

PAVIMENTOS DE HORMIGON

Diseño de espesores

INTRODUCCION

El propósito del diseño es encontrar el espesor de pavimento que, para las solicitaciones previstas y el período de diseño analizado, resulte en el menor costo anual (construcción y mantenimiento):

- Espesores mayores que el necesario resultarán en un mayor costo inicial pero de bajo mantenimiento
- Espesores menores al requerido tendrán un costo de construcción bajo pero será necesario un mantenimiento prematuro y costoso e interrupciones del tránsito, que superarán ampliamente al costo inicial

No solo deberán tenerse en cuenta los parámetros que intervienen en el diseño, sino además otros aspectos técnicos de igual importancia, que aseguren el buen desempeño y una vida útil acorde con el período proyectado. Estos incluyen:

- Soporte razonablemente uniforme
- Prevención del bombeo (subbases granulares o cementadas) en caso de condición de tránsito pesado
- Diseño, ejecución y mantenimiento adecuado de juntas
- Selección de componentes del hormigón y dosificación adecuada que asegure requisitos de resistencia y durabilidad durante la vida útil proyectada, bajo las condiciones de trabajo previstas

Aplicaciones del Diseño

Los procedimientos de diseño dados en este apunte se aplican a los siguientes tipos de pavimentos:

- *Hormigón simple sin pasadores.* Se construyen sin armadura ni pasadores. La transferencia de carga en las juntas es provista por la trabazón entre agregados (fisura por debajo del aserrado), cuya eficiencia mejora con el menor espaciamiento entre juntas
- *Hormigón simple con pasadores.* Se construyen sin armadura pero se utilizan barras lisas (alineadas con el eje de la calzada), para la transferencia de carga en cada junta transversal de contracción. Se diseñan longitudes de losas relativamente cortas para evitar fisuras intermedias en los paños
- *Pavimentos con armadura.* Contienen armadura longitudinal y pasadores para la transferencia de carga en las juntas de contracción. El espaciamiento entre juntas (transversales) es mayor que en los anteriores. Entre las juntas aparecerán una o más fisuras transversales, las que se mantendrán cerradas debido a la presencia de la armadura. Estas fisuras proveerán adecuada transferencia de carga por trabazón entre agregados (siempre y cuando se mantengan unidas las caras de la fisura)

Para los pavimentos de hormigón simple con o sin armadura, es recomendable que la separación entre juntas transversales no exceda de 4,6 metros, para evitar la formación de fisuras intermedias. En el caso de pavimentos con armadura para el control de fisuración, dicho espaciamiento no debería exceder los 9,15 metros.

- *Pavimentos con armadura continua.* Se diseñan con una cuantía importante en la dirección longitudinal. Desarrollan fisuras transversales que se mantienen cerradas por la armadura, y en éstas la transferencia de carga se lleva a cabo por la trabazón entre agregados

Los procedimientos de diseño cubren las siguientes condiciones:

1. Grado de transferencia de carga en las juntas provistas por los diferentes tipos de pavimentos
2. El efecto beneficioso de la utilización de banquetas de hormigón adyacentes al pavimento, dado por las menores deflexiones y tensiones que originan las cargas de los vehículos
3. El efecto de la utilización de una subbase de hormigón pobre (econocreto), la cual reduce deflexiones y tensiones, provee un soporte importante en las juntas al momento del paso de cargas pesadas y aporta una importante resistencia a la erosión dada por deflexiones repetidas de la losa.

4. Se aplican 2 criterios de diseño:

- a). Fatiga, manteniendo las tensiones del pavimento debido a la repetición de cargas dentro de límites aceptables, previniendo de esta manera la aparición de fisuras por fatiga del material
- b). Erosión, para limitar los efectos de las deflexiones del pavimento en los bordes de la losa, juntas y esquinas, controlando así la erosión de los materiales de fundación y banquina.

Es necesario aplicar este criterio dado que algunas formas de daño de los pavimentos, tales como bombeo, desniveles entre losas y daños en banquina, no están relacionados con la fatiga.

5. Se consideran en el diseño los ejes triples (tridem). Su acción es más perjudicial según el diseño por erosión (deflexión) que por fatiga.

Bases del diseño

Los métodos de diseños presentados están basados en los conocimientos teóricos de pavimentos, desempeño e investigaciones experimentales de las siguientes fuentes:

1. Estudios teóricos del comportamiento de losas de pavimentos, Pickett y Ray, y análisis computarizados de elementos finitos recientemente desarrollados, uno de los cuales es usado como base para este procedimiento de diseño.
2. Ensayos sobre modelos y a escala real tal como "Arlington Tests" y varios proyectos de investigación llevados a cabo por la PCA (Portland Cement Association) y otros organismos, sobre subbases, juntas y banquetas de hormigón
3. Pavimentos experimentales sujetos a tránsito de ensayo controlado, tales como "Bates Test Roads", "Pittsburg Test Highway", "Maryland Road Test", "AASHTO Road Test", y estudios de pavimentos en servicio efectuados por los Departamentos de Transporte de diversos estados.
4. El comportamiento de pavimentos construidos normalmente y sujetos a tránsito mixto normal.

