suelos de la subrasante o de la terracería subyacente una determinada clasificación, deben tener un espesor mínimo de 1 m del material indicado en el Anexo F. En caso contrario, se asignará la clasificación inmediatamente inferior.
- Salvo justificación en contrario, para la formación de la subrasante del tipo E2 y E3 en las categorías de tránsito pesado T00 a T2, debe proyectarse una capa de separación (estabilización in situ con cal en 15 cm de espesor, geotextil, membrana plástica) entre los suelos inadecuados o marginales con finos plásticos y las capas de suelo adecuado o seleccionado,.
- Los espesores prescritos en el Anexo F no pueden reducirse aunque se utilicen materiales de calidad superior a la especificada en cada una de las secciones.

ii) Materiales para formar la subrasante

En la Tabla 2.24 se indican los materiales utilizados en la formación de la capa subrasante.

⁹ El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3) para obras de carreteras y puentes, constituye un conjunto de instrucciones para el desarrollo de las obras de carreteras y puentes, y contiene las condiciones técnicas normalizadas referentes a los materiales y a las unidades de obra.

Tabla 2.24. Materiales para la formación de la subrasante

Símbolo	Definición del material	Artículo del PG-3	Prescripciones complementarias
IN	Suelo inadecuado o marginal	330	• Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2.
0	Suelo tolerable	330	• $CBR \geq 3$ (*). • Contenido en materia orgánica < 1%. • Contenido en sulfatos solubles (SO ₃) < 1%. • Hinchamiento libre < 1%.
1	Suelo adecuado	330	• $CBR \geq 5$ (*) (**).
2	Suelo seleccionado	330	• $CBR \geq 10$ (*) (**).
3	Suelo seleccionado	330	• $CBR \geq 20$ (*).
S-EST1 S-EST2 S-EST3	Suelo estabilizado in-situ con cemento o cal	512	• Espesor mínimo: 25 cm. • Espesor máximo: 30 cm.
<p>(*) El CBR se determinará de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra, y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en las diferentes capas, de acuerdo al Anexo F.</p> <p>(**) En la capa superior de las empleadas para la formación de la subrasante, el suelo adecuado definido como tipo 1 deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, un $CBR \geq 6$ y el suelo seleccionado definido como tipo 2 un $CBR \geq 12$. Asimismo, se exigirán esos valores mínimos de CBR cuando, respectivamente, se forme una subrasante de categoría E1 sobre suelos tipo 1, o una explanada de categoría E2 sobre suelos tipo 2.</p>			

2.3.2. Catálogo de secciones de pavimentos

El catálogo se basa en las relaciones que existen entre las intensidades de tránsito pesado y los niveles de deterioro admisibles al final de la vida útil, para cada tipo de sección estructural. En el Anexo G se presentan las secciones de pavimentos que resultan, según la categoría de tránsito pesado y la categoría de subrasante.

Cada sección de pavimento se designa por un número de tres o cuatro cifras:

- La primera cifra (si son tres) o las dos primeras cifras (si son cuatro), indican la categoría de tránsito pesado, desde T00 a T42.
- La penúltima cifra expresa la categoría de la subrasante, desde E1 a E3.
- La última cifra hace referencia al tipo de pavimento, con el siguiente criterio:

1: Mezclas bituminosas sobre capa granular.

2: Mezclas bituminosas sobre suelo-cemento.

3: Mezclas bituminosas sobre grava-cemento construida sobre suelo-cemento.

4: Pavimento de concreto hidráulico.

i) Concreto hidráulico

La nomenclatura adoptada para los concretos hidráulicos empleados en los pavimentos rígidos corresponde a “Hormigón de Firme” (HF), seguida del valor de la resistencia característica a la flexo-tensión a los 28 días expresada en megapascales (MPa). Estos concretos deben cumplir con las especificaciones fijadas en el artículo 550 del PG-3.

Para carreteras con categoría de tránsito pesado T00 a T2 se utiliza concreto hidráulico HF-4.5 (Hormigón Firme con MR=4.5 MPa). Para las categorías T1 y T2 podrá emplearse HF-4.0 (Hormigón Firme con MR=4.0 MPa) incrementando en 2 cm los espesores indicados por el Catálogo de Secciones de Pavimento (véase Anexo G).

Para carreteras con categoría de tránsito pesado T1 y T2, el pavimento será de concreto sin refuerzo, con juntas provistas de pasadores. Si se justifica técnica y económicamente, en pavimentos de carreteras con categoría de tránsito pesado T1 puede emplearse pavimento continuo de concreto armado, lo cual permite reducir hasta 4 cm en los espesores establecidos en el Catálogo de Secciones de Pavimentos (véase Anexo G).

Para carreteras con categoría de tránsito pesado T3 (T31 y T32) y T4 (T41 y T42), el pavimento será de concreto sin refuerzo, con juntas sin pasadores. Para estas categorías de tránsito pesado se usa concreto hidráulico tipo HF-4.0 (Hormigón Firme con MR=4.0 MPa) o HF-3.5 (Hormigón Firme con MR=3.5 MPa) incrementando en 2 cm los espesores dados en el catálogo de secciones de pavimentos (véase Anexo G).

La cuantía geométrica¹⁰ del pavimento continuo de concreto armado es de 0.7% para HF-4.5 (Hormigón Firme con MR=4.5 MPa) y del 0.6% para HF-4.0 (Hormigón Firme con MR=4.0 MPa). Asimismo en este tipo de pavimentos se disponen anclajes al terreno de las secciones extremas y en las secciones especiales que lo requieran.

¹⁰ Cuantía geométrica es la relación existente entre el área de la sección transversal de acero y el área de la sección transversal del concreto.

CAPITULO 3. CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

En este capítulo se describe el proceso constructivo general de pavimentos de concreto hidráulico y se tratan algunos aspectos relevantes de las normas aplicadas en México, Reino Unido y España, al respecto.

3.1. TERRACERÍAS Y CAPA SUBRASATE

Las terracerías se definen como los volúmenes de material que se extraen y/o se utilizan como rellenos para la construcción de una vía terrestre. La extracción puede hacerse a lo largo de la línea o tramo de la vía. Si todo el volumen extraído se usa en la construcción de los terraplenes o rellenos, se dice que la terracería es “compensada”; el volumen de corte que no se usa se denomina “desperdicio”. Si el volumen que se extrae en la línea o tramo no es suficiente para construir los terraplenes o rellenos, se requiere extraer material fuera de ella, es decir, en zonas de préstamos; si estas zonas se encuentran a unos 10 - 100 m a partir del centro del tramo, se denominan “préstamos laterales”; si estas zonas se encuentran a más de 100 m se les conoce como “préstamos de banco”.

Las principales actividades que involucran la construcción de terracerías son las siguientes:

3.1.1. Desmonte y despalme del terreno natural

Esta es la primera actividad que se realiza en un proyecto que involucra movimientos de tierras. La actividad de desmonte y despalme se define como la remoción de árboles, raíces, árboles caídos, ramas, escombros y cualquier tipo de material inaceptable que se encuentre dentro del área de construcción de la carretera y en la de los bancos de préstamo de material.

El desmonte es la remoción de vegetación y materiales que se encuentren en el derecho de vía y en las zonas de bancos, entre otras, con objeto de eliminar la presencia de material vegetal. El desmonte comprende la tala (corte de árboles y arbustos), la roza (corte y retiro de maleza, hierba, zacate o residuo de siembras), el desenraice (extracción de troncos o tocones con o sin raíces) y la limpieza y disposición final (retiro del producto del desmonte al banco de desperdicios que indique el proyecto o apruebe la Institución).

El despalme es la remoción del material superficial del terreno, de acuerdo a lo que establezca el proyecto, con objeto de evitar la mezcla del material de las terracerías con materia orgánica o con depósitos de material no utilizable.

3.1.2. Excavaciones

Las excavaciones requeridas en la construcción de carreteras se agrupan según su objetivo en:

- Excavación en carreteras.
- Excavación para estructuras.
- Excavación en bancos de material.

A. Excavaciones para carreteras.

Se realizan en el terreno natural para la construcción de la sub-rasante y/o para construir obras de drenaje. Estas excavaciones se clasifican en: cortes o excavaciones en caja, escalones de liga, excavaciones para canales y afinamiento.

- Cortes o excavaciones en caja. Comprenden aquellas que se efectúan a cielo abierto en terreno natural, ampliaciones de taludes, rebajes de la corona de cortes o terraplenes existentes y en derrumbes, con el fin de preparar y formar la sección del pavimento proyectado.
- Escalones de liga. Son excavaciones en el terreno natural o en el cuerpo de terraplenes existentes cuya pendiente transversal exceda de 25%, para proporcionar apoyo al material que se coloca en la formación de terraplenes nuevos o ampliación de los existentes.
- Excavaciones para canales. Se realizan para formar la sección de cauces artificiales o rectificación de cauces naturales, que capten los escurrimientos y desalojen el agua hacia las alcantarillas, a una cañada inmediata o a una parte baja del terreno, donde el agua no afecte la integridad del pavimento.
- Afinamiento. Son las excavaciones y remoción de materiales que se realizan para perfilar las secciones de terracerías o canales ya construidos.

B. Excavación para estructuras

Se agrupan en esta categoría las excavaciones para la construcción de alcantarillas, sean de tuberías o de cajones de concreto, de cimentaciones para puentes, muros de retención y de toda estructura que sea requerida en el proyecto.

C. Excavación en bancos de materiales

Cuando los materiales producto de las excavaciones en el sitio de la carretera no son suficientes o adecuados para la construcción de la capa sub-rasante y de otros elementos de la estructura del pavimento, es necesario importarlos de bancos de préstamos. Los trabajos de excavación en bancos de préstamos son con frecuencia operaciones de movimientos de tierras a gran escala.

3.1.3. Terraplenes

Los terraplenes son estructuras térreas formadas con materiales producto de cortes o de bancos de préstamos, cuando por requerimientos de elevación de la rasante de proyecto se necesita elevar el nivel de terreno, ampliar la corona, cimentar estructuras, formar bermas y bordos, y tender taludes.

Para carreteras con tránsito vehicular menor a 5,000 vehículos diarios, el terraplén se divide en cuerpo del terraplén, y capa subrasante con un espesor mínimo de 30 cm. Para carreteras de tránsito superior a 5,000

vehículos diarios, entre el cuerpo del terraplén y la capa subrasante se acostumbra colocar una capa llamada “subyacente”. En la Fig. 3.1 se muestra la sección transversal típica de un terraplén.

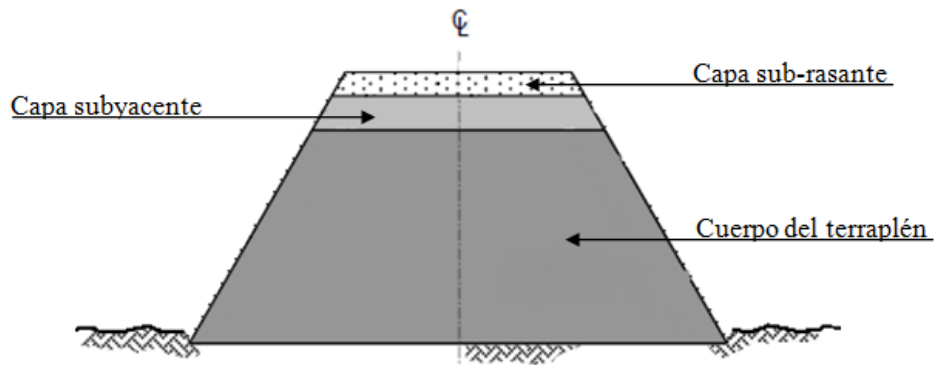


Fig. 3.1. Sección transversal de un terraplén

- **Cuerpo del terraplén.** La finalidad del cuerpo del terraplén es proporcionar la altura necesaria para cumplir con las especificaciones geométricas, resistir las cargas del tránsito que se transfieren por las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor para transmitirlos al terreno natural.

Los materiales utilizados para su construcción deben tener un tamaño máximo de 7.6 cm (3") y límite líquido menor a 50%, expansión máxima de 5%, valor de soporte de California VRS, (CBR) de 5% mínimo, y grado de compactación de 90% respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida en prueba AASHTO estándar del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba. En ningún caso se utilizará materiales orgánicos ni producto de despalmes.

- **Capa subyacente.** Es una capa intermedia entre el cuerpo del terraplén y la capa subrasante, de 30 a 70 cm de espesor, que tiene por finalidad resistir las cargas del tránsito que se transfieren desde las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor para transmitirlos al cuerpo del terraplén. Su utilización y espesor dependen del volumen del tránsito esperado.

Los materiales utilizados para su construcción deben tener las siguientes características: tamaño máximo 7.6 cm (3"), límite líquido máximo de 50%, expansión máxima de 3%, VRS de 10% mínimo respecto a la masa volumétrica seca máxima y grado de compactación de $95\% \pm 2$ en prueba AASHTO estándar.

- **Capa sub-rasante.** Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo del terraplén contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

El espesor mínimo de la capa debe ser de 30 cm, el tamaño máximo del material debe ser de 7.6 cm, límite líquido menor a 40%, índice plástico máximo de 12%, VRS de 20% mínimo, expansión máxima de 2% y grado de compactación de $100\% \pm 2$ en prueba AASHTO estándar.

A. Compactación

Es un proceso mecánico destinado a mejorar las características de comportamiento de los materiales térreos que constituyen la sección estructural de las carreteras. Estas características son:

- Deformabilidad, para disminuir la compresibilidad de los suelos e incrementar su estabilidad volumétrica, especialmente ante la absorción o pérdida de agua.
- Resistencia al esfuerzo cortante, con el fin de incrementar su valor.
- Relaciones esfuerzo-deformación, que garanticen un balance adecuado en el comportamiento.

Existen diversos métodos de compactación de materiales en campo. Los más utilizados en la actualidad se agrupan en las siguientes categorías:

- Por amasado
- Por presión
- Por impacto
- Por vibración
- Por métodos mixtos

En los tres primeros métodos se usan compactadores en forma de rodillos; que circulan sobre el terreno que se desea compactar, en los dos últimos hay también equipos con mecanismos diferentes.

El material proveniente de cortes o de bancos son descargados sobre la superficie donde se extenderá, en estaciones a cada 20 m, en tramos no mayores a los que se pueden tender, conformar y compactar en un turno de trabajo.

El material se extiende parcialmente y se le incorpora el agua necesaria para su compactación, por medio de riegos y mezclados sucesivos, hasta alcanzar el contenido de agua de compactación que indique el proyecto y obtener homogeneidad en granulometría y humedad. Luego, se extiende el material en todo lo ancho del terraplén, en capas sucesivas, con un espesor no mayor aquel que el equipo sea capaz de compactar al grado indicado por las especificaciones y se conforman de manera que se obtenga una capa de material sin compactar de espesor uniforme. La compactación se hace longitudinalmente, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada.

B. Terraplenes reforzados

Los terraplenes reforzados son aquellos que se construyen adicionando a su cuerpo elementos transversales, metálicos, plásticos o de otro material, que proporcionan a los rellenos capacidad de resistir esfuerzos de

tensión, permitiendo la construcción de taludes menos tendidos.

La preparación de los rellenos es similar al descrito en el punto A. Una vez preparado el material, se le extiende cubriendo totalmente los planos horizontales del refuerzo, en capas sucesivas, en las que se intercalan los elementos de refuerzo alcanzando la parte superior de la línea de elementos colocados en la orilla del terraplén conformándose de tal manera que se obtenga una capa de material sin compactar de espesor uniforme. La compactación se hace longitudinalmente, de las orillas hacia el centro en las tangentes y del interior al exterior en las curvas, con un traslape de cuando menos la mitad del ancho del compactador en cada pasada, en la franja de la orilla exterior del terraplén en un ancho no menor a 1 m la compactación se hace de forma manual para garantizar la correcta alineación de los elementos de refuerzo que se coloquen en las orillas del terraplén.

C. Recubrimientos de taludes

Con la finalidad de proteger de la erosión al material expuesto en los taludes de cortes o terraplenes, se colocan recubrimientos en ellos de los siguientes tipos:

- Siembra de especies vegetales.
- Mallas vegetales.
- Mallas geosintéticas.
- Mallas metálicas.
- Riego asfáltico.
- Zampeados.

Las especies vegetales deben ser las apropiadas al clima y condiciones del lugar en el que se plantarán. En cuanto a la colocación de mallas, antes de su colocación deben ser cortadas en lienzos o tramos, con las dimensiones adecuadas al sitio en que se va a colocar. En el caso de las mallas metálicas que van a ser cubiertas con concreto lanzado, deben estar libres de residuos de óxido, aceite, materias adheridas a su superficie y de otras sustancias que disminuyan la adherencia del concreto; en general las mallas se colocan siguiendo el contorno de la superficie del talud. Los recubrimientos con riego asfáltico se aplican uniformemente sobre la superficie por cubrir; no deben aplicarse cuando exista amenaza de lluvia o esté lloviendo y cuando la temperatura de la superficie sobre la cual se va aplicar se encuentre por debajo de los 15°C. El zampeado es un recubrimiento de mampostería de piedra o tabique, concreto hidráulico o suelo-cemento.

3.2. SUB-BASE

Esta capa se construye sobre la capa subrasante. Su principal función es proporcionar un apoyo uniforme a

las losa de concreto hidráulico, soportar las cargas que éstas le transmita aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediata inferior, así como previniendo, la migración de finos hacia las capas superiores.

Durante la colocación y tendido del material que constituye esta capa, deben evitarse inclusiones de materiales extraños. Las capas ya compactadas tienen 10 a 20 cm de espesor. Se deben evitar zonas locales o bolsas de materiales con alta plasticidad, así como compactaciones notoriamente irregulares.

La superficie terminada debe estar lisa y paralela a la rasante de proyecto, libre de depresiones, mismas que no deben ser mayores a 2 cm, no importa que el nivel exigido en los planos sea mayor o menor.

Los materiales granulares compuestos por gravas, gravas-arenosas, mezclas de arena, limo y gravas, deben cumplir con los siguientes límites (Norma N-CMT-4-02-002/04):

- Límite líquido máximo: 25%
- Índice de plástico máximo: 6%
- Desgaste Los Ángeles (porción gruesa) máximo: 40%
- Equivalente de arena mínimo: 40%
- Valor soporte de California mínimo: 80%
- Grado de compactación mínimo: 100% en prueba ASSHTO modificada.

Además el material debe tener las características granulométricas de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Requisitos de granulometría para materiales de sub-base

Malla	% que pasa
1 ½"	100
1"	70 - 100
¾"	60 - 100
⅜"	40 - 100
No 4	30 - 80
No 10	21 - 60
No 20	13 - 44
No 40	8 - 31
No 60	5 - 23
No 100	3 - 17
No 200	0 - 10

3.3. DRENAJE Y SUBDRENAJE.

Las obras de subdrenaje se refieren a todas aquellas obras destinadas al control de las aguas subterráneas, que afectan a las vías terrestres por infiltración. Por su parte, las obras para el control de las aguas que llegan a la vía y las afectan por escurrimiento superficial se les llaman obras de drenaje.

3.3.1. Obras de subdrenaje

Las obras de subdrenaje más comunes son las siguientes:

- **Capas drenantes.** Es una capa construida con materiales granulares de una determinada granulometría, que subyace a la estructura del pavimento y permite el flujo del agua subterránea, evitando presiones de poros. Las capas drenantes pueden preverse en zonas de cortes o de terraplenes.

En las zonas de corte la capa drenante se construye encima de la subrasante como primera capa del pavimento conectado a subdrenes longitudinales. En zona de terraplenes, la capa drenante se construye entre el terreno natural y el cuerpo del terraplén sobre suelos compresibles.

- **Subdrenes.** Consisten en una red colectora formada por tuberías perforadas o ranuradas, alojadas en zanjas, para recolectar el agua subterránea, con objeto de controlarla y retirarla de la obra, para minimizar su efecto negativo en las capas estructurales del pavimento. Por su colocación pueden ser longitudinales, si son colocados paralelos al eje de la carretera, o transversales, si son construidos perpendiculares al eje de la carretera o esviados.
- **Geodrenes.** Son sistemas de subdrenajes que utilizan geotextiles como filtro para dejar pasar el agua y evitar la migración de finos, minimizando su efecto negativo en las capas estructurales del pavimento, y permitir la salida del agua para abatir el nivel freático y prevenir la tubificación o erosión interna del subsuelo.
- **Drenes de penetración transversal.** Este sistema consiste en tuberías horizontales, ranuradas e insertadas transversalmente en los taludes de cortes o rellenos para aliviar la presión de poro.

3.3.2. Obras de drenaje

Las principales obras de drenaje superficiales son las siguientes:

- **Bombeo.** Se refiere a la pendiente transversal que se da en las carreteras para permitir que el agua que cae directamente sobre ellas escurra hacia sus dos hombros.
- **Bordillos.** Son estructuras que se colocan en el lado exterior del acotamiento en las secciones en tangente, en el borde opuesto al corte en las secciones en balcón o en la parte interior de las secciones de terraplén en curva, estos elementos interceptan y conducen el agua que por el efecto del bombeo corre sobre la corona del camino, descargándola en los lavaderos, para evitar erosión a los taludes de los terraplenes que están conformados por material erosionable. Estos pueden ser de concreto hidráulico, concreto asfáltico o de suelo-cemento.
- **Lavaderos.** Los lavaderos son canales que se conectan con los bordillos y bajan transversalmente por los taludes, con la misión de conducir el agua de lluvia que escurre de los acotamientos hasta lugares alejados de los terraplenes, donde no causen daños.

- Bajadas. Son estructuras constituidas por un tubo apoyado en la superficie inclinada del terreno o enterrado, cuya función es similar a la de los lavaderos. La tubería puede ser de lámina, provista de juntas capaces de absorber pequeños movimientos por temperatura o por asentamiento del terraplén o del terreno donde se coloque.
- Bordos. Los bordos se construyen para encausar las aguas del terreno natural próximo a la carretera y conducirla a gargantas o cauces naturales, colocándose en la entrada de alcantarillas o puentes, con la finalidad de que el agua cruce apropiadamente por tales estructuras.
- Cunetas. Las cunetas son canales que se adosan a los lados de la corona de la vía y paralelamente al eje longitudinal de la misma. La cuneta se constituye en el extremo del acotamiento, en contacto inmediato con el corte, con la finalidad de recibir el agua superficial proveniente del talud y de la superficie de rodamiento.
- Contracunetas. Son canales excavados en terreno natural o formado por pequeños bordos que se construyen en las laderas localizadas aguas arriba de los taludes de los cortes, con la finalidad de interceptar el agua superficial que escurre ladera abajo desde mayores alturas, para evitar la erosión del talud y congestión de las cunetas y de la corona de la vía, por el agua y material de arrastre.
- Canales interceptores. Son canales construidos con fines de encauzamiento de las aguas superficiales que pueden escurrir hacia la corona de una vía, causando erosiones o depósitos inconvenientes.
- Vados. Son obras que se construyen en las zonas de cruces de caminos con un cauce, para permitir el paso del agua sobre la superficie de rodamiento. Estos se clasifican en:
 - Vados monolíticos, que se construyen a nivel del cauce cuando el arroyo tiene escurrimientos solo en temporada de lluvias normales.
 - Puentes vado, que se construyen mediante tubos o cajones de concreto hidráulico en cauces que tienen gasto pequeño en forma permanente.
- Alcantarillas. Son estructuras para drenaje transversal, es decir, para permitir el paso del agua a través de la vía, en dirección más o menos perpendicular a ella.

3.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS LOSAS DE CONCRETO HIDRÁULICO

3.4.1. Actividades preliminares

Una vez construida y nivelada la capa sub-base, previo a la colocación del concreto hidráulico se verifican que la superficie de ésta se encuentre libre de materias extrañas, polvo, grasa o encharcamientos, sin irregularidades, para la aplicación del riego de impregnación o la colocación de una membrana de polietileno, según se especifique en el proyecto, con el objeto de impermeabilizar la capa sub-base.

Posteriormente se nivelan las cimbras, de preferencia metálicas, alineándose para dar los niveles verticales y horizontales requeridos en el proyecto. En esta etapa se cuidan los aspectos geométricos y de pendientes del pavimento por construir.

3.4.2. Transporte de mezcla

En las obras de pavimentación son aceptables los camiones volteo, ya que normalmente se recomiendan mezclas relativamente secas, con revenimientos bajos (2 a 5 cm). Los camiones revolvedores funcionan mejor cuando los revenimientos en las mezclas son mayores a 4 cm.

Se debe limitar el período de transporte a no más de 30 minutos. Sin embargo, este tiempo puede incrementarse cuando las condiciones ambientales sean favorables y cuando agreguen aditivos que ayuden y retrasen la plasticidad del concreto.

Es recomendable adoptar las siguientes medidas:

- Empleo de aditivo reductor de agua.
- Colocar lonas sobre las mezclas durante el transporte, para evitar secado rápido de la mezcla.
- Evitar la adición de agua para incrementar trabajabilidad.
- En climas calurosos tratar de reducir al mínimo posible las temperaturas en el concreto, disminuir las pérdidas de trabajabilidad y de evaporación.

3.4.3. Colocación y compactación

La colocación del concreto se realiza mediante extendedoras equipadas con tornillo sin fin, barra enrasadora, vibradores, apisonadores, placa niveladora, allanadora de terminado. Usualmente todos estos componentes trabajan con sistemas hidráulicos. La colocación de la mezcla se hace de la caja u olla del camión directamente sobre la sub-base ya preparada, evitando la segregación de las partículas gruesas.

El acomodo y compactación se logra con vibradores superficiales en el caso de losas delgadas, hasta de 15 cm de espesor. Para espesores entre 15 y 22 cm se pueden utilizar los vibradores de superficie o los internos; estos últimos se recomiendan para espesores de losa mayores de 22 cm.

El uso de reglas vibratorias normalmente se utiliza en revenimientos del rango de 2 a 5 cm. Para mezclas rígidas se recomienda ajustar la regla a amplitudes mayores para obtener una compactación satisfactoria a lo largo del espesor. La sobrecarga frente a la regla vibratoria será del orden de 2 cm, con su arista frontal de enrase ligeramente levantada.

En prácticamente todos los casos se recomienda el empleo de los vibradores de inmersión, con el objeto de completar la acción de la regla, principalmente hacia los extremos, en donde la acción de esta última pierde

efectividad. Se aconseja colocar los vibradores en posición lo más vertical posible, con espaciamientos regulares del orden de 50 a 75 cm.

En caso de utilizar vibradores de charola, su frecuencia se ajustará de acuerdo con las velocidades de avance empleadas. Conforme la consistencia del concreto sea más rígida, se incrementarán las amplitudes. Es recomendable limitar a un mínimo la sobrecarga frente a las placas o charolas, ya que mucho material puede entorpecer la colocación.

La verificación del proceso de colocación se realiza al retiro del cimbrado. Si aparecen irregularidades del tipo de porosidades y "panal de abeja", se aconseja: a) acercar más los vibradores a las cimbras, b) aumentar la frecuencia o la amplitud de los vibradores, o finalmente, c) disminuir la velocidad de avance.

Las pavimentadoras con cimbras deslizantes tienen como principal ventaja que reemplaza varios equipos en un proceso de pavimentación convencional, con uso solo operador. El acabado manual se reduce al mínimo; además, al no existir cimbras laterales, se elimina la labor de colocación y manejo de las mismas. Existen diversos fabricantes de pavimentadoras de cimbras deslizantes, las cuales varían en detalles de diseño y operación. Todas operan bajo el mismo principio. Cada máquina tiene un sistema de guía electrónico que opera desde un alambre tenso para mantener la línea y el grado.

Las pavimentadoras con cimbras deslizantes cuentan con un mecanismo para el manejo del concreto, que se divide en recepción y acomodo, vibrado y compactación, y perfilado. La distribución del material al frente de la pavimentadora, que es el primer contacto entre la mezcla y el equipo, se logra mediante un tornillo sinfín, controlado por el operador, que permite transportar, repartir y dosificar el concreto hacia los lados de la máquina. Entre el sinfín y la plancha de cimbrado, algunas pavimentadoras cuentan con un depósito que contiene los vibradores internos, cerrado frontalmente por el "strike-off" y eventualmente el chasis de la máquina. El "strike-off" es una cuchilla ajustable, que puede ampliar o reducir el espesor del concreto dentro de la máquina, y que se ajusta a las condiciones de pendiente transversal de la vía, bombeo o corona. En la Fig. 3.2 se muestra una pavimentadora con cimbras deslizantes.

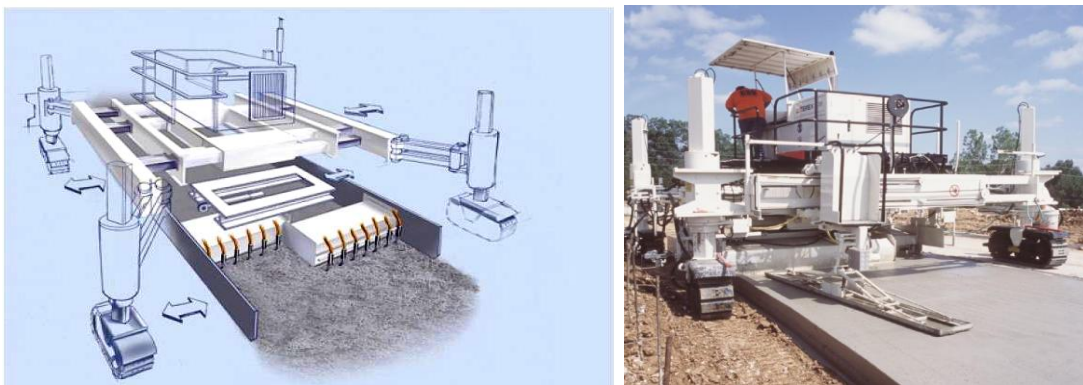


Fig. 3.2. Esquema y fotografía de una pavimentadora con cimbras deslizantes

3.4.4. Terminación y texturizado

Después de colocar el concreto es necesario afinar la superficie y las pendientes dejadas por el equipo manual o mecanizado, así como obtener la planicidad requerida por el proyecto.

Cuando no se cuente con equipo especializado, las labores de alisado y de rectificación de pendientes pueden hacerse con reglas y eliminar así las irregularidades, pequeñas oquedades y verrugas. En el caso de que sean secciones con anchos excesivos, se deben emplear allanadoras de mango largo.

Existen equipos que permiten el allanado mecánico en la parte posterior de la pavimentadora. Esto se logra con charolas o rodillos. En caso de utilizar estos últimos, es necesario tener la precaución de dejar sólo una pequeña sobreelevación delante de ellos, pues cuando el concreto queda muy alto, la superficie del pavimento queda con ondulaciones; en cambio, cuando queda ligeramente abajo, los rodillos apenas la tocan, formándose así depresiones difíciles de corregir. El empleo demasiado intenso de rodillos hace que suba la lechada en cantidades excesivas, con la consiguiente tendencia a la aparición de grietas prematuras.

Cuando se logre la planicidad y el perfilamiento de irregularidades superficiales se está en condiciones de proceder al texturizado del pavimento. Lo anterior se realiza con fragmentos de arpilleras y escobillones, estos últimos controlados de preferencia mecánicamente con carros texturizadores.

Toda la operación se efectúa antes de que aparezca el agua de sangrado en la superficie; de otra manera, se incrementa el potencial de fisuramiento. Cuando por alguna razón aparezca agua en la superficie, todas las labores de terminado y texturizado se deben suspender hasta que se evapore. En algunos casos, incluso se pueden utilizar arpilleras o pasadas con mangueras de goma para barrer y remover el agua de sangrado, antes de proseguir.

La operación del terminado y texturizado debe hacerse de manera que nunca se retrase demasiado el curado, pues se incrementa la posibilidad de fisuramiento.

3.4.5. Curado

El objetivo del curado del concreto es facilitar el desarrollo de la hidratación del cemento, así como reducir los efectos nocivos de las contracciones producidas por las condiciones ambientales (temperatura, viento, humedad), las cuales promueven fisuramientos aleatorios. Es de vital importancia controlar las temperaturas en las mezclas, así como la de tomar medidas que contrarresten los efectos del viento excesivo y de la humedad del aire.

Existen diferentes formas de curar los pavimentos recién colocados:

- Método húmedo: por medio de aspersion o rociado de agua, arpilleras húmedas, arena húmeda.
- Método de membranas: mediante la aplicación de compuestos para el curado (polietileno saturado).

Sin importar cuál sea el tipo que se utilice, es necesario que se aplique oportunamente. Siempre se requiere que el curado se inicie en las etapas más tempranas posibles de la colocación del concreto, y toda vez que no se dañe la superficie.

Los compuestos químicos colocados por aspersión (membranas) deben de cumplir con los siguientes requisitos:

- Poder aplicarse inmediatamente después del allanado y terminado del concreto, aún en presencia de agua superficial.
- Tener un color blanco que refleje en alto porcentaje la luz solar.
- Presentar una viscosidad alta y secado al tacto en un lapso no mayor a 30 minutos.

Además se deben adoptar las siguientes precauciones y recomendaciones:

- Las membranas de curado deben estar en recipientes perfectamente sellados previo a su uso, y preferentemente se usan de los mismos lotes con que se realizaron los ensayos del estudio preliminar de mezclas.
- El compuesto de curado debe estar bien homogeneizado antes de su empleo, con los pigmentos dispersos en todo el líquido. Antes de su vaciado a los tanques de aplicación manuales o mecánicos se agitan para garantizar su uniformidad.
- La aplicación de preferencia se realiza con equipo mecánico que cuente con boquillas por donde se expulsa el líquido en todo el ancho de la sección, incluyendo sus cantos. Esto se recomienda para que la aplicación sea uniforme.
- Restituir zonas puntuales en donde exista rotura de la película de curado, ya sea por el agua de sangrado, desgarramientos por pisadas, etc. Esta precaución sirve para evitar la evaporación por macroporos y pequeñas porosidades.
- Realizar mediciones periódicas de los proporcionamientos, midiendo los volúmenes aplicados y comparándolos con las áreas cubiertas.
- Evitar el tránsito vehicular y peatonal al menos durante 7 días. Si por alguna razón se requiere hacer rectificaciones en la planicidad o corregir irregularidades superficiales, se debe proceder inmediatamente después a la aplicación de la membrana de curado en las zonas afectadas.

3.5. JUNTAS DE CONTROL

El concreto experimenta cambios volumétricos debidos a la temperatura y a las variaciones en su contenido de agua incluso dentro del espesor del pavimento, ello hace que las losas que lo constituyen tiendan a sufrir esfuerzos de tensión que en ocasiones rebasan a los que las losas pueden soportar.

Los esfuerzos de tensión generados por cambios volumétricos se ven incrementados por los del tipo friccionante o de arrastre, generados en la interfase losa-capa de apoyo, pues esta última se opone a que las losas se expandan o sufran contracción producida por agentes ambientales y por la disminución del agua dentro del concreto al secarse. Cuando no se toman en cuenta estos esfuerzos, aparecen grietas sin control, es decir, al azar.

La manera de evitar el agrietamiento sin control es mediante una planeación de cortes que alivien los esfuerzos de manera programada.

Las juntas en pavimentos rígidos pueden dividirse en:

- Juntas de contracción: su función es la de aliviar los esfuerzos de tensión causados por las contracciones del concreto.
- Juntas de expansión: son aquellas que se disponen para permitir que las losas de concreto se expandan una contra otra sin destruirse.
- Juntas de construcción: son aquellas que se forman por las interrupciones de las operaciones de colado y deben garantizar la continuidad estructural.
- Juntas de alabeo o articuladas: su finalidad es evitar los agrietamientos a lo largo del eje central de los pavimentos o en líneas de unión de las diferentes hileras de losas que se producen al elevarse sus bordes cuando la losa es cargada.

Las juntas se hacen en estado fresco, por inserción o con guillotina, o bien por ranurado del concreto endurecido, pero garantizando la continuidad a través de la junta, mediante el apoyo del concreto contra concreto, con ranuras rellenas con material apropiado o estableciendo la continuidad a ambos lados de la ranura con barras de acero liso (pasajuntas) o corrugado (barras de sujeción).

- Juntas en estado fresco
 - *Por inserción:* se coloca una tira de PVC o metálica cuyo ancho sea de a $1/5$ del espesor del pavimento. Es recomendable que la inserción de este elemento se haga con equipo mecánico vibrador, de manera que se garantice la verticalidad y el alineamiento. El borde superior de la tira deberá estar comprendido entre 2 mm a 4 mm de la superficie del concreto. Se debe procurar que el equipo mecánico de aplanado no altere la posición de las tiras. Una vez que el concreto ha endurecido, si por requerimientos del proyecto se deben sellar las juntas, se procede a cortar con disco el elemento inductor de la grieta. La profundidad y anchura del corte deberá ser el adecuado para formar la caja receptora del sellante.
 - *Con guillotina:* se aplica sólo cuando la obra es menor y no existen exigencias especiales en cuanto a calidad de las ranuras resultantes. El volteador se introduce inmediatamente después o junto con las operaciones de acabado, mientras el concreto aún está fresco. Cuando el concreto ha adquirido cierta

consistencia se retira la faja metálica y se procede a dar el redondeado de bordes mediante volteador, aprovechándose asimismo para rectificar la superficie.

- Juntas en concreto endurecido

El corte se realiza previamente a que se presente la contracción. Se realiza un corte inicial con ancho de 3 mm y profundidad de 1/3 del espesor del pavimento. Posteriormente se ensancha el ranurado para formar la caja para el sello, o bien se realiza un corte con discos abrasivos de ancho suficiente para ejecutar el corte de una sola pasada.

Para evitar la aparición de grietas es conveniente tomar las siguientes precauciones:

- Disponer de suficiente número de cortadoras para que los serrados avancen al ritmo de colocación del concreto, siempre regulando sus avances de acuerdo con las condiciones ambientales del sitio.
- Programar los cortes de acuerdo con las condiciones de humedad, los tiempos de fraguado de las mezclas y las temperaturas prevalecientes.
- Realizar los cortes dentro de las 6 a 20 horas después de terminada la superficie, para evitar desportillamientos en los bordes. Los cortes siempre deben hacerse hasta las orillas de la sección.
- Cuando el proceso de contracción se acelere debido a temperaturas excesivas, se recomienda que de un conjunto de tres juntas se ejecute al menos una, para posteriormente regresar a aserrar las pendientes.
- Después de realizado el aserrado, se deberá reponer la membrana de curado en su vecindad, pues pudo removerse por el agua aplicada durante esta operación.

- Sellado de juntas

Una vez que se limpian y secan las ranuras para alojar el material sellante, se procede a aplicar este último, dependiendo de su naturaleza, esto es, en frío o en caliente.

Se procura recortar en lo posible las protuberancias de material sellante en los bordes, incluso dejando una pequeña depresión, tal como se muestra en la Fig. 3.3.



Fig. 3.3. Sellado de juntas.

3.6. CONTROL DE CALIDAD

Los criterios de control de calidad deben apoyarse en las especificaciones de cada proyecto en particular. El control de calidad consiste en verificar el cumplimiento de las hipótesis y las bases de diseño y proyecto, así como las especificaciones de materiales y procedimientos. Esta verificación se hace a través de mediciones, muestreos y ensayos de laboratorio. Existen dos formas básicas de realizar estos controles: a) durante la ejecución y b) durante la recepción y pago.

- Controles durante la ejecución. Consisten en verificar que los materiales utilizados y la secuencia constructiva sean los adecuados y los prescritos en el proyecto. Con estas actividades se pueden detectar las anomalías y en su caso tomar oportunamente medidas correctivas.

Dentro de esta forma de control de calidad se incluyen todos los estudios previos necesarios para optimizar la calidad de los materiales, como son los estudios de agregados en los diferentes bancos de préstamo, así como su posible variación, estudios preliminares de dosificación de mezclas que se emplearán en los componentes del concreto, así como los aditivos a ser utilizados en la obra particular. Estas actividades buscan optimizar técnica y económicamente los requerimientos de proyecto y especificaciones.

- Controles de recepción y pago de obras. Este tipo de controles corren por cuenta de la entidad que ordena y es dueña del proyecto. Normalmente se apoya en técnicos y laboratorios que, mediante muestreo y ensayos hechos en secciones representativas y al azar, verifican que los alcances y las calidades logradas estén dentro de las exigidas y tolerables en las bases del trabajo. Con estos resultados, las entidades responsables pueden aplicar las medidas correctivas a los contratistas (multas, rechazos).

A continuación se discuten los aspectos esenciales y comunes empleados en el proceso de control de calidad de obras de pavimentación con concreto hidráulico.

3.6.1. Control de calidad del concreto

El control de calidad del concreto involucra la obtención de muestras directamente de los camiones transportadores de las mezclas, previamente a la salida de las plantas de mezclado. Las técnicas de muestreo, preparación y manejo de muestras deben hacerse de acuerdo con la normatividad vigente.

- Resistencias a la compresión. Se fabrican cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, a edades de 3, 7 y 28, días.
- Resistencias a la flexión. Normalmente se aplican al caso de carreteras y vialidades urbanas de primer orden (vías primarias y colectoras, periféricos y libramientos). Cada muestra está compuesta de varias vigas.

Es importante resaltar que en las vías primarias y en carreteras rige la resistencia a la flexión en términos del módulo de ruptura (MR), más que la resistencia a la compresión.

- Criterios de resistencia. Es común establecer resistencias mínimas que deberán cumplir los especímenes individuales, así como una resistencia característica; ambas se deberán cumplir simultáneamente, tanto en compresión como en flexión. Asimismo, se debe establecer un criterio de resistencia mínima individual, la cual será igual a la resistencia de diseño menos una cantidad que refleje el producto de una desviación estándar promedio esperada, esto es, porcentajes de resistencias individuales defectuosas.

Otro criterio de control de resistencias exige que el promedio de la resistencia a la flexión de cada cinco especímenes consecutivos deberá ser igual o mayor que la resistencia especificada a los 28 días.