PARAMETROS DE DISEÑO

Luego de la selección del tipo de pavimento, tipo de subbase (si es necesaria) y tipo de banquina (con o sin banquina de hormigón, con o sin cordón integral), el diseño de espesores se determina en base a los siguientes factores:

1. Resistencia a la flexión del hormigón (Modulo de Rotura MR)
2. Resistencia de la subrasante, o combinación de subrasante y subbase (k)
3. Pesos, frecuencias y tipos de ejes de vehículos pesados
4. Período de Diseño

Resistencia a la Flexión del hormigón "MR"

Este factor es aplicable en el procedimiento de diseño por criterio de fatiga, el cual controla la fisuración del pavimento bajo cargas repetidas de camiones.

Las cargas de ejes en los pavimentos de hormigón producen esfuerzos de compresión y flexión. La relación de compresión esfuerzo / resistencia es muy baja y no afecta el diseño de espesor de la losa. Sin embargo, la relación de flexión esfuerzo / resistencia es mucho más alta, y frecuentemente superan el valor de 0,5. Como consecuencia de esto las tensiones de flexión y la resistencia a la flexión son usada en el cálculo de espesores. La resistencia a la flexión MR se determina normalmente en vigas de 15x15x55 cm.

Para cada proyecto, la mezcla de hormigón debe ser diseñada para cumplir con la durabilidad y resistencia flexional exigidas, al menor costo posible.

El MR puede determinarse por medio de los ensayos de carga en el punto medio o en los tercios. La ventaja de éste último es que se determina la resistencia en el tercio medio de la viga, mientras que en el primero se lo determina en un solo punto (sección central). El valor del **Módulo de Rotura Promedio a 28 días**, es el parámetro de resistencia utilizado en esta guía para el cálculo de espesores.

El Módulo de Rotura se determina normalmente a 7, 14, 28 y 90 días:

- Los resultados de ensayos a 7 y 14 días se utilizan para los controles en obra (estimación de la resistencia final que cumpla con la especificación) y para establecer cuando podrá ser habilitado al tránsito.

- El valor de resistencia a 28 días se utiliza normalmente para el diseño de espesores de calles y rutas.
- La resistencia a flexión a 90 días es comúnmente utilizada para el diseño de espesores de aeropuertos. Esto se basa en que existen muy pocas repeticiones (en comparación con las que recibirá durante su vida útil), en el período que va desde la habilitación hasta los 90 días (contados a partir de la colocación), fecha en la que supuestamente el hormigón ha alcanzado su máxima resistencia.

Capacidad portante de la subrasante o combinación subrasante - subbase "k"

Este parámetro se obtiene del Ensayo del Plato de Carga. Dado que la ejecución de este ensayo es relativamente difícil, el valor de "k" es usualmente estimado por correlación con el Ensayo de Valor Soporte Relativo (CBR), de fácil ejecución. El procedimiento de estimación es válido y no se requiere una determinación exacta de "k", ya que variaciones pequeñas del mismo no afectarán significativamente el espesor del pavimento.

La correlación entre "k" y "CBR" que se muestra en la Figura 1 es suficiente para los propósitos del diseño de espesores.

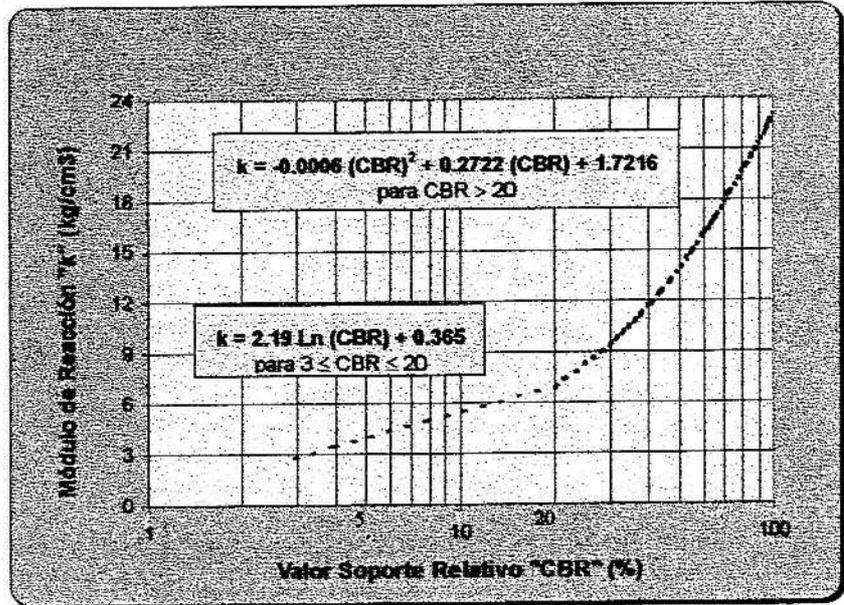


Figura 1. Correlación aproximada entre Valor Soporte (CBR) y Módulo de reacción "k". Las ecuaciones presentadas (aplicables según el rango del CBR), también dan una adecuada aproximación para el cálculo.

El AASHTO Road Test demostró que la disminución del soporte durante el período de deshielo tiene muy poca incidencia en el diseño de espesores de pavimentos. Esto se debe a que la disminución del módulo de reacción "k" de la subrasante durante el corto período de deshielo, se ve más que compensado por el largo período en que la misma permanece congelada, con un valor de "k" mucho más alto que el asumido en el diseño del espesor del pavimento.

Para evitar el tedioso método de variación de módulo de reacción "k" según la temperatura y humedad de la subrasante durante las diferentes estaciones del año, se adoptan valores de medios del mismo.

Cuando sea necesario la utilización de subbases para la prevención del bombeo, existirá un incremento en el valor de "k". Los valores corregidos del mismo pueden obtenerse de Tabla 1 y Tabla 2, para subbases no tratadas (granulares) y subbases tratadas con Cemento Portland, respectivamente. No resulta económico la utilización de una subbase no tratada para incrementar el valor de "k".

Módulo de Reacción de la Combinación Subrasante / Subbase

Subbases granulares TABLA 1

"k" de la subrasante (kg/cm³)	Módulo de Reacción combinado (kg/cm³)			
	Espesor de la Subbase (cm)			
	10	15	23	30
1.4	1.8	2.1	2.4	3.0
2.8	3.6	3.9	4.4	5.3
5.5	6.1	6.4	7.5	8.9
8.3	8.9	9.1	10.2	11.9

Subbases tratadas con cemento TABLA 2

"k" de la subrasante (kg/cm³)	Módulo de Reacción combinado (kg/cm³)			
	Espesor de la Subbase (cm)			
	10	15	20	25
1.4	4.7	6.4	8.6	10.8
2.8	7.8	11.1	14.4	17.7
5.5	13.0	17.7	23.0	-

Los valores de Tabla 1 están basados en el análisis de un sistema de dos capas de Burmister y ensayos de plato de carga para la determinación de "k", en subrasantes y subbases para ensayos de losas a escala real. Las subbases tratadas con cemento son ampliamente utilizadas en pavimentos con elevado tránsito pesado. Se recomienda para este tipo de subbases la utilización de materiales A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3 de la clasificación AASHTO. Los contenidos de cemento se determinarán en base al ensayo de durabilidad (Humedecimiento-Secado y Congelamiento-Deshielo).

Período de Diseño

Se prefiere la utilización del término "Período de Diseño" en lugar de "Vida útil". Esto se debe a que la vida útil de la estructura dependerá de las condiciones reales de sollicitación a la que esté sometida, tanto del tránsito, clima, como así también de la calidad constructiva final; así la vida útil podrá ser superior o inferior a la proyectada.

El Período de Diseño es muchas veces considerado sinónimo del período de análisis del tránsito. Dado que el tránsito no puede ser estimado en forma precisa para períodos muy largos, el normalmente usado en el diseño de espesores de pavimentos es de 20 años. De todas maneras, existen otros casos en que la utilización de períodos más cortos o más largos pueden justificarse económicamente; tal es así que muchos ingenieros consideran que 30 a 35 años debe ser el período a adoptar para el caso de rutas rurales y urbanas.

El período de diseño afecta el espesor del pavimento ya que éste determina cuántos años y por lo tanto cuántos camiones deberá soportar la estructura durante la prestación de servicio. La selección del período de diseño para cada proyecto específico estará fundamentada por un criterio ingenieril y el análisis económico respectivo del costo del pavimento y el servicio requerido durante todo el período.

Tránsito

La cantidad y carga de ejes pesados que actuarán durante el período de diseño, es uno de los factores más importantes en el procedimiento de cálculo del espesor del pavimento. Estos se estiman sobre la base de:

- TMDA (Tránsito Medio Diario Anual) y % de camiones o TMDA de vehículos pesados
- Cargas de los ejes de los vehículos pesados

El TMDA se obtiene en base a censos de tránsito y se considera el TMDA presente o actual.