- Muestreo en concretos. Los ensayos de pesos volumétricos, revenimientos, contenidos de aire, temperatura de las mezclas tanto en planta como en el sitio de colocación, se efectúan durante los primeros tres a cinco camiones de cada día. Estas mediciones se suspenden hasta que ya no existan variaciones importantes en estas propiedades. En caso de que haya paros de equipo por más de una hora, por cualquier tipo de problemas, tales determinaciones volverán a ejecutarse. De esta manera se lleva un control consistente de las mezclas. El peso volumétrico y el contenido de aire se determinan en el primer y tercer camión que salgan de la planta y posteriormente en forma aleatoria, en lapsos no mayores de una hora.

En condiciones normales se determinan en campo de manera aleatoria los revenimientos y contenidos de aire, en un mínimo de tres determinaciones diarias, de preferencia en aquellos camiones de donde se haya obtenido concreto para la fabricación de especímenes. Se registra el cadenamamiento en donde se coloca la mezcla de donde se obtuvieron las muestras respectivas.

Para determinar el número aproximado promedio de especímenes, es común considerar muestras por cada 250 m³ colocados. Dentro de los primeros días la frecuencia del muestreo se incrementa, lo que resulta normal en proyectos carreteros. Posteriormente se reduce la frecuencia, dependiendo de la evolución de los resultados.

Se deben registrar las temperaturas de ambiente, cemento, concreto en estado fresco, así como la temperatura del agua de curado.

Con el fin de estudiar las propiedades del concreto colocado, para determinar los espesores finales de losa se deben obtener núcleos, a distancias de aproximadamente de 500 m, o uno por cada día de colado cuando la longitud total extendida no supere los 300 m.

En el caso de pavimentos urbanos se pueden hacer los siguientes muestreos como mínimo:

- 1 muestra por cada 500 m² (ó 1 por cada 100 m³)

- 1 muestra por cada dos turnos de trabajo de colocación de concreto
- Un mínimo de ocho (8) muestras

Siempre se lleva un control estricto del área a que corresponde el número de muestras dado.

3.6.2. Control de espesores

La uniformidad de espesores se logra colocando marcas o hilos de nivel en las orillas de la sección, mismas que sirven de apoyo a los sensores de extremo con que cuentan las pavimentadoras de cimbra deslizante.

En pavimentos urbanos o residenciales, previo a la recepción de la capa de sub-base o base ya terminada, y con los moldes metálicos (en caso que se utilicen) instalados a su nivel, se verifican los espesores mediante el uso de una cuerda extendida transversalmente al eje de trazo sobre el paño superior de las cimbras o moldes, en varios de sus puntos.

Es común obtener núcleos del pavimento ya terminado, a separaciones del orden de 300 m en un mismo carril, o alternados en carriles adyacentes. Estas piezas se aprovechan también para determinarles su resistencia a la compresión. En cuanto al diámetro de los núcleos, si bien son aceptables los de 5 cm (2"), se aconseja obtenerlos de 7.6 cm (3"), a fin de estudiar mejor las posibles microfisuras y el patrón de oquedades de las muestras.

3.6.3. Tolerancias en la rugosidad superficial

Todas las irregularidades que excedan las tolerancias en sobre-elevaciones que demande el proyecto deben removerse mediante fresado o métodos abrasivos equivalentes. Siempre se debe utilizar un equipo que garantice un tendido uniforme sin depresiones apreciables.

Adicionalmente se recomienda que todos los puntos altos de la superficie resultante no sobrepasen de 8 mm respecto al perfil exigido en el proyecto. Todas estas excedencias se deben devastar hasta que mediante una prueba de perfilógrafo, aceptado por la entidad responsable del proyecto, se demuestre que las desviaciones están por abajo de tal tolerancia. Si por razones de planicidad (por estar por abajo de los 12 cm/km) se requiere fresado adicional, éste se realiza en franjas paralelas al eje de trazo, en longitudes cercanas a los 200 m.

3.7. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS MEXICANAS

La normativa mexicana respecto a carreteras con pavimentos de concreto hidráulico está contenida en el libro CTR. CONSTRUCCIÓN de la SCT, el cual incluye los conceptos de obra para la construcción de la infraestructura de transporte, los cuales consideran todas las operaciones mencionadas en los subincisos anteriores, sin embargo, se hará mención de aspectos constructivos relevantes.

Los materiales que se utilizan en la construcción de terraplenes deben cumplir con lo que establecen las Normas N-CMT-1-01, N-CMT-1-02 y N-CMT-1-03 del libro CMT de la SCT. En el caso de terraplenes reforzados también aplican las Normas N-CMT-6-01-006. En cuanto a los materiales que se utilizan para la construcción de la sub-base deben cumplir con lo establecido en las Normas N-CMT-4-02-001 y N-CMT-4-02-002. En el Anexo H se presenta las tablas con los valores de calidad para materiales de terraplén, capa sub-rasante y sub-base.

Se especifica que debe asegurarse la compactación de los acotamientos de los terraplenes, por lo que la Norma indica construir una sección más ancha que la teórica del proyecto, respetando la inclinación de taludes.

En lo referente a los materiales para las capas estabilizada, las normas especifican que no se deben construir esas capas cuando exista amenaza de lluvia, esté lloviendo y cuando la temperatura sea inferior a 5 °C.

Las especificaciones para la construcción de la carpeta de concreto hidráulico están contenidas en la Norma N-CTR-CAR-1-04-009-06.

3.8. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS BRITÁNICAS

Los requerimientos generales de las Normas Británicas para la construcción de pavimentos de concreto están contenidas en las especificaciones MCHW1 (*Manual of Contract Documents for Highway Works*), las cuales abarcan todas las actividades del proceso constructivo general tratado en los subincisos anteriores.

Como proceso constructivo complementario dentro de las normas británicas se citan los métodos y técnicas para la ampliación de un pavimento existente, las cuales son usadas para autopistas que requieren ampliación para aumentar su capacidad de tránsito.

Los proyectos de mejoras varían en alcance, incluyen cambios en la geometría, niveles y pendiente, la mejora de la línea de visión y la construcción de carriles adicionales. La ampliación puede ser simétrica, asimétrica o separada en un nuevo terreno, dependiendo del sitio y, en el caso de ampliación de 2 carriles a 4 carriles, por lo general se hace una combinación de los tres, con el fin de mejorar el eje y la pendiente. Estos cambios afectan los niveles y contrapendientes y por tanto, también influyen en el diseño del pavimento.

La construcción de un pavimento de concreto hidráulico con refuerzo continuo no debe hacerse junto a un pavimento del mismo tipo con juntas, debido a que no es posible vincularlos para proporcionar un apoyo de borde y de esquina satisfactorio, que se adapte al movimiento relativo por efectos térmicos.

Una técnica para el refuerzo de un pavimento de concreto, en conjunto con la ampliación de la calzada, consiste en una plantilla de concreto, de 50 mm de espesor mínima, que se une a la superficie del pavimento

existente. La ampliación puede construirse por separado o monolíticamente en conjunto con la capa superpuesta en una sola pasada (véase Fig. 3.4). Las juntas longitudinales son necesarias en el concreto nuevo en una posición que depende de las dimensiones de la calzada existente y de la ampliación. Las barras de unión son insertadas en los agujeros perforados en los lados de la losa existente.

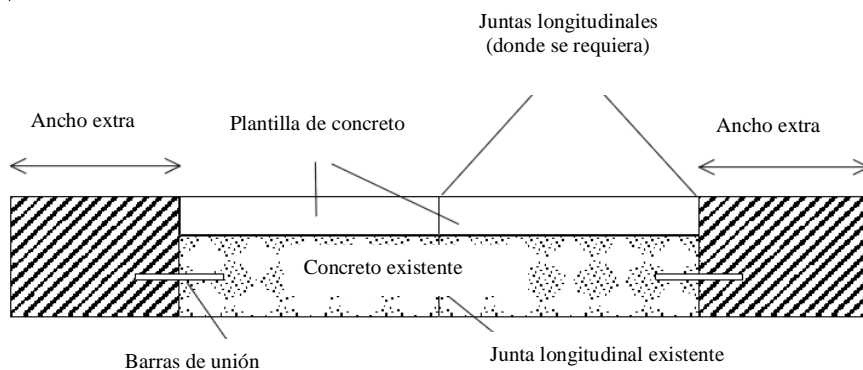


Fig. 3.4. Refuerzo de un pavimento de concreto hidráulico con ampliación.

3.9. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS ESPAÑOLAS

Las especificaciones respecto a los materiales, equipos y proceso constructivo están contenidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), el cual considera todas las actividades mencionadas en los subincisos 3.1 a 3.6, al igual que las normas mexicanas. A continuación, se hace mención de los aspectos constructivos más relevantes especificados en las Normas Españolas.

El ancho de la capa superior del pavimento en la calzada debe rebasar a la teórica por lo menos en 20 cm por cada borde. Sin embargo, en el caso de que el acotamiento sea también de concreto hidráulico, puede coincidir con el espesor de proyecto.

Como se aprecia en la Fig. 3.5, cada capa del pavimento tiene en su cara superior un ancho, “ a ”, igual al de la capa inmediata superior, “ a_s ”, más la suma de los sobrecanchos, “ d ” y “ s ”, indicados en la Tabla 3.2. Según la Norma, el sobrecancho, “ s ”, se puede aumentar si se tiene la necesidad de contar con un apoyo para la capa superior extendida. En la Fig. 3.5 se muestra el esquema de anchos y sobrecanchos del pavimento.

Tabla 3.2. Valores de los sobrecanchos

Sobrecancho	Material	Valor (cm)
Por derrames (d)	Pavimento de concreto	0
	Concreto hidráulico vibrado	0
	Otros materiales	e_s
Por criterios constructivos (s)	Mezclas bituminosas	5
	Materiales tratados con cemento	6 a 10
	Concreto hidráulico vibrado	20
	Capas granulares	10 a 15

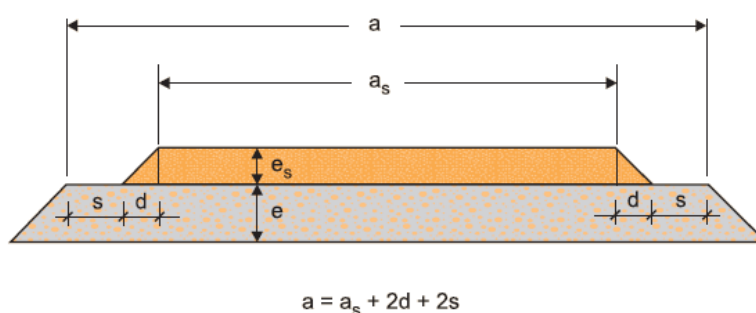
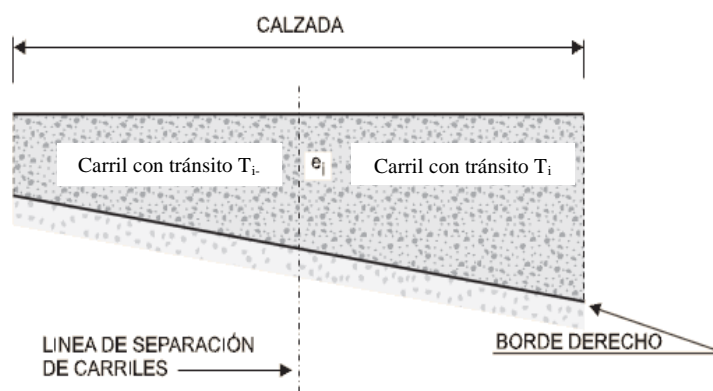


Fig. 3.5. Esquema de anchos y sobrecargos del pavimento

En las categorías de tránsito pesado T00 y T0, pueden considerarse espesores distintos entre carriles de una misma calzada, donde haya dos o más carriles para un sentido de circulación, con los siguientes criterios:

- La máxima diferencia de categoría de tránsito pesado entre carriles, es de 1 categoría.
- La categoría de sub-rasante sea la misma.
- La variación de espesor, tal como se muestra en la Fig. 3.6, se proyecta de acuerdo a los siguientes criterios:
 - La variación de espesor se efectúa en una sola de las capas.
 - No se modifica el número total de capas.
 - Se cumple con las limitaciones de espesor contenidas en la Norma.
 - En caso de existir capas distintas a la que produce la variación de espesor, con diferente espesor en las secciones posibles según esta Norma, se adoptará como espesor de capa el mayor de ellas.
 - Las variaciones de espesor serán transversalmente lineales, debiendo mantenerse en el borde del carril interno los espesores mínimos especificados por esta norma.



e_i = espesor de catálogo en cm para tránsito T_i

Fig. 3.6. Variación de espesor

CAPITULO 4. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO APLICADOS EN MÉXICO, REINO UNIDO Y ESPAÑA.

Como se citó en el Capítulo 2, los dos métodos de diseño aplicados en México son, el de la American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) y el de la Portland Cement Association (PCA), los cuales también son los más ampliamente usados en el mundo para diseñar pavimentos.

En algunos países europeos se aplican actualmente diseño basado en “Secciones Normalizadas”, es decir, en un catálogo de secciones, que toman en cuenta el tipo de tránsito, las características de los suelos de apoyo, y las propiedades de los materiales de construcción de las diferentes capas. Tal es el caso de las Normas Españolas.

Por su parte, las Normas Británicas, apoyan sus diseños de pavimentos de concreto hidráulico en un nomograma con base al desgaste estructural del pavimento por efecto del tránsito.

En cuanto a los procesos constructivos, las normas son muy similares en los casos de pavimentos de construcción nuevos, variando un poco sus tolerancias para la aceptación de los trabajos realizados, aunque las Normas Británicas incluyen además el proceso constructivo para ampliaciones como fue descrito en el Capítulo 3.

4.1. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO

En México, la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), aplica el método AASHTO para diseñar pavimentos de concreto hidráulico, y los verifica con el método de la PCA.

El método de la AASHTO se basa en análisis por fatiga, el cual toma en cuenta el comportamiento funcional, estructural y de seguridad del pavimento.

Por su parte, el método de la PCA se basa en criterios de esfuerzo de fatiga, donde el pavimento puede fallar presentando agrietamiento derivado de excesivas repeticiones de carga, así como de erosión, en el que el pavimento puede fallar por excesivo bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencias de elevaciones en las juntas. Este segundo método considera algunas limitaciones en los valores de módulo de reacción k del suelo, con rango de valores aplicables entre 1,805 y 25,271 kg/cm³ (50 y 700 pci).

Una ventaja que tiene el método del PCA sobre el de la AASHTO es que toma en cuenta el tránsito real que circulará sobre el pavimento, sin convertirlo en ejes sencillos equivalentes.

Ambos métodos de diseño son apropiados para determinar espesores de pavimentos rígidos; sin embargo, en el método AASHTO intervienen un mayor número de variables que modelan de mejor manera las

condiciones del proyecto.

Los resultados del método de la PCA son adecuados para cualquier tipo de proyecto, a pesar de que no se toman en cuenta algunos factores importantes como lo son la serviciabilidad inicial y final. En cambio, consideran de manera más real la contribución del tránsito en la formulación.

En Reino Unido el diseño se basa en factores de desgaste, los cuales fueron generados a partir de cargas reales medidas con sensores de peso en movimiento instalados en la red de carretera del País. Lo anterior hace más sensible el dimensionamiento con respecto a la contribución del tránsito.

En cuanto a los criterios aplicados en España, el catálogo de secciones considera, al igual que los otros métodos de diseño mencionados, el análisis por fatiga del pavimento y la deformación excesiva de la subrasante, tomando en cuenta al tránsito y a la capa subrasante como factores fundamentales que afectan el comportamiento de los pavimentos.

Los principales factores de diseño que consideran los métodos para pavimentos de concreto hidráulico, son los siguientes:

- Periodo de diseño.
- Tránsito de diseño.
- Resistencia de la subrasante.
- Propiedades del concreto hidráulico.

A continuación se mencionarán las principales similitudes y diferencias entre los métodos de diseño aplicados en México, Reino Unido y España.

Periodo de diseño

En México se considera un periodo de diseño mínimo de 20 años, en Reino Unido 40 años y en España 30 años.

Tránsito de diseño

Tanto en el método AASHTO como el de la PCA consideran el número de repeticiones de carga esperadas de cada tipo de eje, durante el periodo de diseño. A diferencia del método AASHTO, el método de la PCA considera los pesos reales por cada tipo de eje, mientras que la primera utiliza un factor de equivalencia para transformar los pesos reales de los vehículos que circularan, en ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas (ESAL's). El cálculo del número de repeticiones de cargas esperadas toma en cuenta: i) el tránsito promedio diario anual (TDPA), ii) el % del TPDA para cada tipo de eje, iii) el factor de sentido, iv) el factor de carril, v) el período de diseño, y vi) el factor de crecimiento anual.

En las normas británicas el tránsito de diseño, al igual que en el método AASHTO, se expresa en función del número de ejes equivalentes estándar de 8.2 t, pero en términos de millones de ejes estándar. El tránsito de diseño considera: i) el flujo de vehículo comercial, ii) el periodo de diseño, iii) el factor de crecimiento, iv) el % de vehículos comerciales en el carril más cargado, y v) el factor de desgaste. A diferencia de los métodos aplicados en México y España, la norma británica utiliza un porcentaje mínimo de vehículos OGV2¹¹.

Las normas españolas determina el tránsito de diseño según la intensidad media diaria de vehículos (IMDp) en el carril de diseño, y a partir de éste, con las Tablas 2.21 y 2.22, categorías de tránsito pesado T00 a T2 y categorías de tránsito pesado T3 y T4, respectivamente, determina la categoría de tránsito para diseño.

Resistencia de la subrasante

En los métodos de diseño aplicados en México la resistencia de la subrasante se determina por el módulo de reacción en pruebas de campo o indirectamente mediante correlaciones con el valor relativo de soporte (VRS o CBR).

En la normas británicas se define la clase de cimentación por el módulo superficial de cimentación, la norma considera cuatro clases de cimentaciones, que abarcan módulos de rigidez desde 50 a 400 MPa (510 a 4079 kg/cm²) y su diseño puede ser por el método restringido, el cual es más conservador, o por el método de rendimiento, el cual permite la modificación y mejoramiento de la subrasante.

Por otra parte, la normativa española considera tres categorías de subrasantes según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) de un ensayo de carga con placa. La formación de la subrasante dependerá del tipo de terreno de cimentación y de la categoría de subrasante.

Cabe destacar que todos los métodos de diseños contemplan la resistencia que aportan todas las capas que forman la subrasante, determinando así un módulo de superficie compuesto o equivalente.

Propiedades del concreto hidráulico

Las principales propiedades del concreto hidráulico consideradas en el diseño, son el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad. Los métodos de la AASHTO y de la PCA consideran el módulo de ruptura entre 41 y 50 kg/cm². En cuanto al módulo de elasticidad, en el método AASHTO se determina con correlaciones a partir del módulo de ruptura, mientras que en el método de la PCA se considera un valor fijo de módulo de elasticidad del concreto (E_c) = 281,228 kg/cm² (4'000,000 psi), el cual no varía en relación con su resistencia a la flexión (MR).

El método de las normas británicas en su nomograma de diseño (Fig. 2.14), considera concretos hidráulicos con módulo de rotura de 4.5, 5.0, 5.5 y 6.0 MPa (45.9, 51.0, 56.1 y 61.2 kg/cm², respectivamente).

¹¹ Ver Tabla 2.17. Clases y categorías de vehículos comerciales.

Por su parte, el catálogo de secciones de pavimentos de las normas españolas considera concretos hidráulicos con módulo de ruptura de 3.5, 4.0 y 4.5 MPa (35.7, 40.8 y 45.9 kg/cm², respectivamente) la selección del tipo de concreto dependerá de la categoría de tránsito, como lo especifica la norma.

En la Tabla 4.1 se presenta un cuadro comparativo en que se indican aspectos relevantes de los parámetros considerados en los métodos de diseño discutidos anteriormente.

Tabla 4.1. Cuadro comparativo de normas aplicadas al diseño de pavimentos de concreto hidráulico en México, Reino Unido y España.