Proyección del tránsito

El TMDA de diseño se estima con el TMDA presente y el Factor de Proyección, FP. Este último se calcula en función del período de diseño y de la tasa de crecimiento media esperada durante el mismo. El TMDA es multiplicado por el FP, obteniendo así el TMDA de diseño. La Tabla 3 muestra el Factor de Proyección, para diferentes tasas de crecimiento y períodos de diseño analizados.

Los factores que influyen en las tasas de crecimiento anual y proyección del tránsito son los siguientes:

- *Crecimiento normal del tránsito*: incremento debido a un mayor número y uso de los vehículos
- *Tránsito atraído*: incremento del tránsito debido a las mejoras del camino existente
- *Tránsito generado*: incremento debido al mayor número de viajes que no hubiesen sido efectuados si los nuevos medios no hubiesen sido construidos
- *Tránsito desarrollado*: incrementos debido a cambios en el uso de la tierra por la construcción de la nueva vía

Los efectos combinados en los 4 factores antes mencionados darán como resultado tasas de crecimiento anual que oscilan entre el 2 y el 6 %. Ante situaciones no muy definidas de la tasa de crecimiento, es conveniente adoptar valores superiores a los esperados, teniendo en cuenta que el porcentaje de aumento de camiones siempre resulta algo inferior al de los vehículos livianos.

Factor de proyección

TABLA 3

Tasa de Crecimiento anual (%)	Período de diseño, en años				
	20	25	30	35	40
1.0	1.10	1.13	1.16	1.19	1.22
1.5	1.16	1.20	1.25	1.30	1.35
2.0	1.22	1.28	1.35	1.41	1.49
2.5	1.28	1.36	1.45	1.54	1.64
3.0	1.34	1.45	1.56	1.68	1.81
3.5	1.41	1.54	1.68	1.83	1.99
4.0	1.48	1.63	1.80	1.99	2.19
4.5	1.55	1.73	1.94	2.16	2.41
5.0	1.63	1.84	2.08	2.35	2.65
5.5	1.71	1.95	2.23	2.55	2.92
6.0	1.79	2.07	2.40	2.77	3.21

TMDA de vehículos pesados

La cantidad de vehículos pesados por día en ambas direcciones o su porcentaje respecto del TMDA es utilizado en el procedimiento de diseño. Se incluye en esta categoría solamente a los camiones de seis ruedas o más y no incluye a ningún tipo de vehículo de cuatro ruedas (camionetas, furgones, utilitarios, etc.).

Para el caso de rutas o autopistas de tránsito intenso debe contarse con datos específicos de relevamiento de tránsito.

Para el diseño, el número total de camiones es calculado como:

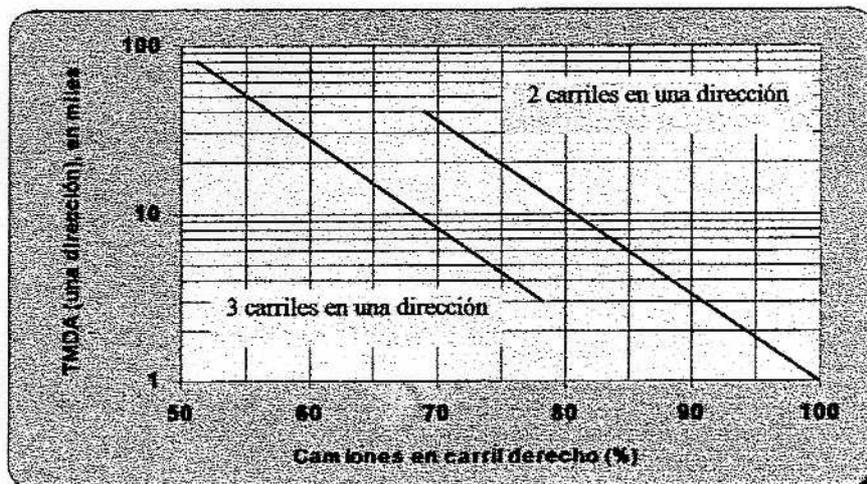
$$VP = TMDA * \% VP * 365 * PD$$

Siendo VP: Cantidad total de vehículos pesados (camiones) para el diseño de espesores
 TMDA: Tránsito medio diario anual de diseño (TMDA presente por el factor de proyección)
 % VP: Porcentaje de vehículos pesados respecto del TMDA
 PD: Período de diseño, en años

Proporción de Vehículos Pesados en el Carril derecho

Figura 2.

Para el caso de 4 carriles o más, se podrá estimar en base a la Figura 2 la proporción de camiones que circularán por la trocha derecha (trocha más cargada) respecto del que circulan en la misma dirección. Para ello, se deberá conocer el TMDA del sentido más cargado.