	NORMAS MEXICANAS		NORMAS BRITÁNICAS	NORMAS ESPAÑOLAS
	AASHTO	PCA	DMRB – TRL TT87	Norma 6.1-IC
CRITERIOS DE DISEÑO	Fatiga, tomando en cuenta el comportamiento funcional, estructural y seguridad del pavimento.	Fatiga y erosión.	Fatiga y/o deformación excesiva de la subrasante.	Fatiga y/o deformación excesiva de la subrasante.
FACTORES DE DISEÑO				
Periodo de diseño	20 años		40 años	30 años
Tránsito	El número de repeticiones esperada se basa en: <ul style="list-style-type: none"> • Tránsito promedio diario anual (TDPA). • % del TPDA para cada tipo de eje. • Factor de sentido. • Factor de carril. • Período de diseño. • Factor de crecimiento anual. 		Se expresa en función del número de ejes equivalentes estándar (8.2 t) en términos de millones de ejes estándar, y se basa en: <ul style="list-style-type: none"> • Flujo de vehículo comercial. • Período de diseño. • Factor de crecimiento. • % de vehículos comerciales en el carril más cargado. • Factor de desgaste. 	Se basa en la intensidad media diaria de vehículos (IMDp) en el carril de diseño, con el cual se determina la categoría de tránsito.
Subrasante	Se determina por el módulo de reacción en pruebas de campo o indirectamente mediante correlaciones con el valor relativo de soporte (VRS o CBR).		Se determina por el módulo superficial de la cimentación y considera 4 clases de cimentación, que abarcan módulos de rigidez desde 50 a 400 MPa (510 a 4079 kg/cm ²).	Se determina según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Ev ₂) de un ensayo de carga con placa y el tipo de terreno de cimentación.
Concreto hidráulico	Módulo de ruptura (MR) entre 41 kg/cm ² (4 MPa) y 50 kg/cm ² (4.9 MPa).		El monograma de diseño considera concretos con módulo de rotura de 4.5, 5.0, 5.5 y 6.0 MPa (45.9; 51.0; 56.1 y 61.2 kg/cm ²).	El catálogo de secciones de pavimentos considera concretos con módulo de ruptura (MR) de 3.5, 4.0 y 4.5 MPa (35.7, 40.8 y 45.9 kg/cm ²), según la categoría de tránsito.
	El Módulo de elasticidad del concreto se determina con correlaciones con el MR.	El Módulo de elasticidad del concreto está fijado en 4,000,000 psi (281,228 kg/cm ²).		

Para una mayor comprensión de las diferencias y similitudes que se han mencionado, a continuación se ejemplifica el dimensionamiento de un pavimento de concreto hidráulico para una vialidad urbana de doble sentido y con dos carriles por sentido, sin apoyos laterales.

Datos:

Vialidad urbana de 2 sentidos y de 2 carriles por sentido.

Sin apoyo lateral.

Módulo de ruptura (MR) del concreto = 45 kg/cm^2 (640.1 psi)

Módulo de reacción de la subrasante (k) = 2.77 kg/cm^3 (100 pci)

% VRS (CBR) = 5%

Base granular de 20 cm.

Factor de seguridad de carga de 1.1

Datos del tránsito:

- Período de diseño: 20 años
- Tasa de crecimiento anual: 3.0 %
- Se realizó un aforo durante varios días y se promedió con el tránsito de otras vialidades de condiciones muy similares, resultando un tránsito promedio diario anual (TPDA) de 2,267 vehículos en una sola dirección, con la siguiente composición:

Tipo de vehículo	Total diarios	% del TDPA	Cargados	Vacios
A2	1.315	58,0%	100%	0%
A'2	433	19,1%	100%	0%
B2	168	7,4%	60%	40%
B4	52	2,3%	60%	40%
C2	202	8,9%	60%	40%
C3	25	1,1%	60%	40%
T2-S2	4	0,2%	60%	40%
T3-S2	56	2,5%	60%	40%
T3-S3	10	0,4%	60%	40%
T3-S2-R4	2	0,1%	60%	40%
	2.267	100,0%		

Factores para el análisis del tránsito para conocer el número de repeticiones esperadas para cada eje.

- Factor de sentido = 1, dado que los datos del aforo son en un sólo sentido.
- Factor de carril = 0.94, obtenidos para la vialidad que cuenta con 2 carriles por sentido, mediante la Fig. 2.6, con el TPDA de 2,267 vehículos en su intersección con la línea de 2 carriles en una dirección.
- Factor de crecimiento anual = 1.3435, para el período de diseño de 20 años y tasa de crecimiento anual de 3%, con la ecuación 2.14.

DISEÑO POR EL MÉTODO AASHTO

Parámetros de diseño:

Serviciabilidad

Serviciabilidad inicial = 4.5

Serviciabilidad final = 2.0

Transferencia de carga

Se emplean pasajuntas y no se considera soporte lateral de las losas; por tanto, el coeficiente de transferencia de carga es igual a 3.2, según Tabla 2.10.

Condiciones de drenaje

Se suponen condiciones normales de drenaje en la vialidad, por lo que el coeficiente de drenaje es igual a 1.0.

Confiabilidad

Por tratarse de una vialidad urbana de cierta importancia, se considera un valor de confiabilidad del 60%, según Tabla 2.6. Con este valor, de la Tabla 2.8 se obtiene un valor de $Z_r = -0.253$, y se supone un valor de $S_o = 0.35$.

Módulo de elasticidad

A partir del valor del módulo de ruptura (MR) del concreto = 45 kg/cm^2 (640.1 psi) utilizando la ecuación 2.10, se obtiene $E_c = 61,44 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ($4,32 \times 10^6 \text{ psi}$).

Ejes equivalentes y espesor.

Es necesario transformar los ejes de pesos normales de los vehículos que circularán sobre el camino, a ejes sencillo equivalentes de 8.2 t (18 kips), para poder aplicar la ecuación de diseño de espesores.

Para convertir a ejes equivalentes los ejes de pesos normales de los vehículos, se debe obtener primero el número de repeticiones, en toda la vida útil, los tipos de vehículos que van a circular sobre el pavimento; para cada tipo de eje se desglosa por peso del eje.

Con el factor de equivalencia de carga (Anexo B) calculado para cada tipo y peso de ejes, se convierte el número de repeticiones esperadas de cada tipo de eje durante vida útil, en el número de repeticiones esperadas de ejes equivalente (ó ESAL's).

El número de repeticiones esperadas durante la vida útil y sus respectivos ESAL's en este ejemplo son los siguientes:

Tipo de eje	Peso		Repeticiones en la vida útil	Factor de equivalencia	ESAL's de diseño
	kips	t			
Sencillo	2.20	1.00	24,246,225	0.0002	4,849.25
Sencillo	3.74	1.70	3,991,861	0.0015	5,828.12
Sencillo	6.60	2.99	744,917	0.0100	7,449.17
Sencillo	7.70	3.49	1,378,431	0.0188	25,914.50
Sencillo	8.36	3.79	3,991,861	0.0276	110,175.36
Sencillo	8.80	3.99	355,866	0.0320	11,387.71
Sencillo	12.10	5.49	2,581,535	0.1760	454,350.16
Sencillo	15.40	6.99	619,515	0.6040	374,187.06
Sencillo	22.00	9.98	2,067,647	2.3500	4,858,970.45
Tándem	7.04	3.19	7,739	0.0026	20.12
Tándem	7.26	3.29	7,739	0.0029	22.44
Tándem	7.70	3.49	7,739	0.0035	27.09
Tándem	8.80	3.99	471,649	0.0050	2,358.25
Tándem	9.90	4.49	90,713	0.0130	1,179.27
Tándem	11.00	4.99	192,497	0.0195	3,753.69
Tándem	15.40	6.99	288,745	0.0820	23,677.09
Tándem	17.60	7.98	192,497	0.1330	25,602.10
Tándem	30.80	13.97	288,745	1.2767	368,631.12
Tándem	39.60	17.96	878,407	3.8000	3,337,946.60
Tridem	11.00	4.99	37,618	0.0430	1,617.57
Tridem	49.50	22.45	56,427	2.7400	154,609.98
Total ESAL's					9,772,557.10

Con los datos y parámetros de diseño establecidos resulta un total de 9,706,149.95 ejes sencillos equivalentes de 8.2 t (18 kips) en el periodo de diseño. Utilizando la ecuación 2.1, el espesor resultante es de 22 cm.

DISEÑO POR EL MÉTODO PCA.

Parámetros de diseño:

Análisis del tránsito para conocer el número de repeticiones esperadas para cada eje.

Dado que se conocen los tipos y cantidad de vehículos (repeticiones esperadas) que van a circular sobre el pavimento, se separa la repetición para cada tipo de eje, es decir para cada peso y tipo de ejes (sencillos, tándem ó tridem).

Los factores antes definidos se sustituyen en la ecuación 2.13 para determinar las repeticiones esperadas al año. Se analizan todos los tipos de ejes derivados de la composición vehicular del tránsito promedio diario anual.

El peso por eje de los ejes tridem se divide entre tres para poder emplear la escala de los ejes sencillos en los nomogramas de repeticiones permisibles tanto de fatiga como de erosión (Anexo C); sin embargo, como su efecto en el incremento del espesor de la losa es despreciable, no se tomarán en cuenta.

Los resultados de las repeticiones esperadas para todos los tipos de ejes que intervienen en este proyecto se presentan en la siguiente tabla:

Tipo de eje	Peso		Repeticiones al año	Repeticiones en la vida útil
	Kips	t		
Simple	2,20	1,00	902.353,00	24.246.225
Simple	3,74	1,70	148.562,00	3.991.861
Simple	6,60	2,99	27.723,00	744.917
Simple	7,70	3,49	51.300,00	1.378.431
Simple	8,36	3,79	148.562,00	3.991.861
Simple	8,80	3,99	13.244,00	355.866
Simple	12,10	5,49	96.075,00	2.581.535
Simple	15,40	6,99	23.056,00	619.515
Simple	22,00	9,98	76.950,00	2.067.647
Tándem	7,04	3,19	288,00	7.739
Tándem	7,26	3,29	288,00	7.739
Tándem	7,70	3,49	288,00	7.739
Tándem	8,80	3,99	17.553,00	471.649
Tándem	9,90	4,49	3.376,00	90.713
Tándem	11,00	4,99	7.164,00	192.497
Tándem	15,40	6,99	10.746,00	288.745
Tándem	17,60	7,98	7.164,00	192.497
Tándem	30,80	13,97	10.746,00	288.745
Tándem	39,60	17,96	32.691,00	878.407
Tridem	11,00	4,99	1.400,00	37.618
Tridem	49,50	22,45	2.100,00	56.427

Módulo de reacción (k) de diseño.

El valor de $k = 2.77 \text{ kg/cm}^3$ es de la subrasante y dado que se tiene una subbase granular de 20 cm, ese valor se modifica, resultando una k del conjunto subrasante – subbase de $k_c = 4.22 \text{ kg/cm}^3$, de acuerdo a la Tabla 2.15. Para efecto del ejemplo se usa un valor de 4 kg/cm^3 .

Esfuerzo equivalente.

Con el espesor inicial de 22 cm y k_c de diseño de 4 kg/cm^3 , en la tabla de esfuerzos equivalentes en kg/cm^2 y acotamiento sin pavimentar del Anexo D, se determinan los esfuerzos equivalentes para los ejes simples y tándem, obteniéndose 16.2 y 14.5 respectivamente.

Relación de esfuerzos.

La relación de esfuerzos se calcula dividiendo el esfuerzo equivalente entre el módulo de ruptura, por lo que para los ejes sencillos es de 0.36 y para los ejes tándem de 0.32.

Factor de erosión.

Con el espesor inicial de 22 cm y k_c de diseño de 4 kg/cm^3 , con la tabla de factor de erosión, junta con pasajuntas - acotamiento sin pavimento del Anexo E, se determinan factores de erosión para ejes simples

tándem y tridem, de 2.71 y 2.88, respectivamente.

Los resultados de todas las repeticiones permisibles de todos los tipos de ejes y los totales de daño, tanto por fatiga como por erosión, se muestran a continuación:

Cálculo de espesor del pavimento			
Proyecto: Vialidad Urbana de 2 sentidos y de 2 carriles por sentido			
Espesor inicial, cm	22	Pasajuntas	si
Módulo de reacción k de la subrasante	2.77 kg/cm ³	Apoyo lateral	no
Módulo de ruptura (MR) del concreto	45 kg/cm ²	Periodo de diseño, años	20
Factor de seguridad de carga, LSF	1,1	Comentarios: base granular de 20 cm	

Carga del eje (t)	Multiplicada por LSF	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permisibles	% de fatiga	Repeticiones permisibles	% de daño
Ejes simples						
Esfuerzo equivalente		16,2	Factor de relación de esfuerzo	0,36	Factor de erosión	2,71
1,0	1,1	24.246.225	ilimitadas	0	ilimitadas	0
1,7	1,9	3.991.861	ilimitadas	0	ilimitadas	0
3,0	3,3	744.917	ilimitadas	0	ilimitadas	0
3,5	3,8	1.378.431	ilimitadas	0	ilimitadas	0
3,8	4,2	3.991.861	ilimitadas	0	ilimitadas	0
4,0	4,4	355.866	ilimitadas	0	ilimitadas	0
5,5	6,0	2.581.535	ilimitadas	0	ilimitadas	0
7,0	7,7	619.515	ilimitadas	0	ilimitadas	0
10,0	11,0	2.067.647	2.500.000,00	82,71%	8.000.000,00	25,85%
Sub-total ejes sencillos				82,71%		25,85%
Ejes tándem						
Esfuerzo equivalente		14,5	Factor de relación de esfuerzo	0,32	Factor de erosión	2,88
3,2	3,5	7.739	ilimitadas	0	ilimitadas	0
3,3	3,6	7.739	ilimitadas	0	ilimitadas	0
3,5	3,8	7.739	ilimitadas	0	ilimitadas	0
4,0	4,4	471.649	ilimitadas	0	ilimitadas	0
4,5	4,9	90.713	ilimitadas	0	ilimitadas	0
5,0	5,5	192.497	ilimitadas	0	ilimitadas	0
7,0	7,7	288.745	ilimitadas	0	ilimitadas	0
8,0	8,8	192.497	ilimitadas	0	ilimitadas	0
14,0	15,4	288.745	ilimitadas	0	3.000.000,00	9,62%
18,0	19,8	878.407	ilimitadas	0	4.000.000,00	21,96%
Sub-total ejes tándem				0%		31,59%

TOTAL FATIGA	82,71%	TOTAL EROSIÓN	57,43%
---------------------	---------------	----------------------	---------------

Dado que los daños totales por fatiga y por erosión son ambos inferiores al 100%, el diseño es adecuado. El diseño es más susceptible a fallar por fatiga que por erosión.

Con el objeto de optimizar el espesor, se deben realizar varios tanteos con espesores menores para revisar si los daños por fatiga y por erosión son o no superiores al 100%. El diseño del espesor más adecuado es aquel que provoque daños los más cercanos al 100%.

MÉTODO SEGÚN NORMAS BRITÁNICAS.

Cálculo del tránsito de diseño

La equivalencia de la clasificación de los vehículos está contenida en la siguiente tabla, la norma no incluye el tránsito de vehículos ligeros.

Tipo de vehículo		AADF (F)	% AADF
Nomenclatura Mexicana	Nomenclatura Reino Unido		
A2	No se considera	-	-
A'2	No se considera	-	-
B2	PSV	168	32%
B4	PSV	52	10%
C2	OGV1	202	39%
C3	OGV1	25	5%
Total OGV1 +PSV		447	86%
T2-S2	OGV2	4	1%
T3-S2	OGV2	56	11%
T3-S3	OGV2	10	2%
T3-S2-R4	OGV2	2	0%
Total OGV2		72	14%
Total flujo diario		519	

Sin embargo, el porcentaje mínimo de vehículos OGV2 para construcción de pavimentos nuevos debe ser por lo menos el indicado en la Tabla 2.18, por lo que resulta un 38%. Con el valor anterior y la gráfica de la Fig. 2.7 se determina el flujo diario de vehículos tipo OGV2. En la tabla siguiente se calcula el tránsito de diseño.

Categoría vehículo comercial (cv)	AADF según norma (F)	Factor de crecimiento (G)	Factor de desgaste (W)	Tránsito promedio anual (msa)	
OGV1 +PSV	447	1,3435	1,0	0,219	
OGV2	750	1,3435	4,4	1,618	
Total flujo diario	1.197	Tránsito promedio anual		1,837	
				% vc en el carril más cargado (P)	96%
				Periodo de diseño, años (Y)	20
				Tránsito de diseño (T) msa	35

Diseño de la subrasante

Según el tránsito de diseño, la subrasante adecuada es de clase 2. Con la gráfica de la Fig. 2.11 y CBR de 5%, el espesor de la sub-base es de 32 cm.

Diseño del espesor del pavimento

Al sustituir los parámetros de diseño en la ecuación 2.21 para pavimentos con pasajuntas, resulta un espesor de 32 cm.

MÉTODO SEGÚN NORMAS ESPAÑOLAS.

Parámetros de diseño

Tránsito pesado

Según los datos del aforo realizado, se considera solo el tránsito pesado multiplicado por el factor de crecimiento 1.3435, dando como resultado un IMDp de 697, por lo que corresponde a la categoría de tránsito pesado T2 según la Tabla 2.21.

Formación de la subrasante

Según la Tabla 2.23, la categoría de subrasante es E1.

Sección del pavimento

Con los parámetros de diseño definidos y los catálogos de diseño del Anexo G, para la categoría de tránsito pesado T2 y categoría de subrasante E1, el espesor es de 23 cm.

Los métodos de la AASHTO, de la PCA y de la norma española, obtienen resultados similares. Por su parte, el método de las normas británicas obtiene un espesor con una desviación de 10 cm aproximadamente por arriba de los espesores obtenidos con los otros métodos, atribuido en parte a que consideran un porcentaje mínimo de vehículos pesados, que en el caso del ejemplo está por debajo de este parámetro.

4.2. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN

El proceso constructivo de pavimentos de concreto hidráulico descrito en el Capítulo 3, abarca las actividades consideradas en la Normas Mexicanas, Británicas y Españolas, con algunas diferencias en la tolerancias para la aceptación de los trabajos realizados. Diferencias sustanciales, en las normas españolas son la consideración de espesores variables en las capas de la estructura del pavimento, práctica que no es aplicada en México. Las Normas Británicas consideran, además, el proceso constructivo para la ampliación de una carretera existente.

Las actividades bajo las cuales se realiza la comparación de los criterios de construcción de los pavimentos de concreto hidráulicos son los siguientes:

- Terracerías y capa subrasante.
- Capa sub-base.
- Construcción de la losa de concreto hidráulico.

A continuación se mencionan las similitudes y diferencias entre los criterios de construcción según normas aplicadas en México, Reino Unido y España.

Terracerías y capa subrasante

Las principales actividades consideradas en las normas para la construcción de terracerías y capa subrasante son: i) desmonte y despalme del terreno natural, ii) excavaciones, y iii) construcción de terraplenes. Estas actividades se llevan a cabo bajo las especificaciones de proyecto.

Las normas mexicanas contemplan que el desraíce debe hacerse a una profundidad máxima de 1 m, las españolas señalan que para raíces mayores de 10 cm de diámetro se eliminan hasta una profundidad no menor a 50 cm, y las británicas no especifican una profundidad máxima, solo que el desraíce sea lo más cercano a la superficie del terreno natural.

En cuanto a excavaciones, las tolerancias especificadas en las normas mexicanas son de ± 10 cm en taludes, ± 3 cm en el fondo de excavaciones para canales y +50 cm con respecto a la línea de proyecto. Las normas británicas no especifican tolerancias; sin embargo, hacen referencia a los materiales inaceptables y a la profundidad que deben ser excavados. (Serie 600, Cláusula 603). Las tolerancias en las normas españolas son de ± 5 cm en todas las superficies teóricas de zanjas y pozos.

En la construcción de terraplenes, las normas mexicanas consideran un sobreebanco máximo de 2.5 m, y toman en consideración los materiales compactables y no compactables. Las normas británicas incluyen los procesos de compactación de acuerdo al tipo de material. El sobreebanco contemplado en las normas españolas es de al menos 20 cm por cada borde y los rellenos para terraplenes se ejecutan cuando la temperatura ambiente, a la sombra, sea superior a 2 °C, debiendo suspenderse los trabajos cuando la temperatura descienda por debajo de dicho límite.

Sub-base

En las normas mexicanas la construcción de la sub-base tiene las siguientes tolerancias de líneas y niveles: ancho de corona de + 5 cm y nivel de la superficie de ± 1 cm, respecto a las especificaciones del proyecto. Además el material, debe cumplir con los siguientes parámetros:

- Límite líquido máximo: 25%
- Índice de plástico máximo: 6%
- Desgaste Los Ángeles (porción gruesa) máximo: 40%
- Equivalente de arena mínimo: 40%
- Valor relativo de soporte (CBR) mínimo: 80%
- Grado de compactación mínimo: 100% en prueba ASSHTO modificada.

Las normas británicas consideran una tolerancia de líneas y niveles de + 3 mm en el ancho de corona y nivel de superficie de ± 6 mm. En cuanto a los materiales, proporcionan tablas que especifican sus diferentes características, incluyendo graduación y métodos de compactación según el tipo de material.

En las normas españolas la tolerancia para el nivel de la superficie es de ± 30 mm y ± 20 mm con tránsito T0, T1 y T2. En cuanto al material, se deben cumplir los siguientes parámetros:

- Límite líquido: 25% máx.
- Índice de plasticidad: 6% máx.
- Desgaste Los Ángeles (porción gruesa): 40% máx.
- Contracción lineal: 4% máx.
- Equivalente de arena: 25 mín.
- VRS: 20% mín.

Construcción de la losa de concreto hidráulico

Las normas mexicanas consideran para las juntas una tolerancia respecto a la elevación y espaciamiento de las pasajuntas de ± 5 mm y en la desviación angular del eje de cada pasajunta, +1 mm. En cuanto al índice de perfil consideran un máximo de 14 cm/km en tramos de 200 m, con máximo diario de 24 cm/km. La norma contempla para las líneas y pendiente una tolerancia para el ancho de la carpeta, del eje a orilla de ± 1 cm y para la pendiente transversal de ± 0.5 %.