Distribución de vehículos pesados por sentido de circulación

En la mayoría de los diseños, se asume que los pesos y volúmenes de camiones que circulan en cada sentido son similares, donde cada sentido tomará aproximadamente la mitad del tránsito pesado (distribución 50-50).

Esta suposición puede no cumplirse para algún proyecto específico, donde por ejemplo, gran parte de los camiones circulen en una dirección cargados, retomando vacíos en la dirección contraria. Ante estos casos se deberá conocer la real distribución y frecuencias de cargas por eje para el sentido más cargado, ya que de lo contrario al asumir 50 % de cargas para cada sentido, se estará subdimensionando el pavimento en la trocha más cargada.

Distribución de cargas de ejes

Los datos de distribución de cargas de ejes son necesarios para computar la cantidad de ejes simples, dobles (tandem) y triples (tridem), y pueden ser determinados de alguna de las 3 maneras siguientes:

1. Censos para la determinación de los diferentes tipos de ejes y medición de cargas respectivas
2. Datos de censos previos del organismo correspondiente (Vialidad Nacional, Provincial o Municipal)
3. Estudios de medición de pesos en movimiento en vías de similares condiciones de tránsito

Factor de seguridad de cargas

En el procedimiento de diseño, las cargas de ejes determinados en el paso anterior son multiplicadas por un factor de seguridad de cargas (FSC). Estos valores son los que a continuación se recomiendan:

- Autopistas y rutas de alto volumen de tránsito pesado, donde sea requerido un flujo ininterrumpido del tránsito, FSC = 1,2
- Rutas y arterias importantes con moderado volumen de tránsito pesado, FSC = 1.1
- Rutas y otras vías de bajo volumen de tránsito pesado y calles residenciales, FSC = 1.0

El FSC brinda además una seguridad adicional en el procedimiento de diseño, contemplando otros imponderables tales como sobrecargas impredecibles, variaciones normales de las propiedades de los materiales y pequeñas deficiencias en el espesor de proyecto.

En casos especiales, la utilización de FSC = 1.3 podría justificarse para mantener un nivel de serviciabilidad más alto de lo normal durante todo el período de diseño. El ejemplo puede ser una arteria urbana con muy alto volumen de tránsito, en donde no existan vías alternativas para el tráfico circulante.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El método presentado a continuación es usado cuando se ha determinado en forma detallada la distribución de cargas de los diferentes tipos de ejes (simples, dobles y triples). Para esto se necesita conocer los siguientes factores, tratados anteriormente:

- Tipo de junta y banquina
- Resistencia a la flexión del hormigón (MR) a los 28 días
- Módulo de reacción "k" de la subrasante o combinación subrasante/subbase
- Número esperado de repeticiones de cargas para cada tipo de eje durante el período de diseño

En el ejemplo se muestran ambos análisis, el de fatiga (para controlar fisuración por fatiga) y el de erosión (para controlar erosión de banquina y materiales de fundación, bombeo y escalonamiento de losas).

El análisis de fatiga usualmente define el diseño de los pavimentos de tránsito liviano (calles residenciales y caminos secundarios, independientemente de si poseen o no pasadores) y pavimentos de tránsito mediano con pasadores.

El análisis de erosión controlará usualmente el diseño de pavimentos de tránsito mediano y pesado, con juntas sin pasadores (trabazón entre agregados) y pavimentos de tránsito pesado con pasadores.

Para pavimentos que soportan pesos mixtos de ejes (livianos, medianos y pesados), las cargas de ejes simples son generalmente más severas en el análisis de fatiga, mientras que las de los ejes tandem lo son para el análisis de erosión.

El procedimiento de diseño pasa a paso es el siguiente: Se establecen los datos de diseño mostrados en la parte superior de la Figura 4 (planilla utilizada en el cálculo de espesores de pavimentos) y se completan las Columnas 1 y 3. Las cargas por eje se multiplican por el Factor de Seguridad de Cargas y se obtiene así la Columna 2.

Análisis de Fatiga

Los resultados del análisis de Fatiga y por lo tanto los ábacos y Tablas utilizados en su determinación, son los mismos para pavimentos con y sin pasadores, e inclusive para pavimentos con armadura continua.

- Pavimentos sin banquina de hormigón: se usará la Tabla 5.a. y la Figura 5
- Pavimentos con banquina de hormigón: se usará la Tabla 5.b. y la Figura 5

Procedimiento:

1. Determinar en las tablas correspondientes, la tensión equivalente para ejes simples, tandem y tridem (ítems 8, 11 y 14 de la Figura 4), función del espesor estimado del pavimento y del Módulo de reacción combinado "k". Para valores de "k" intermedios a los que presentan las Tablas, se interpolará linealmente entre éstos.