Por su parte, las normas británicas tienen tolerancias de líneas y pendientes de 3 mm para el ancho de la carpeta, medido desde el eje hasta la orilla, y una alineación horizontal de 25 mm y 13 mm para los acotamientos; permite irregularidades de la superficie de 4 mm a 7 mm. La norma incluye, además, el proceso constructivo para ampliaciones de carreteras que se describe en el Capítulo 3.

La normativa española considera tolerancias para la elevación y espaciamiento de las pasajuntas de ± 20 mm, desviación angular del eje de cada pasajunta por vibración de ± 10 mm y desviación angular del eje de cada pasajunta debido a su colocación previa al colado de ± 5 mm. Las tolerancias en cuanto al ancho de la carpeta, del eje a orilla son de ± 3 cm. Para la aceptación del perfil del pavimento se mide con el índice de regularidad internacional (IRI) para autopistas y debe cumplir lo siguiente:

- 50% de hm: 1.5 dm/hm¹²
- 80% de hm: 1.8 dm/hm
- 100% de hm: 2 dm/hm

¹² dm/hm: decímetro/hectómetro

En la Tabla 4.2 contiene un resumen de las principales diferencias entre los criterios de construcción de pavimentos de concreto hidráulico aplicados en México, Reino Unido y España.

Tabla 4.2. Cuadro comparativo de normas aplicadas a la construcción de pavimentos de concreto hidráulico en México, Reino Unido y España.

DESCRIPCIÓN	NORMAS MEXICANAS	NORMAS BRITÁNICAS	NORMAS ESPAÑOLAS
TERRACERÍAS			
Desmante y despalme del terreno natural	De acuerdo a especificaciones del proyecto, apoyadas en las normas SCT.	De acuerdo a especificaciones del proyecto.	De acuerdo a especificaciones del proyecto. En el caso de raíces mayores de 10 cm de diámetro se eliminan hasta una profundidad no menor a 50 cm.
Excavaciones	Tolerancia: ± 10 cm en taludes y ± 3 cm en el fondo de la excavación para canales. Que no existan salientes con respecto a la línea de proyecto más de 50 cm.	No especifica tolerancias, sin embargo hace referencia a los materiales inaceptables y a la profundidad que deben ser excavados. (Serie 600, Clausula 603).	Tolerancia: ± 5 cm en todas las superficies teóricas en zanjas y pozos.
Terraplenes	<ul style="list-style-type: none"> Sobreancho máximo de 2.5 m. Consideración de materiales compactables y no compactables. 	El proceso de compactación viene especificado en la norma de acuerdo al tipo de material.	<ul style="list-style-type: none"> Sobreancho de al menos 20 cm por cada borde. Los rellenos para terraplenes se ejecutan cuando la temperatura ambiente, a la sombra, sea superior a dos grados Celsius (2°C), debiendo suspenderse los trabajos cuando la temperatura descienda por debajo de dicho límite.
SUB-BASE	Tolerancia para líneas y niveles: <ul style="list-style-type: none"> Ancho de la corona + 5 cm Nivel de la superficie ± 1 cm El material debe cumplir: <ul style="list-style-type: none"> Límite líquido máximo: 25% Índice de plástico máximo: 6% Desgaste Los Ángeles (porción gruesa) máximo: 40% Equivalente de arena mínimo: 40% Valor soporte de California mínimo: 80% Grado de compactación mínimo: 100% en prueba ASSHTO modificada. 	Tolerancia para líneas y niveles: <ul style="list-style-type: none"> Ancho de la corona + 3 mm Nivel de la superficie ± 6 mm 	Tolerancia para líneas y niveles: <ul style="list-style-type: none"> Nivel de la superficie ± 3 mm Nivel de la superficie ± 20 mm con tránsito T0, T1 y T2. El material debe cumplir: <ul style="list-style-type: none"> Límite líquido: 25% máx. Índice de plasticidad: 6% máx. Desgaste los ángeles (porción gruesa): 40% máx. Contracción lineal: 4% máx. Equivalente de arena: 25 mín. VRS: 20% mín.
LOSA DE CONCRETO HIDRÁULICO	Juntas <ul style="list-style-type: none"> Elevación y espaciamiento de las pasajuntas: ± 5 mm Desviación angular del eje de cada pasajunta: +1 mm Índice de perfil <ul style="list-style-type: none"> Índice de perfil máximo en tramos de 200 m: 14 cm/km Índice de perfil promedio diario máximo: 24 cm/km Líneas y pendiente <ul style="list-style-type: none"> Ancho de la carpeta, del eje a orilla: ± 1 cm Pendiente transversal: ± 0.5 % 	Líneas y pendiente <ul style="list-style-type: none"> Ancho de la carpeta, del eje a orilla: 3 mm Alineación horizontal: 25 mm y 13 mm para los acotamientos. Irregularidades de la superficie: 4 mm a 7 mm La norma incluye el proceso constructivo para ampliaciones de carreteras	Juntas <ul style="list-style-type: none"> Elevación y espaciamiento de las pasajuntas: ± 20 mm Desviación angular del eje de cada pasajunta: <ul style="list-style-type: none"> Por vibración: ± 10 mm Colocación previa al colado: ± 5 mm Índice de regularidad internacional (IRI) para autopistas <ul style="list-style-type: none"> 50% de hm: 1.5 dm/hm 80% de hm: 1.8 dm/hm 100% de hm: 2 dm/hm Líneas y pendiente <ul style="list-style-type: none"> Ancho de la carpeta, del eje a orilla: ± 3 cm

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La infraestructura vial es esencial para el desarrollo y competitividad del País y, a su vez, para mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Tener una red carretera en buenas condiciones conlleva ahorro en combustible, menor tiempo de traslado, conservación de la calidad de los productos y menor depreciación de los medios de transporte.
2. Los pavimentos de concreto hidráulico son una buena opción para el País, pero es necesario evaluar su comportamiento en diferentes ambientes para adecuar su diseño según las características climatológicas y los materiales de cada sitio.
3. El pavimento se degrada por efecto del tránsito y de aspectos ambientales, por lo que deben recibir una atención adecuada. Esto se logra a través de una evaluación eficiente del pavimento, lo que permite detectar las condiciones adversas a las que estará sometido y, de esta manera, modificar el diseño, procesos constructivos, seleccionar los materiales, que nos permitan tener mayor posibilidad de durabilidad.
4. La norma mexicana no especifica un método de diseño de pavimento de concreto hidráulico, sólo incluye los pesos máximos que este debe soportar y las características de la sub-base, dando lugar a que el proyectista tenga la libertad de escoger el método de diseño que más le convenga, cabe destacar que los métodos aplicados en México son utilizados ampliamente a nivel mundial.
5. La norma británica sobre pavimento de concreto hidráulico incluye el diseño completo de la estructura del pavimento y establece parámetros mínimos en las cargas. Cuando el flujo promedio calculado de vehículos está por debajo de lo especificado por la norma, utilizan los parámetros mínimos, lo cual podría traducirse en un sobrediseño que impacta en costos de construcción; sin embargo, con ello se garantiza que la vida útil del pavimento no se vea disminuido por el crecimiento del tránsito.
6. El método de diseño de las normas españolas para este tipo de pavimentos, es muy práctico, ya que su catálogo de diseño contiene secciones de pavimentos predeterminadas. Estas secciones fueron estudiadas a escala natural para analizar su comportamiento, y su diseño fue revisado con el método AASHTO, además de otros.
7. En el aspecto constructivo de pavimentos de concreto hidráulico, la norma mexicana abarca de forma concreta todos los aspectos para una construcción nueva, incluyendo obras de drenaje, subdrenaje y terracerías, con especificaciones de las características de los materiales de terracerías y capas del pavimento.
8. Las normas británicas son específicas en cuanto al proceso constructivo de pavimentos nuevos y ampliaciones de pavimentos existentes; sin embargo, en cuanto a materiales son confusas, dado que no definen características de estos por capa de pavimento y terracerías, sino por la clase de material.

9. La norma española incluye la construcción de pavimentos de espesor variable, que aunque se reducen costos en materiales, involucra un proceso constructivo más prolongado y con más controles, además de no ser una práctica común en México.
10. Se sugiere que se incluya dentro de las normas mexicanas una metodología de diseño de pavimentos de concreto hidráulico, tomando en cuenta las características del tránsito y condiciones climáticas.
11. Es conveniente analizar las diferentes regiones de la República Mexicana según los tipos de materiales existentes, con el objeto de tipificar las estructuras y homogenizar los diseños.
12. Se sugiere el desarrollo de tramos de pruebas con secciones de pavimentos definidas de acuerdo a la regionalización según los tipos de materiales, para analizar su comportamiento tomando en cuenta criterios de durabilidad como los mencionados en el Anexo B.
13. La norma mexicana en el aspecto constructivo de pavimentos de concreto es bastante completa; sin embargo, es conveniente que se incluyan especificaciones para ampliación de pavimentos existentes.
14. Se propone como línea de investigación sucesiva a este trabajo, el diseño y análisis del comportamiento de estructuras de pavimentos de concreto hidráulico con base en la regionalización según tipos de materiales y condiciones climáticas.

BIBLIOGRAFÍALibros de consulta

1. RICO RODRIGUEZ Alfonso y DEL CASTILLO Hermilo, “La ingeniería de suelos en las vías terrestres 2: carreteras, ferrocarriles y autopistas”, Editorial Limusa, México 2005.
2. CRESPO Carlos, “Vías de comunicación: Caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos”, Editorial Limusa, Tercera Edición, México 2004.
3. GRIFFITHS Geoffrey y THOM Nick, “Concrete Pavement Design Guidance Notes”, Taylor & Francis, London y New York, 2007.
4. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, Carpeta de indicadores, Estadísticas Abril 2011.
5. HUANG Yang Hsein, “Pavement analysis and design”, Englewood Cliffs, Editorial Prentice Hall, New Jersey, 1993.
6. SALAZAR RODRIGUEZ Aurelio, “Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos”, IMCYC, 1997.

Revistas técnicas consultadas

7. ARRIAGA PATIÑO Mario, GARNICA ANGUAS Paul y RICO RODRÍGUEZ Alfonso, “Índice internacional de Rugosidad en la red carretera de México”, Publicación Técnica No.108, Sanfandila, Querétaro 1998.
8. RICO RODRÍGUEZ Alfonso y DEL CASTILLO Hermilo, “Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte”, Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico No. 7, Sanfandila, Qro, 1992.

Conferencias y congresos

9. OLAGUE CABALLERO Cecilia y CASTRO BORGES Pedro, “Primer Foro Interamericano para la promoción y el desarrollo de los pavimentos de concreto hidráulico”, Evaluación de pavimentos de concreto hidráulico, México 1998.
10. I Curso de Diseño de Firmes de Andalucía. “Diseño, cálculo y dimensionamiento de secciones”. España, 1.999.
11. KRAEMER Carlos y ALBELDA Raúl, “VI Congreso Nacional de Firmes”, evaluación técnico-económica de las secciones de firme de la norma 6.1-IC, 2004.

Manuales

12. AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, 1993.
13. PACKARD Robert G., “Thickness design for concrete highway and street pavements”, Portland Cement Association, 1995.
14. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, “Normativa para la infraestructura del transporte (Normativa SCT), Carreteras, Construcción (CTR), 2011.
15. Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, 2008.
16. DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES (DMRB), volume 7 “Pavement Design and Maintenance”, section 2 “Pavement Design and Construction”, 2011.
17. MANUAL OF CONTRACT DOCUMENTS FOR HIGHWAY WORKS (MCHW), volume 3 “Specification for Highway Works”, 2009.
18. DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS. “Instrucción de carreteras. Norma 6.1 IC Secciones de firmes”. Editorial Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, España, 2010.
19. CEMEX, “Manual de pavimentos de concreto”, México.

Páginas Web

20. www.e-comunicacionesytransportes.gob.mx
21. www.imt.mx
22. www.sct.gob.mx
23. www.canacem.org.mx
24. www.imcyc.com
25. www.dft.gov.uk

ANEXOS

ANEXO A. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

Los parámetros de durabilidad en pavimentos de concreto hidráulico que deben analizarse para su evaluación son los siguientes:

- Materiales constituyentes del concreto.
- Propiedades químicas y físicas del concreto.
- Procesos de construcción a los que se somete el concreto.
- Tipos de carga.
- Naturaleza del ambiente al que esté expuesto el pavimento.
- Procesos de congelación y descongelación.
- Efecto de elevados gradientes de temperatura y fuertes oscilaciones de la humedad relativa.

En el caso de los pavimentos de concreto reforzado con pasajuntas ó con pasajuntas y barras de sujeción, debe estudiarse además:

- Efecto de la corrosión del acero de refuerzo en el deterioro de los pavimentos.
- Contaminación por sulfatos.
- Carbonatación.
- Contaminación por cloruros.
- Efecto que los aditivos empleados ejercen en la durabilidad de las mezclas de concreto elaboradas en la construcción de pavimentos.

La metodología para evaluar pavimentos de concreto con criterios de durabilidad, considera cinco áreas básicas: 1) materiales, 2) procedimientos de construcción, 3) tipos de carga, 4) efectos ambientales y 5) respuesta del pavimento a estos efectos. El conocimiento de la incidencia de cada una de estas áreas básicas en la estructura del pavimento y su respuesta en términos de durabilidad, conducen a una serie de recomendaciones, normas y criterios que permiten contar con pavimentos más durables. La metodología involucra lo siguiente:

A. Inventario

La evaluación se inicia con un inventario de los pavimentos de concreto de la región que se estudia, haciendo un levantamiento de campo, en el que se recopila la siguiente información:

- Nombre del tramo en estudio.
- Tipos y volúmenes de carga que circulan por el tramo.

- Fecha de construcción del tramo.
- Ubicación.
- Características geométricas, incluyen longitud, ancho y área.
- Historial del tránsito.
- Espesores del pavimento (losa y sub-base).
- Tipo de cemento.
- Peso del material cementante.
- Relación agua/cemento.
- Resistencia a la flexión.
- Resistencia a la compresión.
- Tamaño máximo del agregado.
- Tipos de juntas
- Datos climatológicos.

B. Evaluación preliminar

Con los datos del inventario se realiza una evaluación preliminar. En esta etapa se define la calidad de la circulación del tramo, indicando la condición funcional del mismo a través de los índices de servicio.

Los índices de servicio más utilizados en la evaluación son: i) el índice de servicio actual, ii) el índice de serviciabilidad presente y iii) el índice de rugosidad internacional.

i) Índice de servicio actual (ISA).

Este índice es utilizado en México por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) y los gobiernos estatales. Consiste en calificar el grado de confort y seguridad que el usuario percibe al transitar por un camino a la velocidad de operación. La evaluación la realiza un grupo o panel de evaluadores. Cada evaluador debe calificar el camino de una manera subjetiva en una escala de 0 a 5, correspondiente a una superficie intransitable y a una superficie perfecta, respectivamente. El resultado de cada sección de pavimento se reporta por separado, como el promedio del valor asignado por el grupo de evaluadores.

La Fig. A.1. muestra la escala del ISA y la calificación correspondiente a la condición del camino.

<u>ISA</u>	<u>condición del camino</u>
5	Muy bueno
4	Bueno
3	Regular
2	Malo
1	Pésimo
0	

Fig. A.1. Condición del camino respecto al Índice de Servicio Actual (ISA)

ii) Índice de serviciabilidad presente (PSI).

La serviciabilidad de un pavimento se define como la capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual ha sido diseñado. Este concepto fue desarrollado durante la prueba AASHO Road Test (Carey y Rick, 1960). Correlaciona la apreciación subjetiva de la calidad de manejo, medida como la capacidad del pavimento para proporcionar al tránsito, de todo tipo, una alta velocidad, con altos volúmenes y medidas físicas del camino como son áreas de deterioro y levantamientos del perfil longitudinal y transversal.

iii) Índice de rugosidad internacional (IRI).

Consiste en la medición de la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino. Su cálculo se basa en la acumulación de desplazamientos de la masa superior con respecto a la masa de un modelo de vehículo, dividido entre la distancia recorrida sobre un camino que se produce por los movimientos al vehículo cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/hr. Este índice se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, e indica la rugosidad del tramo o calidad de circulación como una medida de la distorsión del pavimento en un plano. En la Fig. A.2 se muestran la escala de valores del IRI y las características de los pavimentos.

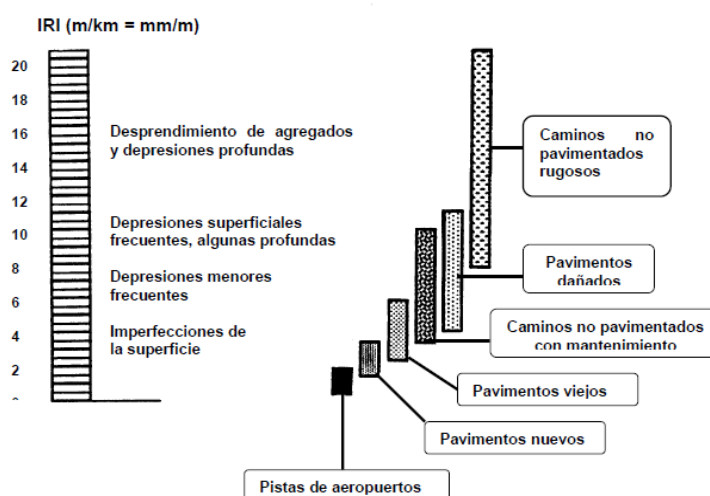


Fig. A.2. Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos

C. Evaluación detallada

Con base en los resultados de la evaluación preliminar se definen las áreas a las que se hará una evaluación detallada de deterioros, utilizando el catálogo de deterioros del SHRP (Strategic Highway Research Program) para pavimentos de larga duración. Se deben incluir en la evaluación los deterioros provocados por la corrosión del acero de refuerzo, el estado de corrosión de pasajuntas y barras de sujeción, evidencias de reactividad álcali agregado y de contaminaciones químicas, entre otros efectos.

Los aspectos básicos que inciden en la durabilidad de los pavimentos de concreto hidráulico son los siguientes:

i) Materiales

Se realizan estudios de caracterización de los materiales y de las propiedades químicas y físicas del concreto. Es fundamental el conocimiento de las propiedades de los materiales empleados en cada región, para lo cual deben realizarse análisis petrográficos, valoración de los agregados potencialmente reactivos y de los cementos, considerando la composición química de los mismos, el contenido de álcalis y su finura.

En cuanto a las propiedades químicas y físicas del concreto, se estudian todos los componentes que le constituyen: cemento, agregado fino, agregado grueso, agua de mezclado, relación agua/cemento y aditivos. También deben tomarse en cuenta el espesor del pavimento, los componentes químicos existentes en la base hidráulica y la dosificación de la mezcla.

ii) Procedimientos de construcción

Se efectúa una recopilación de los procedimientos y equipos de construcción utilizados en la región. Posteriormente, con base en las evaluaciones preliminar y detallada realizadas, se crea una base de datos por tipos de juntas y grietas profundas de acuerdo con la convención sugerida en las mismas metodologías.

Para determinar la eficiencia de las juntas mediante la medición de las deflexiones del área cargada contra el área no cargada puede emplearse por ejemplo el procedimiento de la viga Benkelman.

iii) Tipos de carga

La información sobre los tipos de carga se obtiene de la recopilación de datos existentes en las dependencias gubernamentales o empresas. Sin embargo, es necesario verificar los datos mediante aforos vehiculares que determinen tanto el volumen como la composición del tránsito que circula por las vialidades. Es importante que esta información sea lo más confiable y precisa posible.

Los datos básicos que se requieren para el análisis bajo criterios de durabilidad son:

- Volúmenes vehiculares máximos.
- Datos del tránsito diario promedio anual (TDPA).

- Dimensiones y peso máximo de los vehículos que circulan por los pavimentos.

iv) Efectos ambientales

Es importante el estudio de los mecanismos que inducen el agrietamiento por contracción plástica del concreto, así como el agrietamiento por cargas de servicio y que inciden significativamente en una menor durabilidad de los pavimentos. Por ello se requiere información del gradiente térmico, la humedad relativa y datos de contaminación por sulfatos, bióxido de carbono y cloruros, de cada región y en cada caso particular de interés.

v) Respuesta del pavimento a los efectos ambientales

Dentro de los análisis que deben realizarse, se enumeran los siguientes:

- Estudio de resistencia al congelamiento y al deshielo. Se realiza en las regiones con susceptibilidad alta y media, de acuerdo con la regionalización del país. Esta información se relacionará con datos previamente obtenidos de porosidad, absorción, permeabilidad y estructura de los agregados.
- Pruebas para determinar la profundidad de carbonatación en los pavimentos existentes en cada región, seleccionando los sitios de muestreo con base en la antigüedad y en las condiciones que propicien la presencia de este problema.
- Determinación del frente de sulfatación y del perfil de cloruros, dependiendo de la información relativa a contaminaciones existentes.
- Conocimiento de las condiciones locales que inducen el deterioro del acero empleado en el pavimento rígido (pasajuntas y barras de sujeción).