2. Dividiendo a las anteriores por el Módulo de Rotura del hormigón "MR" se determinará el Factor de Relación de Tensiones para los diferentes ejes (ítems 9, 12 y 15 de la Figura 4).
3. Completar la Columna 4 por medio del uso de la Figura 5. Para esto se unirá linealmente los valores correspondientes a cada carga de la Columna 2 con el Factor de Relación de Tensiones respectivo (según el tipo de eje). Continuando dicha recta hasta el eje vertical de la derecha, se leerá el valor de las "Repeticiones Admisibles".
4. Calcular la Columna 5, dividiendo la Columna 3 por la Columna 4 y multiplicando por 100; luego sumar los valores individuales para cada tipo de eje.

Análisis de Erosión

A. Pavimentos sin banquina de hormigón

- Juntas con pasadores o pavimentos de armadura continua, usar Tabla 6.a y la Figura 6.a.
- Juntas con trabazón entre agregados, utilizar la Tabla 6.b y la Figura 6.a.

B. Pavimentos con banquina de hormigón

- Juntas con pasadores o pavimentos de armadura continua, usar Tabla 7.a y la Figura 6.b.
- Juntas con trabazón entre agregados, utilizar la Tabla 7.b y la Figura 6.b.

Procedimiento:

1. Determinar en las tablas correspondientes, el Factor de Erosión para ejes simples, tandem y tridem (ítems 10, 13 y 16 de la Figura 4), función del espesor estimado del pavimento y del Módulo de reacción combinado "k". Para valores de "k" intermedios a los que presentan las Tablas, se interpolará linealmente entre éstos.
2. Completar la Columna 6 por medio del uso de la Figura 6.a o Figura 6.b., según se trate de pavimentos sin o con banquina de hormigón, respectivamente. Para esto se unirá linealmente los valores correspondientes a cada carga de la Columna 2 con el Factor de Erosión respectivo (según el tipo de eje). Continuando dicha recta hasta el eje vertical de la derecha, se leerá el valor de las "Repeticiones Admisibles".
3. Calcular la Columna 7, dividiendo la Columna 3 por la Columna 6 y multiplicando por 100; luego sumar los valores individuales para cada tipo de eje.

Nota: En las Figuras 5, 6.a y 6.b no están incorporados los ejes Tridem en la columna de cargas (por razones de espacio). Para poder hacer uso de las mismas, solo bastará con dividir por 3 la carga del eje tridem e ingresar con este valor del lado correspondiente al eje simple.

En la utilización de los ábacos no es necesario la interpolación precisa de las repeticiones admisibles. Si la línea intersecta al eje de las repeticiones admisibles por encima del límite superior, se considerará que las mismas son ilimitadas.

El espesor tentativo no será adecuado si la suma total de cada tipo de eje supera el 100 % del consumo de Fatiga o Daño por Erosión. En este caso se deberá adoptar un espesor mayor y repetir todo el procedimiento de diseño, hasta que los mismos no superen el 100 %. Si estos valores están muy por debajo del 100 % se procederá en forma inversa, disminuyendo el espesor tentativo hasta acercarse lo más posible al límite máximo del 100 %, tanto para Fatiga como para Erosión. El espesor de pavimento se adoptará al centímetro.

Observación.

Al adoptar el Módulo de Reacción de la Subrasante (si existe Subbase la combinación de ambas) para el diseño de espesores, el mismo no deberá ser nunca superior a 17 kg/cm³, aunque al estimarlo en función del CBR, Tipo y Espesor de Subbase, sea superior al valor indicado.

Ejemplo

• Datos de Proyecto

Número de Trochas	4 (2 por sentido de circulación)
Período de Diseño	20 años
TMDA	11.200 veh/día
Tasa de crecimiento anual de Vehículos Pesados (%)	3,0
Camiones	17 % del TMDA

• Cálculo del Tránsito

Factor de Proyección: $(1 + 0,03)^{(20/2)} = 1,34391$

TMDA de Diseño = $11.200 * 1,34391 = 15.052$ vehículos/día (7.525 en una dirección)

Distribución del Tránsito (%) = 50 - 50

TMDA de Camiones = $15.052 * 0,5 * 0,19 \approx 1.280$ camiones/día

De la Figura 2, para 7.525 veh/día en una dirección y 2 trochas por sentido, se obtiene el porcentaje de camiones en una dirección, siendo en este caso un valor aproximado a 83%.

Por lo tanto, el número de vehículos pesados esperados para el Período de Diseño será:

$$\text{Número de Camiones (N°C)} = 1.280 * 0,83 * 20 * 365 \approx 7.755.670$$

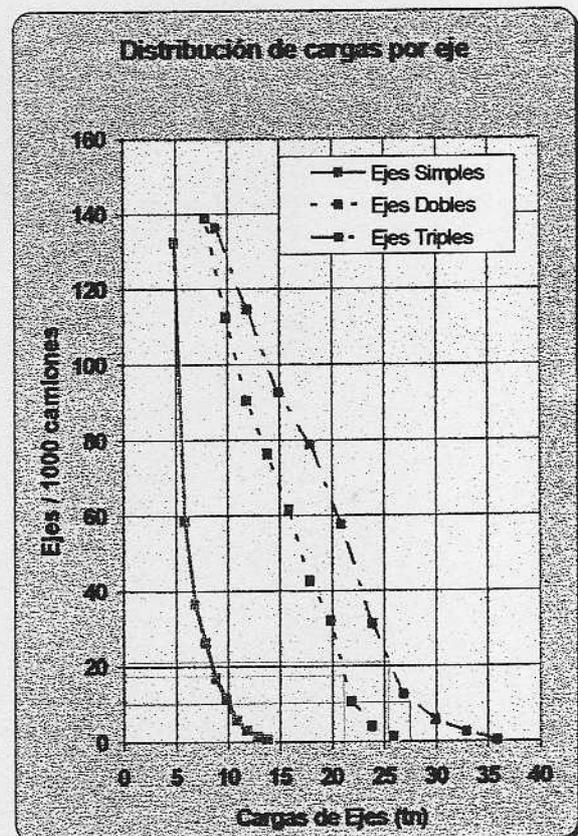
Para los rangos de cargas por eje y frecuencia de las mismas cada 1000 vehículos, se adoptan los valores de la Tabla 4, Columnas 1 y 2 respectivamente. La Columna 3 corresponde al número de ejes que se estiman para el Período de Diseño analizado (20 años), calculados de la siguiente manera:

$$\text{Ejes en el Período de Diseño (Carga i)} = \text{Ejes por cada 1000 camiones} * \text{N° de Camiones} / 1000$$

Tabla 4

Cargas de Ejes (tn)	Ejes por cada 1000 camiones	Ejes en el Período de Diseño
Ejes Simples		
14.0	0.61	4731
13.0	1.28	9927
12.0	2.98	23112
11.0	5.56	43122
10.0	11.26	87329
9.0	16.81	130373
8.0	26.32	204129
7.0	36.59	283780
6.0	58.47	453474
5.0	132.29	1025998
Ejes Dobles (Tandem)		
26.0	1.23	9539
24.0	3.96	30712
22.0	10.58	82055
20.0	32.09	248879
18.0	42.48	329461
16.0	61.51	477051
14.0	76.21	591060
12.0	90.39	701035
10.0	112.48	872358
8.0	138.80	1076487
Ejes Triples (Tridem)		
36.0	0.28	2172
33.0	2.56	19855
30.0	5.68	44052
27.0	12.50	96946
24.0	31.29	242675
21.0	57.64	447037
18.0	78.90	611922
15.0	92.67	718718
12.0	114.72	889731
9.0	136.31	1057176

Figura 3



Datos

Alternativa N°	1	2	3	4	5
Tipo de Junta (CP, SP)	CP	CP	CP	SP	SP
Tipo de Banquina (CBH, SBH)	SBH	SBH	CBH	SBH	CBH
Tipo de Subbase (G, C)	G	C	G	C	C
Espesor de Subbase (cm)	10				
Módulo de Reacción de Subrasante (kg/cm ³)	2.77				
Módulo de Reacción Combinado (kg/cm ³)	3.56	7.74	3.56	7.74	7.74
Factor de Seguridad de Cargas	1.2				
Resistencia a la flexión MR, kg/cm ²	45				

Tabla resumen de las diferentes alternativas

Alternativa N°	1	2	3	4	5
Espesor resultante (cm)	25	22	21	27	23
Consumo de Fatiga (%)	45.43	73.13	78.06	0.09	0.39
Remanente disponible (%)	54.57	26.87	21.94	99.91	99.61
Daño por Erosión (%)	58.17	74.47	75.87	80.95	77.39
Remanente disponible (%)	41.83	25.53	24.13	19.05	22.61
Dominio del Diseño	Fatiga	Fatiga	Fatiga	Erosión	Erosión

Alternativa N°	1	2	3	4	5
	Ejes Simples				
Tensión Equivalente (kg/cm ²)	13.83	14.36	14.40	10.77	11.19
Factor de Erosión	2.55	2.69	2.36	2.64	2.42
Consumo de Fatiga	38.25	71.57	74.73	0.09	0.39
Daño por Erosión (%)	2.71	8.50	6.45	6.07	11.38
	Ejes Dobles				
Tensión Equivalente (kg/cm ²)	13.02	12.27	12.60	9.66	9.54
Factor de Erosión	2.75	2.81	2.50	2.84	2.52
Consumo de Fatiga	7.18	1.56	3.32	0.00	0.00
Daño por Erosión (%)	27.52	41.36	43.72	53.14	51.64
	Ejes Triples				
Tensión Equivalente (kg/cm ²)	9.96	9.22	9.65	7.33	7.44
Factor de Erosión	2.92	2.91	2.60	2.89	2.54
Consumo de Fatiga	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Daño por Erosión (%)	27.94	24.61	25.70	21.74	14.37