ANEXO B. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Tabla B.1. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes sencillos Pt de 2.0

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
4	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
5	0.087	0.84	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
5.5	0.186	0.180	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173	0.173
6.5	0.353	0.346	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336	0.336
7.0	0.614	0.609	0.604	0.601	0.599	0.599	0.598	0.598	0.598
8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	1.55	1.56	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59	1.59
10	2.32	2.32	2.35	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41	2.42
11	3.37	3.34	3.40	3.47	3.51	3.53	3.54	3.55	3.55
12	4.76	4.69	4.77	4.88	4.97	5.02	5.04	5.06	5.06
13	6.58	6.44	6.52	6.70	6.85	6.94	7.00	7.02	7.04
14	8.92	8.68	8.74	8.98	9.23	9.39	9.48	9.54	9.56
14.5	11.9	11.5	11.5	11.8	12.2	12.4	12.6	12.7	12.7
15.5	15.5	15.0	14.9	15.3	15.8	16.2	16.4	16.6	16.7
16.5	20.1	19.3	19.2	19.5	20.1	20.7	21.1	21.4	21.5
17	25.6	24.5	24.3	24.6	25.4	26.1	26.7	27.1	27.4
18	32.2	30.8	30.4	30.7	31.6	32.6	33.4	34.0	34.4
19	40.1	38.4	37.7	38.0	38.9	40.1	41.3	42.1	42.7
20	49.4	47.3	46.4	46.6	47.6	49.0	50.4	51.6	52.4
21	60.4	57.7	56.6	56.7	57.7	59.3	61.1	62.6	63.7
22	73.2	69.9	68.4	68.4	69.4	71.2	73.3	75.3	76.8
23	88.0	84.1	82.2	82.0	83.0	84.9	87.4	89.8	91.7

Tabla B.2. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tandem Pt de 2.0

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2.0	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
3.0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4.0	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
4.5	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
5.5	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
6.5	0.051	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
7.0	0.087	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
8.0	0.141	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131
9.0	0.216	0.210	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203
10.0	0.319	0.313	0.307	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303	0.303
11.0	0.454	0.449	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439	0.439
12.0	0.629	0.626	0.622	0.620	0.618	0.618	0.618	0.618	0.618
13.0	0.852	0.851	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849	0.849
14.5	1.48	1.48	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
15.5	1.90	1.90	1.93	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97	1.97
16.5	2.42	2.41	2.45	2.49	2.51	2.52	2.53	2.53	2.53
17.0	3.04	3.02	3.07	3.13	3.17	3.19	3.20	3.20	3.21
18.0	3.79	3.74	3.80	3.89	3.95	3.98	4.00	4.01	4.01
19.0	4.67	4.59	4.66	4.78	4.87	4.93	4.95	4.97	4.97
20.0	5.72	5.59	5.67	5.82	5.95	6.03	6.07	6.09	6.10
21.0	6.94	6.76	6.83	7.02	7.20	7.31	7.37	7.41	7.43
22.0	8.36	8.12	8.17	8.40	8.63	8.79	8.88	8.93	8.96
23.0	10.00	9.69	9.72	9.98	10.27	10.49	10.62	10.69	10.73
24.0	11.9	11.5	11.5	11.8	12.1	12.4	12.6	12.7	12.8
24.5	14.0	13.5	13.5	13.8	14.2	14.6	14.9	15.0	15.1
25.5	16.5	15.9	15.8	16.1	16.6	17.1	17.4	17.6	17.7
26.5	19.3	18.5	18.4	18.7	19.3	19.8	20.3	20.5	20.7
27.0	22.4	21.5	21.3	21.6	22.3	22.9	23.5	23.8	24.0
28.0	25.9	24.9	24.6	24.9	25.6	26.4	27.0	27.5	27.7
29.0	29.9	28.6	28.2	28.5	29.3	30.2	31.0	31.6	31.9
30.0	34.3	32.8	32.3	32.6	33.4	34.4	35.4	36.1	36.5
31.0	39.2	37.5	36.8	37.1	37.9	39.1	40.2	41.1	41.6
32.0	44.6	42.7	41.9	42.1	42.9	44.2	45.5	46.6	47.3
33.0	50.6	48.4	47.5	47.6	48.5	49.9	51.4	52.6	53.5
33.5	57.3	54.7	53.6	53.6	54.6	56.1	57.7	59.2	60.3
34.5	64.6	61.7	60.4	60.3	61.2	62.8	64.7	66.4	67.7
35.5	72.5	69.3	67.8	67.7	68.6	70.2	72.3	74.3	75.8
36.5	81.3	77.6	75.9	75.7	76.6	78.3	80.6	82.8	84.7
37.0	90.9	86.7	84.7	84.4	85.3	87.1	89.6	92.1	94.2
38.0	101.0	97.0	94.0	94.0	95.0	97.0	99.0	102.0	105.0
39.0	113.0	107.0	105.0	104.0	105.0	107.0	110.0	113.0	116.0
40.0	125.0	119.0	116.0	116.0	116.0	118.0	121.0	125.0	128.0
41.6	138.0	132.0	129.0	128.0	129.0	131.0	134.0	137.0	141.0

Tabla B.3. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes triple Pt de 2.0

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2.0	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
3.0	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
4.0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4.5	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
5.5	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
6.5	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
7.0	0.030	0.029	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
8.0	0.047	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043
9.0	0.072	0.069	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
10.0	0.105	0.101	0.099	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097
11.0	0.149	0.144	0.141	0.139	0.139	0.138	0.138	0.138	0.138
12.0	0.205	0.199	0.195	0.194	0.193	0.192	0.192	0.192	0.192
13.0	0.276	0.270	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262	0.262	0.261
14.0	0.364	0.359	0.354	0.351	0.350	0.349	0.349	0.349	0.349
14.5	0.472	0.468	0.463	0.460	0.459	0.458	0.458	0.458	0.458
15.5	0.603	0.600	0.596	0.594	0.593	0.592	0.592	0.592	0.592
16.5	0.759	0.758	0.757	0.756	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
17.0	0.946	0.947	0.949	0.950	0.951	0.951	0.951	0.951	0.951
18.0	1.17	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.19
19.0	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
21.0	2.08	2.07	2.10	2.13	2.15	2.16	2.16	2.16	2.17
22.0	2.48	2.47	2.51	2.55	2.58	2.59	2.60	2.60	2.61
23.0	2.95	2.92	2.97	3.03	3.07	3.09	3.10	3.11	3.11
24.0	3.48	3.44	3.50	3.58	3.63	3.66	3.68	3.69	3.69
24.5	4.09	4.03	4.09	4.20	4.27	4.31	4.33	4.35	4.35
25.5	4.78	4.69	4.76	4.89	4.99	5.05	5.08	5.09	5.10
26.5	5.57	5.44	5.51	5.66	5.79	5.87	5.91	5.94	5.95
27.0	6.45	6.29	6.35	6.53	6.69	6.79	6.85	6.88	6.90
28.0	7.43	7.23	7.28	7.49	7.69	7.82	7.90	7.94	7.97
29.0	8.54	8.28	8.32	8.55	8.80	8.97	9.07	9.13	9.16
30.0	9.76	9.46	9.48	9.73	10.02	10.24	10.37	10.44	10.48
31.0	11.1	10.8	10.8	11.0	11.4	11.6	11.8	11.9	12.0
32.0	12.6	12.2	12.2	12.5	12.8	13.2	13.4	13.5	13.6
33.0	14.3	13.8	13.7	14.0	14.5	14.9	15.1	15.3	15.4
33.5	16.1	15.5	15.4	15.7	16.2	16.7	17.0	17.2	17.3
34.5	18.2	17.5	17.3	17.6	18.2	18.7	19.1	19.3	19.5
35.5	20.4	19.6	19.4	19.7	20.3	20.9	21.4	21.7	21.8
36.5	22.8	21.9	21.6	21.9	22.6	23.3	23.8	24.2	24.4
37.0	25.4	24.4	24.1	24.4	25.0	25.8	26.5	26.9	27.2
38.0	28.3	27.1	26.7	27.0	27.7	28.6	29.4	29.9	30.2
39.0	31.4	30.1	29.6	29.9	30.7	31.6	32.5	33.1	33.5
40.0	34.8	33.3	32.8	33.0	33.8	34.8	35.8	36.6	37.1
41.0	38.5	36.8	36.2	36.4	37.2	38.3	39.4	40.3	40.9

Tabla B.4. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes sencillos Pt de 2.5

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
2.0	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3.0	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
4.0	0.039	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
4.5	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
5.5	0.203	0.189	0.181	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173
6.5	0.376	0.360	0.347	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336
7.0	0.634	0.623	0.610	0.604	0.601	0.599	0.599	0.599	0.598
8.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9.0	1.51	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59
10.0	2.21	2.20	2.28	2.34	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41
11.0	3.16	3.10	3.22	3.36	3.45	3.50	3.53	3.54	3.55
12.0	4.41	4.26	4.42	4.67	4.85	4.95	5.01	5.04	5.05
13.0	6.05	5.76	5.92	6.29	6.61	6.81	6.92	6.98	7.01
14.0	8.16	7.67	7.79	8.28	8.79	9.14	9.35	9.46	9.52
14.5	10.8	10.1	10.1	10.7	11.4	12.0	12.3	12.6	12.7
15.5	14.1	13.0	12.9	13.6	14.6	15.4	16.0	16.4	16.5
16.5	18.2	16.7	16.4	17.1	18.3	19.5	20.4	21.0	21.3
17.0	23.1	21.1	20.6	21.3	22.7	24.3	25.6	26.4	27.0
18.0	29.1	26.5	25.7	26.3	27.9	29.9	31.6	32.9	33.7
19.0	36.2	32.9	31.7	32.2	34.0	36.3	38.7	40.4	41.6
20.0	44.6	40.4	38.8	39.2	41.0	43.8	46.7	49.1	50.8
21.0	54.5	49.3	47.1	47.3	49.2	52.3	55.9	59.0	61.4
22.0	66.1	59.7	56.9	56.8	58.7	62.1	66.3	70.3	73.4
23.0	79.4	71.7	68.2	67.8	69.6	73.3	78.1	83.0	87.1

Tabla B.5. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tandem Pt de 2.5

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2.0	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
3.0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4.0	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
4.5	0.015	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
5.5	0.031	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
6.5	0.057	0.052	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
7.0	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
8.0	0.155	0.143	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
9.0	0.234	0.220	0.211	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
10.0	0.340	0.325	0.313	0.308	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303
11.0	0.475	0.462	0.450	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439
12.0	0.644	0.637	0.627	0.622	0.620	0.619	0.618	0.618	0.618
13.0	0.855	0.854	0.852	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849
14.0	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
14.5	1.43	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51
15.5	1.82	1.82	1.87	1.92	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97
16.5	2.29	2.27	2.35	2.43	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53
17.0	2.85	2.80	2.91	3.03	3.12	3.16	3.18	3.20	3.20
18.0	3.52	3.42	3.55	3.74	3.87	3.94	3.98	4.00	4.01
19.0	4.32	4.16	4.30	4.55	4.74	4.86	4.91	4.95	4.96
20.0	5.26	5.01	5.16	5.48	5.75	5.92	6.01	6.06	6.09
21.0	6.36	6.01	6.14	6.53	6.90	7.14	7.28	7.36	7.40
22.0	7.64	7.16	7.27	7.73	8.21	8.55	8.75	8.86	8.92
23.0	9.11	8.50	8.55	9.07	9.68	10.14	10.42	10.58	10.66
24.0	10.8	10.0	10.0	10.6	11.3	11.9	12.3	12.5	12.7
24.5	12.8	11.8	11.7	12.3	13.2	13.9	14.5	14.8	14.9
25.5	15.0	13.8	13.6	14.2	15.2	16.2	16.8	17.3	17.5
26.5	17.5	16.0	15.7	16.3	17.5	18.6	19.5	20.1	20.4
27.0	20.3	18.5	18.1	18.7	20.0	21.4	22.5	23.2	23.6
28.0	23.5	21.4	20.8	21.4	22.8	24.4	25.7	26.7	27.3
29.0	27.0	24.6	23.8	24.4	25.8	27.7	29.3	30.5	31.3
30.0	31.0	28.1	27.1	27.6	29.2	31.3	33.2	34.7	35.7
31.0	35.4	32.1	30.9	31.3	32.9	35.2	37.5	39.3	40.5
32.0	40.3	36.5	35.0	35.3	37.0	39.5	42.1	44.3	45.9
33.0	45.7	41.4	39.6	39.8	41.5	44.2	47.2	49.8	51.7
33.5	51.7	46.7	44.6	44.7	46.4	49.3	52.7	55.7	58.0
34.5	58.3	52.6	50.2	50.1	51.8	54.9	58.6	62.1	64.8
35.5	65.5	59.1	56.3	56.1	57.7	60.9	65.0	69.0	72.3
36.5	73.4	66.2	62.9	62.5	64.2	67.5	71.9	76.4	80.2
37.0	82.0	73.9	70.2	69.6	71.2	74.7	79.4	84.4	88.8
38.0	91.4	82.4	78.1	77.3	78.9	82.4	87.4	93.0	98.1
39.0	102.0	92.0	87.0	86.0	87.0	91.0	96.0	102.0	108.0
40.0	113.0	102.0	96.0	95.0	96.0	100.0	105.0	112.0	119.0
41.0	125.0	112.0	106.0	105.0	106.0	110.0	115.0	123.0	130.0

Tabla B.6. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes triple Pt de 2.5

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2.0	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
3.0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
4.0	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4.5	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
5.5	0.011	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
6.5	0.020	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
7.0	0.033	0.030	0.029	0.029	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
8.0	0.053	0.048	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043	0.043
9.0	0.080	0.073	0.069	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
10.0	0.116	0.107	0.101	0.099	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097
11.0	0.163	0.151	0.144	0.141	0.139	0.139	0.138	0.138	0.138
12.0	0.222	0.209	0.200	0.195	0.194	0.193	0.192	0.192	0.192
13.0	0.295	0.281	0.271	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262	0.262
14.0	0.384	0.371	0.359	0.354	0.351	0.350	0.349	0.349	0.349
14.5	0.490	0.480	0.480	0.463	0.460	0.459	0.458	0.458	0.458
15.5	0.616	0.609	0.601	0.596	0.594	0.593	0.592	0.592	0.592
16.5	0.765	0.762	0.759	0.757	0.756	0.755	0.755	0.755	0.755
17.0	0.939	0.941	0.946	0.948	0.950	0.951	0.951	0.951	0.951
18.0	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
19.0	1.38	1.38	1.41	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46
20.0	1.65	1.65	1.70	1.74	1.77	1.78	1.78	1.78	1.78
21.0	1.97	1.96	2.03	2.09	2.13	2.15	2.16	2.16	2.16
22.0	2.34	2.31	2.40	2.49	2.55	2.58	2.59	2.60	2.60
23.0	2.76	2.71	2.81	2.94	3.02	3.07	3.09	3.10	3.11
24.0	3.24	3.15	3.27	3.44	3.56	3.62	3.66	3.68	3.68
24.5	3.79	3.66	3.79	4.00	4.16	4.26	4.30	4.33	4.34
25.5	4.41	4.23	4.37	4.63	4.84	4.97	5.03	5.07	5.09
26.5	5.12	4.87	5.00	5.32	5.59	5.76	5.85	5.90	5.93
27.0	5.91	5.59	5.71	6.08	6.42	6.64	6.77	6.84	6.87
28.0	6.80	6.39	6.50	6.91	7.33	7.62	7.79	7.88	7.93
29.0	7.79	7.29	7.37	7.82	8.33	8.70	8.92	9.04	9.11
30.0	8.90	8.28	8.33	8.83	9.42	9.88	10.17	10.33	10.42
31.0	10.1	9.4	9.4	9.9	10.6	11.2	11.5	11.7	11.9
32.0	11.5	10.6	10.6	11.1	11.9	12.6	13.0	13.3	13.5
33.0	13.0	12.0	11.8	12.4	13.3	14.1	14.7	15.0	15.2
33.5	14.6	13.5	13.2	13.8	14.8	15.8	16.5	16.9	17.1
34.5	16.5	15.1	14.8	15.4	16.5	17.6	18.4	18.9	19.2
35.5	18.5	16.9	16.5	17.1	18.2	19.5	20.5	21.1	21.5
36.5	20.6	18.8	18.3	18.9	20.2	21.6	22.7	23.5	24.0
37.0	23.0	21.0	20.3	20.9	22.2	23.8	25.2	26.1	26.7
38.0	25.6	23.3	22.5	23.1	24.5	26.2	27.8	28.9	29.6
39.0	28.4	25.8	24.9	25.4	26.9	28.6	30.5	31.9	32.8
40.0	31.5	28.6	27.5	27.9	29.4	31.5	33.5	35.1	36.1
41.0	34.8	31.5	30.3	30.7	32.2	34.4	36.7	38.5	39.8

Tabla B.7. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes sencillos Pt de 3.0

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
2.0	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
3.0	0.14	0.12	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
4.0	0.045	0.038	0.034	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
4.5	0.111	0.095	0.087	0.083	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
5.5	0.228	0.202	0.186	0.179	0.176	0.174	0.174	0.174	0.173
6.5	0.408	0.378	0.355	0.344	0.340	0.337	0.337	0.336	0.336
7.0	0.660	0.640	0.619	0.608	0.603	0.600	0.599	0.599	0.599
8.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9.0	1.46	1.47	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59
10.0	2.07	2.06	2.18	2.29	2.35	2.38	2.40	2.41	2.41
11.0	2.90	2.81	3.00	3.23	3.36	3.47	3.51	3.53	3.54
12.0	4.00	3.77	4.01	4.40	4.70	4.87	4.96	5.01	5.04
13.0	5.43	4.99	5.23	5.80	6.31	6.65	6.83	6.93	6.98
14.0	7.27	6.53	6.72	7.46	8.25	8.83	9.17	9.36	9.46
14.5	9.59	8.47	8.53	9.42	10.54	11.44	12.03	12.37	12.56
15.5	12.5	10.9	10.7	11.7	13.2	14.5	15.5	16.0	16.4
16.5	16.0	13.8	13.4	14.4	16.2	16.1	19.5	20.4	21.0
17.0	20.4	17.4	16.7	17.7	19.8	22.2	24.2	25.6	26.4
18.0	25.6	21.8	20.6	21.5	23.8	26.8	29.5	31.5	32.9
19.0	31.8	26.9	25.3	26.0	28.5	32.0	35.5	38.4	40.3
20.0	39.2	33.1	30.8	31.3	33.9	37.9	42.3	46.1	48.8
21.0	47.8	40.3	37.2	37.5	40.1	44.5	49.8	54.7	58.5
22.0	57.9	48.6	44.8	44.7	47.3	52.1	58.2	64.3	69.4
23.0	69.6	58.4	53.6	53.1	55.6	60.6	67.6	75.0	81.4

Tabla B.8. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes tandem Pt de 3.0

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2.0	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
3.0	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4.0	0.008	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
4.5	0.018	0.015	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012
5.5	0.036	0.030	0.027	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025
6.5	0.066	0.056	0.050	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
7.0	0.111	0.095	0.087	0.083	0.081	0.081	0.081	0.080	0.080
8.0	0.174	0.153	0.140	0.135	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
9.0	0.260	0.234	0.217	0.209	0.205	0.204	0.203	0.203	0.203
10.0	0.368	0.341	0.321	0.311	0.307	0.305	0.304	0.303	0.303
11.0	0.502	0.479	0.458	0.447	0.443	0.440	0.440	0.439	0.439
12.0	0.664	0.651	0.634	0.625	0.621	0.619	0.618	0.618	0.618
13.0	0.859	0.857	0.853	0.851	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849
14.0	1.09	1.10	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
14.5	1.38	1.38	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51
15.5	1.72	1.71	1.80	1.88	1.93	1.95	1.96	1.97	1.97
16.5	2.13	2.10	2.23	2.36	2.45	2.49	2.51	2.52	2.52
17.0	2.62	2.54	2.71	2.92	3.06	3.13	3.17	3.19	3.20
18.0	3.21	3.05	3.26	3.55	3.76	3.89	3.95	3.98	4.00
19.0	3.90	3.65	3.87	4.26	4.58	4.77	4.87	4.92	4.95
20.0	4.72	4.35	4.57	5.06	5.50	5.78	5.94	6.02	6.06
21.0	5.68	5.16	5.36	5.95	6.54	6.94	7.17	7.29	7.36
22.0	6.80	6.10	6.25	6.93	7.69	8.24	8.57	8.76	8.86
23.0	8.09	7.17	7.26	8.03	8.96	9.70	10.17	10.43	10.58
24.0	9.57	8.41	8.40	9.24	10.36	11.32	11.96	12.33	12.54
24.5	11.3	9.8	9.7	10.6	11.9	13.1	14.0	14.5	14.8
25.5	13.2	11.4	11.2	12.1	13.6	15.1	16.2	16.9	17.3
26.5	15.4	13.2	12.8	13.7	15.4	17.2	18.6	19.5	20.1
27.0	17.9	15.3	14.7	15.6	17.4	19.5	21.3	22.5	23.2
28.0	20.6	17.6	16.8	17.6	19.6	22.0	24.1	25.7	26.6
29.0	23.7	20.2	19.1	19.9	22.0	24.7	27.3	29.2	30.4
30.0	27.2	23.1	21.7	22.4	24.6	27.6	30.6	33.0	34.6
31.0	31.1	26.3	24.6	25.2	27.4	30.8	34.3	37.1	39.2
32.0	35.4	29.8	27.8	28.2	30.6	34.2	38.2	41.6	44.1
33.0	40.1	33.8	31.3	31.6	34.0	37.9	42.3	46.4	49.4
33.5	45.3	38.1	35.2	35.4	37.7	41.8	46.8	51.5	55.2
34.5	51.1	42.9	39.!!:>	39.5	41.8	46.1	51.5	56.9	61.3
35.5	57.4	48.2	44.3	44.0	46.3	50.7	56.6	62.7	67.9
36.5	64.3	53.9	49.4	48.9	51.1	55.8	62.1	68.9	74.9
37.0	71.8	60.2	55.1	54.3	56.5	61.2	67.9	75.5	82.4
38.0	80.0	67.0	61.2	60.2	62.2	67.0	74.2	82.4	90.3
39.0	89.0	74.5	67.9	66.5	68.5	73.4	80.8	89.8	98.7
40.0	98.7	82.5	75.2	73.5	75.3	80.2	88.0	97.7	107.5
41.0	109.0	91.0	83.0	81.0	83.0	88.0	96.0	106.0	117.0

Tabla B.9. Factores de equivalencia de carga para pavimentos rígidos, ejes triple Pt de 3.0

Carga por eje (ton)	Espesor de losa, cm								
	15	17.5	20	23	25	28	30	33	35.5
1.0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2.0	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
3.0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
4.0	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
4.5	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
5.5	0.013	0.011	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
6.5	0.023	0.020	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016
7.0	0.039	0.033	0.030	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027
8.0	0.061	0.052	0.047	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043
9.0	0.091	0.078	0.071	0.068	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066
10.0	0.132	0.114	0.104	0.100	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097
11.0	0.183	0.161	0.148	0.143	0.140	0.139	0.139	0.138	0.138
12.0	0.246	0.221	0.205	0.198	0.195	0.193	0.193	0.192	0.192
13.0	0.322	0.296	0.277	0.268	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262
14.0	0.411	0.387	0.367	0.357	0.353	0.351	0.350	0.349	0.349
14.5	0.515	0.495	0.476	0.466	0.462	0.460	0.459	0.458	0.458
15.5	0.634	0.622	0.607	0.599	0.595	0.594	0.593	0.592	0.592
16.5	0.772	0.768	0.762	0.758	0.756	0.756	0.755	0.755	0.755
17.0	0.930	0.934	0.942	0.947	0.949	0.950	0.951	0.951	0.951
18.0	1.11	1.12	1.15	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
19.0	1.32	1.33	1.38	1.42	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46
20.0	1.56	1.56	1.64	1.71	1.75	1.77	1.78	1.78	1.78
21.0	1.84	1.83	1.94	2.04	2.10	2.14	2.15	2.16	2.16
22.0	2.16	2.12	2.26	2.41	2.51	2.56	2.58	2.59	2.60
23.0	2.53	2.45	2.61	2.82	2.96	3.03	3.07	3.09	3.10
24.0	2.95	2.82	3.01	3.27	3.47	3.58	3.63	3.66	3.68
24.5	3.43	3.23	3.43	3.77	4.03	4.18	4.27	4.31	4.33
25.5	3.98	3.70	3.90	4.31	4.65	4.86	4.98	5.04	5.07
26.5	4.59	4.22	4.42	4.90	5.34	5.62	5.78	5.86	5.90
27.0	5.28	4.80	4.99	5.54	6.08	6.45	6.66	6.78	6.84
28.0	6.06	5.45	5.61	6.23	6.89	7.36	7.64	7.80	7.88
29.0	6.92	6.18	6.29	6.98	7.76	8.36	8.72	8.93	9.04
30.0	7.89	6.98	7.05	7.78	8.70	9.44	9.91	10.18	10.33
31.0	8.96	7.88	7.87	8.66	9.71	10.61	11.20	11.55	11.75
32.0	10.2	8.9	8.8	9.6	10.8	11.9	12.6	13.1	13.3
33.0	11.5	10.0	9.8	10.6	12.0	13.2	14.1	14.7	15.0
33.5	12.9	11.2	10.9	11.7	13.2	14.7	15.8	16.5	16.9
34.5	14.5	12.5	12.1	12.9	14.5	16.2	17.5	18.4	18.9
35.5	16.2	13.9	13.4	14.2	15.9	17.8	19.4	20.5	21.1
36.5	18.2	15.5	14.8	15.6	17.4	19.6	21.4	22.7	23.5
37.0	20.2	17.2	16.4	17.2	19.1	21.4	23.5	25.1	26.1
38.0	22.5	19.1	18.1	18.8	20.8	23.4	25.8	27.6	28.8
39.0	25.0	21.2	19.9	20.6	22.6	25.5	28.2	30.4	31.8
40.0	27.6	23.4	21.9	22.5	24.6	27.7	30.7	33.2	35.0
41.0	30.5	25.8	24.1	24.6	26.8	30.0	33.4	36.3	38.3

ANEXO C. NOMOGRAMA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS, MÉTODO PCA.

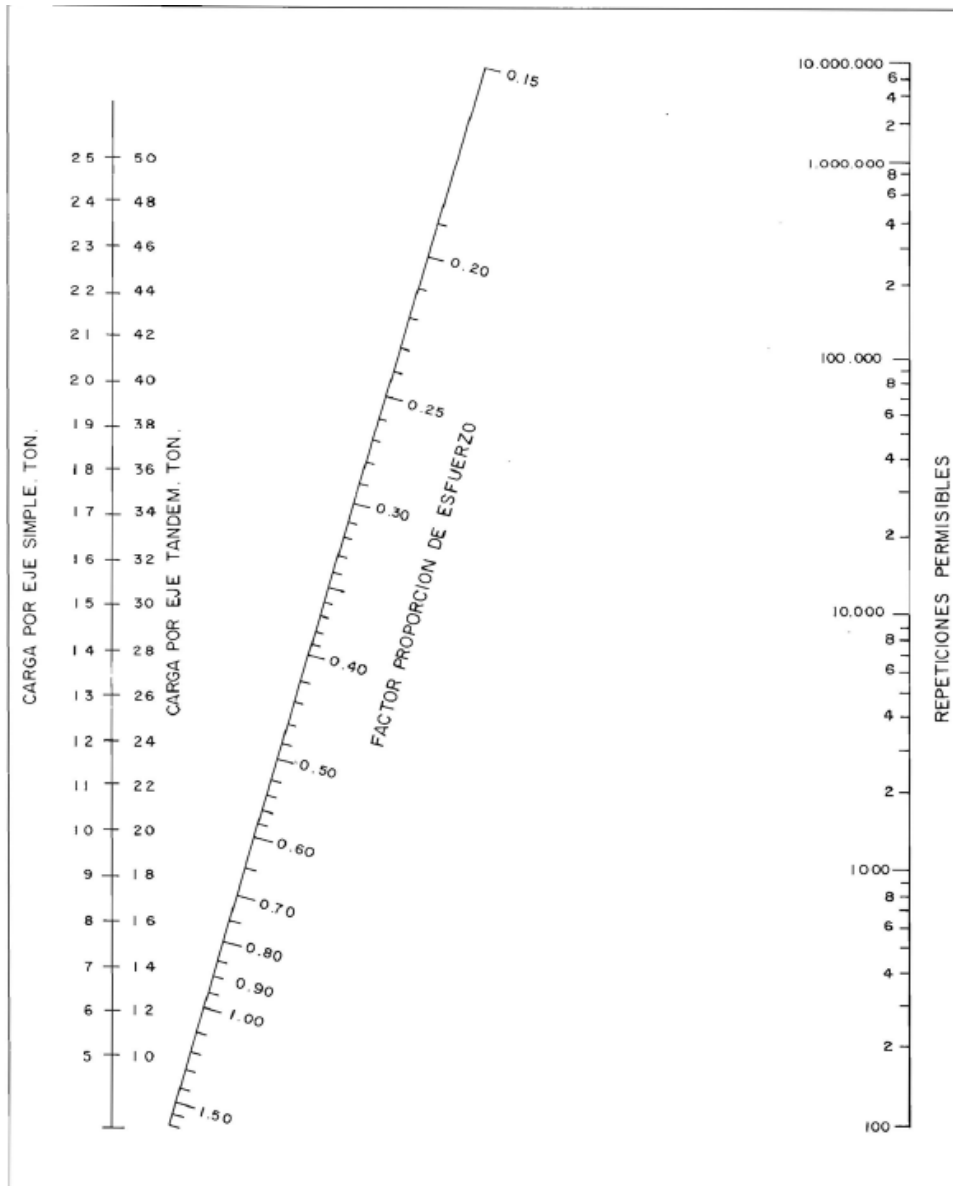


Fig. C.1. Método PCA 1984, análisis por fatiga. Acotamiento con y sin pavimento

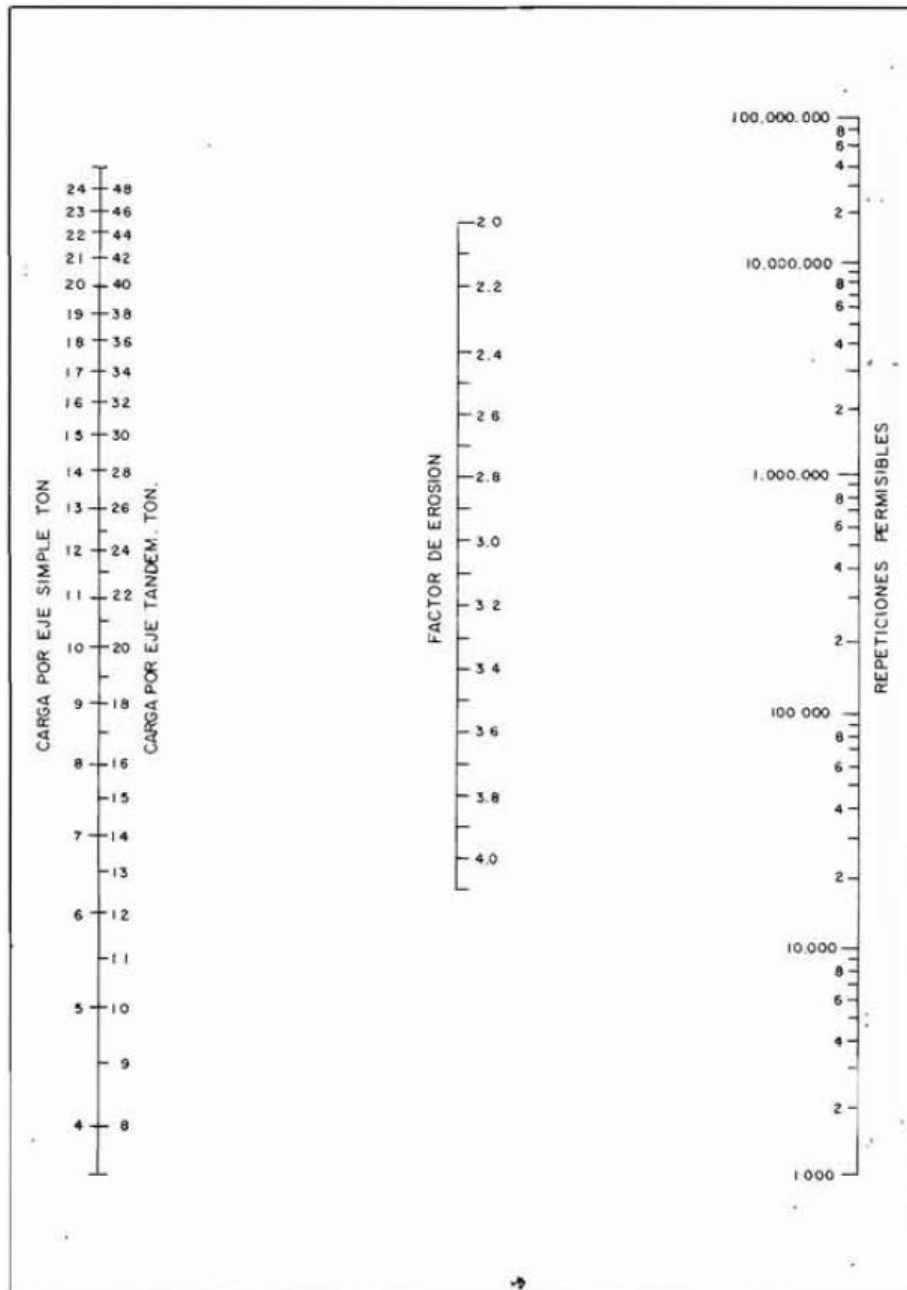


Fig. C.2. Método PCA 1984, análisis por erosión. Acotamiento sin pavimento

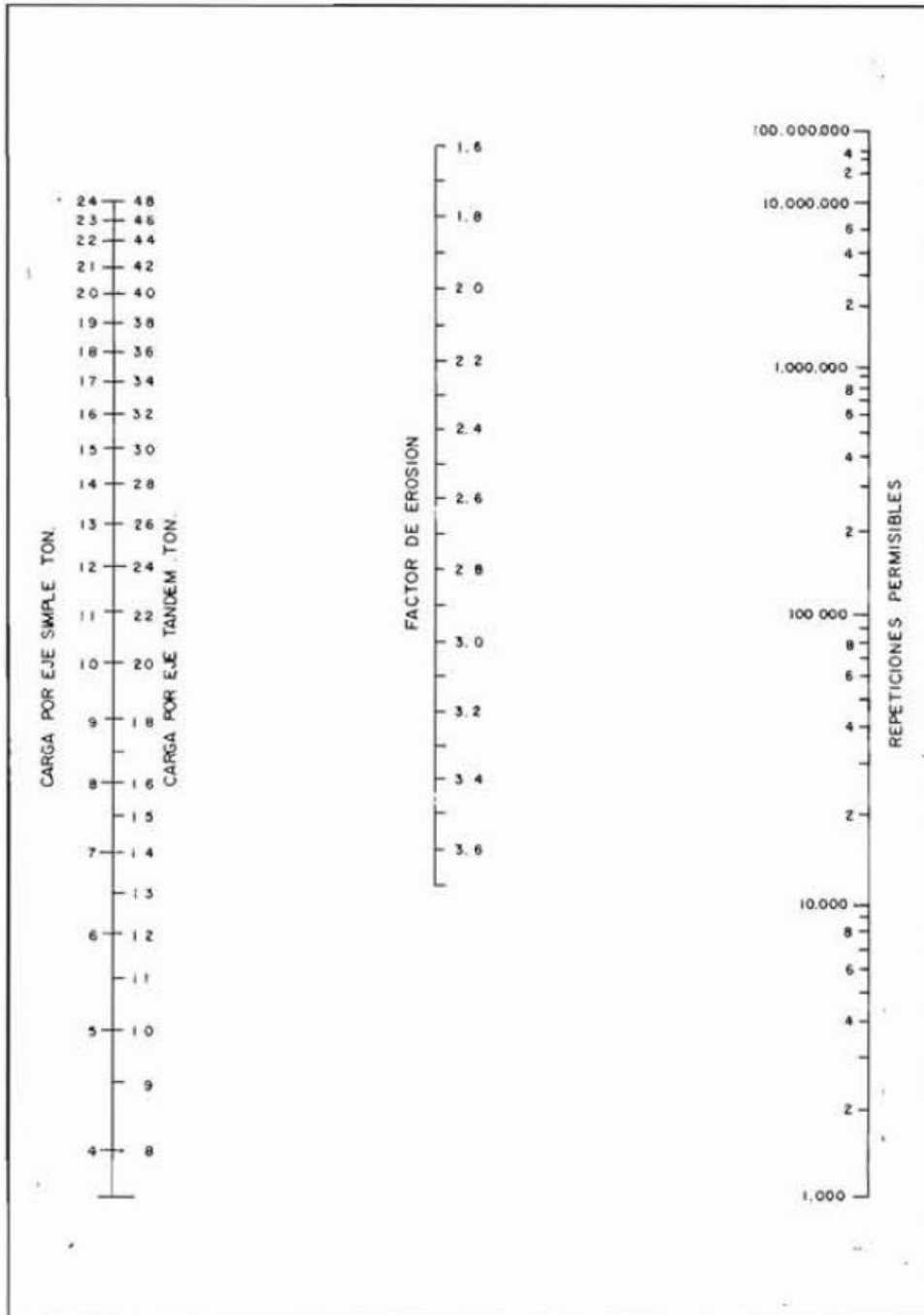


Fig. C.3. Método PCA 1984, análisis por erosión. Acotamiento pavimentado

ANEXO D. ESFUERZOS EQUIVALENTES kg/cm^2 Tabla D.1. Esfuerzo equivalente en kg/cm^2 , acotamiento sin pavimentar

Espesor losa (cm)	k-Módulo de reacción subrasante (kg/cm^3)													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem
12	43.0	35.6	37.8	30.1	35.1	28.1	33.1	26.8	31.7	25.7	29.1	24.3	27.4	23.5
13	38.4	32.3	33.8	27.3	31.4	25.3	29.7	24.0	28.4	23.0	26.1	21.6	24.6	20.8
14	34.6	29.6	30.5	24.9	28.3	22.9	26.8	21.6	25.6	20.8	23.7	19.4	22.3	18.5
15	31.4	27.2	27.7	22.9	25.7	20.9	24.4	19.7	23.3	18.8	21.6	17.5	20.4	16.7
16	28.7	25.2	25.3	21.2	23.5	19.3	22.3	18.1	21.3	17.3	19.7	16.0	18.7	15.2
17	26.3	23.5	23.3	19.7	21.6	17.9	20.5	16.7	19.6	16.0	18.1	14.7	17.2	13.9
18	24.3	22.0	21.5	18.4	19.9	16.6	18.9	15.5	18.1	14.8	16.8	13.6	15.9	12.8
19	22.5	20.7	19.9	17.2	18.5	15.6	17.5	14.5	16.8	13.8	15.6	12.6	14.8	11.9
20	21.0	19.5	18.5	16.2	17.2	14.6	16.4	13.6	15.6	12.9	14.5	11.8	13.8	11.1
21	19.6	18.5	17.3	15.3	16.1	13.8	15.2	12.9	14.6	12.2	13.6	11.1	12.8	10.4
22	18.3	17.5	16.2	14.5	15.0	13.1	14.2	12.2	13.7	11.5	12.8	10.5	12.0	9.8
23	17.2	16.7	15.2	13.8	14.1	12.4	13.3	11.5	12.8	10.9	12.0	9.9	11.3	9.2
24	16.2	15.9	14.3	13.1	13.3	11.8	12.5	11.0	12.1	10.4	11.3	9.4	10.7	8.8
25	15.3	15.2	13.5	12.5	12.6	11.2	11.9	10.5	11.4	9.9	10.7	8.9	10.1	8.3
26	14.5	14.5	12.8	12.0	11.9	10.7	11.3	10.0	10.8	9.4	10.1	8.5	9.5	8.0
27	13.8	13.9	12.1	11.5	11.3	10.3	10.7	9.5	10.3	9.0	9.5	8.1	9.0	7.6
28	13.1	13.4	11.5	11.0	10.7	9.9	10.2	9.1	9.8	8.6	9.0	7.8	8.6	7.3
29	12.5	12.9	11.0	10.6	10.2	9.5	9.7	8.8	9.3	8.3	8.6	7.5	8.2	6.9
30	11.9	12.4	10.5	10.2	9.7	9.1	9.2	8.5	8.9	8.0	8.2	7.2	7.8	6.6
31	11.3	12.0	10.0	9.9	9.3	8.8	8.8	8.1	8.4	7.7	7.8	6.9	7.4	6.4
32	10.9	11.6	9.6	9.5	8.9	8.5	8.4	7.8	8.0	7.4	7.5	6.7	7.1	6.2
33	10.4	11.2	9.2	9.2	8.5	8.2	8.0	7.6	7.7	7.1	7.2	6.4	6.8	6.0
34	10.0	10.8	8.8	8.9	8.1	7.9	7.7	7.3	7.3	6.9	6.9	6.2	6.6	5.8

Tabla D.2. Esfuerzo equivalente en kg/cm², acotamiento pavimentado

Espesor losa (cm)	k-Módulo de reacción subrasante (kg/cm ³)													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem
12	33.6	28.2	29.5	24.6	27.4	23.1	26.0	22.2	24.9	21.6	23.1	20.8	21.9	20.4
13	30.2	25.6	26.6	22.2	24.7	20.8	23.4	19.9	22.5	19.4	20.9	18.6	19.9	18.1
14	27.4	23.4	24.1	20.2	22.4	18.9	21.3	18.0	20.5	17.5	19.1	16.7	18.2	16.2
15	25.0	21.5	22.0	18.5	20.5	17.2	19.5	16.4	18.8	15.9	17.5	15.1	16.7	14.6
16	22.9	19.9	20.2	17.1	18.8	15.8	18.0	15.1	17.3	14.6	16.1	13.8	15.5	13.3
17	21.1	18.5	18.6	15.8	17.4	14.6	16.6	13.9	16.0	13.4	14.9	12.6	14.3	12.1
18	19.6	17.2	17.3	14.7	16.1	13.5	15.4	12.9	14.8	12.4	13.9	11.6	13.3	11.2
19	18.2	16.2	16.1	13.8	15.0	12.7	14.3	12.0	13.8	11.6	12.9	10.8	12.4	10.4
20	17.0	15.2	15.0	12.9	14.0	11.9	13.4	11.3	12.9	10.8	12.1	10.1	11.6	9.7
21	15.9	14.4	14.0	12.2	13.1	11.2	12.6	10.6	12.1	10.2	11.3	9.5	10.9	9.1
22	14.9	13.6	13.2	11.5	12.3	10.6	11.8	10.0	11.4	9.6	10.7	8.9	10.2	8.6
23	14.0	12.9	12.4	10.9	11.6	10.0	11.1	9.5	10.7	9.1	10.1	8.4	9.7	8.1
24	13.2	12.3	11.7	10.4	11.0	9.5	10.5	9.0	10.1	8.6	9.5	8.0	9.1	7.6
25	12.5	11.8	11.1	9.9	10.4	9.1	9.9	8.5	9.6	8.2	9.0	7.6	8.7	7.3
26	11.9	11.2	10.5	9.5	9.8	8.7	9.4	8.1	9.1	7.8	8.6	7.2	8.2	6.9
27	11.3	10.8	10.0	9.1	9.3	8.3	8.9	7.8	8.6	7.4	8.1	6.9	7.8	6.6
28	10.7	10.3	9.5	8.7	8.9	7.9	8.5	7.4	8.2	7.1	7.8	6.6	7.5	6.3
29	10.2	9.9	9.1	8.4	8.5	7.6	8.1	7.1	7.8	6.8	7.4	6.3	7.1	6.0
30	9.8	9.5	8.7	8.1	8.1	7.3	7.7	6.9	7.5	6.6	7.1	6.1	6.8	5.8
31	9.3	9.2	8.3	7.8	7.7	7.1	7.4	6.6	7.2	6.3	6.8	5.8	6.5	5.5
32	9.0	8.9	7.9	7.5	7.4	6.8	7.1	6.4	6.9	6.1	6.5	5.6	6.2	5.3
33	8.6	8.6	7.6	7.2	7.1	6.6	6.8	6.1	6.6	5.9	6.2	5.4	6.0	5.1
34	8.3	8.3	7.3	7.0	6.9	6.3	6.6	5.9	6.3	5.7	6.0	5.2	5.7	4.9

ANEXO E. FACTORES DE EROSIÓN

Tabla E.1. Factor de erosión, junta con pasajuntas - acotamiento sin pavimento

Espesor losa (cm)	k-Módulo de reacción subrasante (kg/cm ³)													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem
12	3.51	3.61	3.50	3.57	3.49	3.54	3.48	3.52	3.48	3.51	3.47	3.49	3.45	3.47
13	3.41	3.53	3.39	3.48	3.39	3.45	3.38	3.43	3.38	3.41	3.37	3.39	3.35	3.37
14	3.32	3.45	3.30	3.39	3.29	3.36	3.28	3.34	3.28	3.33	3.27	3.30	3.25	3.28
15	3.23	3.37	3.21	3.31	3.20	3.28	3.19	3.26	3.19	3.24	3.18	3.22	3.16	3.20
16	3.15	3.30	3.12	3.24	3.12	3.21	3.10	3.18	3.10	3.17	3.09	3.14	3.08	3.12
17	3.07	3.24	3.05	3.17	3.04	3.14	3.02	3.11	3.02	3.10	3.01	3.07	3.00	3.04
18	2.99	3.18	2.97	3.11	2.96	3.07	2.95	3.05	2.94	3.03	2.93	3.00	2.92	2.97
19	2.93	3.12	2.90	3.05	2.89	3.01	2.88	2.98	2.87	2.97	2.86	2.93	2.85	2.91
20	2.86	3.06	2.83	3.00	2.83	2.95	2.81	2.92	2.80	2.91	2.79	2.87	2.79	2.84
21	2.80	3.01	2.77	2.93	2.76	2.89	2.74	2.86	2.74	2.85	2.73	2.81	2.72	2.78
22	2.74	2.96	2.71	2.88	2.70	2.84	2.68	2.81	2.68	2.80	2.67	2.76	2.66	2.73
23	2.68	2.91	2.65	2.83	2.64	2.79	2.62	2.76	2.62	2.74	2.61	2.70	2.59	2.67
24	2.63	2.87	2.60	2.78	2.59	2.74	2.57	2.71	2.56	2.69	2.55	2.65	2.54	2.62
25	2.58	2.83	2.54	2.74	2.54	2.69	2.52	2.67	2.51	2.65	2.50	2.60	2.49	2.57
26	2.53	2.79	2.50	2.70	2.49	2.65	2.47	2.62	2.46	2.61	2.45	2.56	2.44	2.53
27	2.48	2.75	2.45	2.66	2.44	2.61	2.42	2.58	2.41	2.57	2.40	2.52	2.39	2.49
28	2.43	2.72	2.40	2.63	2.39	2.57	2.37	2.54	2.37	2.53	2.35	2.48	2.34	2.45
29	2.39	2.69	2.36	2.59	2.35	2.54	2.33	2.51	2.32	2.49	2.31	2.44	2.30	2.41
30	2.34	2.65	2.31	2.56	2.30	2.50	2.28	2.47	2.28	2.45	2.26	2.41	2.25	2.37
31	2.30	2.62	2.27	2.52	2.26	2.47	2.24	2.43	2.24	2.42	2.22	2.37	2.21	2.34
32	2.26	2.59	2.23	2.49	2.22	2.43	2.20	2.40	2.19	2.38	2.18	2.33	2.17	2.30
32	2.22	2.56	2.19	2.46	2.18	2.40	2.16	2.37	2.15	2.35	2.14	2.30	2.13	2.27
34	2.18	2.53	2.15	2.43	2.14	2.37	2.12	2.33	2.12	2.32	2.10	2.27	2.09	2.24

Tabla E.2. Factor de erosión, junta sin pasajuntas - acotamiento sin pavimentar

Espesor losa (cm)	k-Módulo de reacción subrasante (kg/cm ³)													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem
12	3.72	3.82	3.69	3.74	3.67	3.69	3.65	3.67	3.64	3.65	3.62	3.61	3.59	3.58
13	3.62	3.75	3.59	3.66	3.57	3.61	3.55	3.59	3.54	3.57	3.52	3.52	3.49	3.49
14	3.53	3.68	3.50	3.59	3.48	3.53	3.46	3.51	3.45	3.49	3.43	3.44	3.40	3.41
15	3.45	3.61	3.41	3.52	3.39	3.46	3.37	3.44	3.36	3.42	3.34	3.37	3.31	3.34
16	3.37	3.55	3.33	3.46	3.31	3.40	3.29	3.37	3.28	3.35	3.26	3.30	3.23	3.26
17	3.30	3.50	3.26	3.40	3.23	3.34	3.21	3.31	3.20	3.29	3.18	3.23	3.16	3.20
18	3.23	3.44	3.18	3.34	3.16	3.28	3.14	3.25	3.13	3.23	3.11	3.17	3.09	3.13
19	3.17	3.39	3.12	3.29	3.09	3.23	3.07	3.19	3.06	3.17	3.04	3.11	3.02	3.07
20	3.11	3.35	3.05	3.24	3.03	3.17	3.01	3.14	3.00	3.12	2.98	3.05	2.96	3.02
21	3.05	3.30	2.99	3.19	2.97	3.13	2.95	3.09	2.94	3.07	2.92	3.00	2.90	2.96
22	3.00	3.26	2.94	3.15	2.91	3.08	2.89	3.04	2.88	3.02	2.86	2.95	2.84	2.91
23	2.94	3.22	2.88	3.11	2.85	3.03	2.83	2.99	2.82	2.97	2.80	2.90	2.78	2.86
24	2.90	3.18	2.84	3.07	2.80	2.99	2.78	2.95	2.77	2.93	2.75	2.86	2.73	2.82
25	2.86	3.14	2.79	3.03	2.76	2.96	2.73	2.91	2.72	2.89	2.70	2.82	2.68	2.78
26	2.81	3.11	2.75	2.99	2.71	2.92	2.69	2.88	2.68	2.86	2.65	2.78	2.63	2.74
27	2.77	3.08	2.70	2.96	2.67	2.89	2.64	2.84	2.63	2.82	2.61	2.75	2.59	2.71
28	2.73	3.05	2.66	2.93	2.62	2.85	2.60	2.81	2.59	2.79	2.56	2.71	2.54	2.67
29	2.70	3.02	2.62	2.90	2.58	2.82	2.56	2.78	2.55	2.75	2.52	2.68	2.50	2.64
30	2.66	2.99	2.59	2.86	2.54	2.79	2.51	2.75	2.50	2.72	2.48	2.64	2.46	2.60
31	2.63	2.96	2.55	2.83	2.50	2.76	2.48	2.72	2.47	2.69	2.44	2.61	2.42	2.57
32	2.59	2.93	2.51	2.81	2.47	2.73	2.44	2.69	2.43	2.66	2.40	2.58	2.38	2.54
33	2.56	2.90	2.48	2.78	2.43	2.70	2.40	2.66	2.39	2.63	2.36	2.55	2.34	2.51
34	2.53	2.88	2.45	2.75	2.40	2.67	2.37	2.63	2.36	2.60	2.32	2.52	2.30	2.48

Tabla E.3. Factor de erosión, junta con pasajuntas - acotamiento pavimentado

Espesor losa (cm)	k-Módulo de reacción subrasante (kg/cm ³)													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem
12	3.07	3.09	3.02	2.99	3.00	2.93	2.97	2.90	2.96	2.88	2.94	2.84	2.92	2.83
13	2.97	3.02	2.92	2.92	2.90	2.86	2.87	2.83	2.86	2.80	2.84	2.76	2.82	2.74
14	2.88	2.96	2.83	2.85	2.81	2.79	2.78	2.76	2.77	2.73	2.75	2.68	2.73	2.66
15	2.80	2.89	2.75	2.79	2.73	2.72	2.70	2.69	2.69	2.66	2.67	2.61	2.65	2.59
16	2.72	2.84	2.67	2.73	2.65	2.66	2.62	2.63	2.61	2.60	2.59	2.55	2.57	2.52
17	2.64	2.78	2.60	2.68	2.58	2.60	2.55	2.57	2.54	2.54	2.52	2.48	2.49	2.45
18	2.57	2.73	2.53	2.62	2.51	2.55	2.48	2.51	2.47	2.48	2.45	2.42	2.42	2.39
19	2.51	2.69	2.47	2.57	2.44	2.50	2.41	2.46	2.40	2.43	2.38	2.37	2.36	2.33
20	2.44	2.64	2.41	2.53	2.38	2.45	2.35	2.41	2.34	2.38	2.32	2.31	2.29	2.28
21	2.38	2.60	2.35	2.48	2.32	2.40	2.29	2.36	2.28	2.33	2.26	2.26	2.23	2.22
22	2.33	2.56	2.30	2.44	2.27	2.36	2.24	2.32	2.23	2.29	2.21	2.21	2.18	2.17
23	2.27	2.52	2.24	2.40	2.21	2.31	2.18	2.27	2.17	2.24	2.15	2.17	2.12	2.12
24	2.23	2.48	2.19	2.36	2.16	2.28	2.13	2.24	2.12	2.20	2.10	2.13	2.07	2.08
25	2.18	2.43	2.14	2.33	2.11	2.24	2.09	2.20	2.08	2.17	2.05	2.09	2.02	2.03
26	2.14	2.39	2.09	2.29	2.06	2.21	2.04	2.17	2.03	2.13	2.01	2.06	1.97	1.99
27	2.10	2.35	2.05	2.26	2.02	2.17	2.00	2.13	1.99	2.10	1.96	2.03	1.93	1.95
28	2.06	2.32	2.01	2.23	1.98	2.14	1.95	2.10	1.94	2.07	1.92	1.99	1.89	1.91
29	2.03	2.28	1.97	2.19	1.94	2.11	1.91	2.07	1.90	2.04	1.88	1.96	1.85	1.87
30	1.99	2.25	1.93	2.16	1.90	2.08	1.87	2.04	1.86	2.01	1.83	1.93	1.81	1.83
31	1.96	2.21	1.89	2.13	1.86	2.05	1.83	2.01	1.82	1.98	1.80	1.90	1.77	1.80
32	1.92	2.18	1.86	2.11	1.83	2.03	1.80	1.99	1.79	1.95	1.76	1.87	1.74	1.76
33	1.89	2.15	1.82	2.08	1.79	2.00	1.76	1.96	1.75	1.92	1.72	1.85	1.70	1.73
34	1.86	2.12	1.79	2.05	1.76	1.97	1.73	1.93	1.72	1.90	1.69	1.82	1.67	1.70

Tabla E.4. Factor de erosión, junta sin pasajuntas - acotamiento pavimentado

Espesor losa (cm)	k-Módulo de reacción subrasante (kg/cm ³)													
	2		4		6		8		10		15		20	
	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem	Eje simple	Eje tándem
12	3.25	3.29	3.20	3.19	3.18	3.13	3.17	3.11	3.16	3.09	3.13	3.04	3.11	3.03
13	3.16	3.23	3.11	3.12	3.09	3.06	3.08	3.04	3.06	3.02	3.03	2.97	3.01	2.95
14	3.08	3.17	3.03	3.06	3.00	2.99	2.99	2.97	2.98	2.95	2.95	2.90	2.93	2.87
15	3.00	3.11	2.95	3.00	2.92	2.93	2.91	2.91	2.90	2.88	2.87	2.83	2.85	2.80
16	2.93	3.06	2.88	2.94	2.85	2.88	2.84	2.85	2.82	2.82	2.79	2.77	2.77	2.74
17	2.87	3.01	2.81	2.89	2.78	2.82	2.77	2.79	2.75	2.77	2.72	2.71	2.70	2.68
18	2.80	2.97	2.74	2.84	2.71	2.77	2.70	2.74	2.69	2.71	2.66	2.65	2.64	2.62
19	2.74	2.92	2.68	2.80	2.65	2.72	2.64	2.69	2.62	2.66	2.59	2.60	2.57	2.57
20	2.69	2.88	2.62	2.76	2.59	2.68	2.58	2.64	2.56	2.62	2.53	2.55	2.51	2.51
21	2.63	2.84	2.57	2.71	2.53	2.64	2.52	2.60	2.51	2.57	2.48	2.50	2.46	2.47
22	2.58	2.80	2.51	2.68	2.48	2.59	2.47	2.56	2.45	2.53	2.42	2.46	2.40	2.42
23	2.53	2.77	2.46	2.64	2.43	2.55	2.42	2.51	2.40	2.48	2.37	2.41	2.35	2.37
24	2.48	2.74	2.42	2.60	2.38	2.52	2.37	2.48	2.36	2.45	2.33	2.38	2.31	2.33
25	2.44	2.71	2.37	2.57	2.34	2.49	2.33	2.45	2.31	2.42	2.28	2.34	2.26	2.29
26	2.40	2.68	2.33	2.54	2.30	2.46	2.28	2.41	2.27	2.38	2.24	2.31	2.22	2.25
27	2.36	2.65	2.29	2.51	2.26	2.43	2.24	2.38	2.22	2.35	2.20	2.27	2.17	2.21
28	2.33	2.62	2.25	2.49	2.22	2.40	2.20	2.35	2.18	2.32	2.16	2.24	2.13	2.18
29	2.29	2.60	2.22	2.46	2.18	2.37	2.16	2.33	2.14	2.30	2.12	2.21	2.09	2.14
30	2.26	2.57	2.18	2.43	2.15	2.35	2.12	2.30	2.11	2.27	2.08	2.18	2.06	2.11
31	2.22	2.55	2.15	2.41	2.11	2.32	2.09	2.27	2.07	2.24	2.04	2.15	2.02	2.07
32	2.19	2.52	2.11	2.38	2.08	2.29	2.05	2.25	2.03	2.22	2.01	2.13	1.98	2.04
33	2.16	2.50	2.08	2.36	2.04	2.27	2.02	2.22	2.00	2.19	1.98	2.10	1.95	2.01
34	2.13	2.48	2.05	2.34	2.01	2.25	1.98	2.20	1.97	2.17	1.94	2.07	1.92	1.98

ANEXO F. FORMACIÓN DE LA SUBRASANTE SEGÚN NORMAS ESPAÑOLAS.

TIPOS DE SUELO DE LA SUBRASANTE (DESMENTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)					
CATEGORÍA DE SUBRASANTE	SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) Y (3)	ROCA (R)
E1 $E_{vs} \geq 60 \text{ MPa}$					
E2 $E_{vs} \geq 120 \text{ MPa}$					
E3 $E_{vs} \geq 300 \text{ MPa}$					

IN

Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 de IPG-3)

0

Suelo tolerable (Art. 330 de IPG-3)

1

Suelo adecuado (Art. 330 de IPG-3)

2

Suelo seleccionado (Art. 330 de IPG-3)

3

Suelo seleccionado (Art. 330 de IPG-3)

S-EST 1

Suelo estabilizado in situ (Art. 512 de IPG-3)

S-EST 2

Suelo estabilizado in situ (Art. 512 de IPG-3)

S-EST 3

Suelo estabilizado in situ (Art. 512 de IPG-3)

HIM-20

Concreto hidráulico (Art. 610 de IPG-3)

Tipo de material

Espesor mínimo en cm

2 Suelo de subrasante o de la obra de tierra subyacente

ANEXO G. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMAS ESPAÑOLAS.

CATEGORÍA DE TRÁNSITO PESADO				
	T00	T0	T1	T2
E1				
E2				
E3				

- (1) Para las categorías de tránsito pesado T00 y T0 se emplearán únicamente pavimentos continuos de concreto hidráulico armado con los espesores indicados.
- (2) Capas tratadas con cemento que deberán prefabricarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (P-G-3).
- (3) Para poder proyectar esta solución será preceptivo que la capa superior de la subrasante E2 está estabilizada con cemento.

CATEGORÍA DE TRÁNSITO PESADO				
	T31	T32	T41	T42
E1	<p>3111</p> <p>3112</p> <p>3114</p>	<p>3211</p> <p>3212</p> <p>3214</p>	<p>4111</p> <p>4112</p> <p>4114</p>	<p>4211</p> <p>4212</p> <p>4214</p>
E2	<p>3121</p> <p>3122</p> <p>3124</p>	<p>3221</p> <p>3222</p> <p>3224</p>	<p>4121</p> <p>4122</p> <p>4124</p>	<p>4221</p> <p>4222</p> <p>4224</p>
E3	<p>3131</p> <p>3132</p> <p>3134</p>	<p>3231</p> <p>3232</p> <p>3234</p>	<p>4131</p> <p>4132</p> <p>4134</p>	<p>4231</p> <p>4232</p> <p>4234</p>

MB Materia bituminosa **HF** Homogénea de firme **HVM** Homogénea mago vibrado **GC** Gravacemento **SC** Suelocemento **ZA** Zorra artificial

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

Nota 1: Para las categorías de tránsito pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciadores de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (P.G.-3).

Nota 2: En la categoría de tránsito pesado T42 con tránsitos de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/camión/día) podrá disponerse un riego con gravilla bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.

ANEXO H. VALORES DE CALIDAD PARA MATERIALES DE TERRAPLÉN, CAPA SUBYACENTE, SUBRASANTE Y SUB-BASE.

Requisitos de calidad de materiales para terraplén	
Características	Valor
Limite líquido (LL), % máximo	50
Valor soporte de California (CBR) ⁽¹⁾ , % mínimo	5
Expansión, % máximo	5
Grado de compactación ⁽²⁾ , %	90 ± 2
Requisitos de calidad de materiales para capa subyacente	
Características	Valor
Limite líquido (LL), % máximo	50
Valor soporte de California (CBR) ⁽¹⁾ , % mínimo	10
Expansión, % máximo	3
Grado de compactación ⁽²⁾ , %	95 ± 2
Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante	
Características	Valor
Tamaño máximo, mm	76
Limite líquido (LL), % máximo	40
Índice plástico (IP), % máximo	12
Valor soporte de California (CBR) ⁽¹⁾ , % mínimo	20
Expansión, % máximo	2
Grado de compactación ⁽²⁾ , %	100 ± 2
Requisitos de calidad de materiales para capa sub-base	
Características	Valor
Limite líquido (LL), % máximo	25
Índice plástico (IP), % máximo	6
Equivalente arena, mínimo	40
Valor soporte de California (CBR) ⁽¹⁾ , % mínimo	80
Desgaste de Los Ángeles, máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40
Grado de compactación ⁽²⁾ , % mínimo	100
<p>(1) En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta tabla, con un contenido igual al del material en el banco a 1.5 m de profundidad.</p> <p>(2) Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba.</p>	

ANEXO I. ZONAS GRANULOMÉTRICAS RECOMENDABLES PARA MATERIALES DE SUB-BASES.