Desarrollo del procedimiento de Diseño

El procedimiento de diseño está basado en un análisis minucioso de las tensiones del hormigón y deflexiones en las juntas, esquinas y bordes del pavimento, por medio de un programa de elementos finitos. Este permite las siguientes consideraciones:

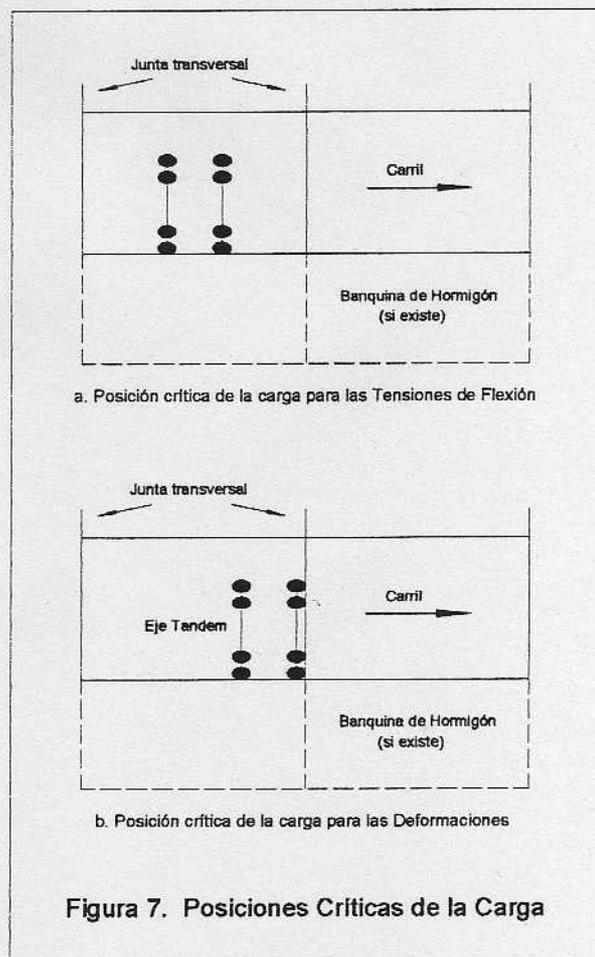
- ✓ Losas con dimensiones finitas
- ✓ Ubicación variable de las cargas de los diferentes tipos de ejes
- ✓ Modelación de la transferencia de cargas en juntas transversales (o fisuras) y en juntas longitudinales entre el pavimento y la banquina de hormigón

Para pavimentos con pasadores, las propiedades de los mismos, tales como diámetro y Módulo de Elasticidad son usadas directamente. Para pavimentos con transferencia de carga por trabazón entre agregados y juntas machihembradas se utiliza como modelo un soporte de resortes de cierta rigidez, para representar las características de carga - deformación, basado en ensayos de campo y laboratorio.

Ubicación crítica de las cargas

Luego del análisis de las diferentes posiciones de las cargas en la losa, se estableció la posición más crítica, mostrada en la Figura 7, con las siguientes conclusiones:

1. Las tensiones más críticas ocurren cuando las ruedas del camión están ubicadas en o cerca del borde del del pavimento y equidistantes de las juntas transversales (Figura 7.a). Dado que las juntas están a cierta distancia del punto de aplicación de la carga, la separación entre juntas transversales y el tipo de transferencia de carga en las mismas, tienen muy poca influencia en la magnitud de la tensión. De ahí que el análisis basado en la tensión de flexión y fatiga arroje los mismos valores para diferentes separaciones entre juntas y mecanismos de transferencia de carga (pasadores o trabazón entre agregados). Cuando se coloca banquina de hormigón vinculada al pavimento, la magnitud de la tensión crítica se reduce considerablemente.
2. Las deflexiones más críticas ocurren en la esquina de la losa, cuando la carga es ubicada en la junta, con las ruedas en o cerca de la esquina (Figura 7.b). Para ejes tridem, la máxima deflexión ocurre con 2 ejes de un lado de la junta y el tercero del otro lado de la misma. En esta situación la separación entre juntas transversales no influye en la magnitud de la deflexión, mientras que el mecanismo de transferencia de carga tiene un efecto sustancial. Esto significa que el diseño basado en el criterio de Erosión (deflexiones), se ve afectado por el tipo de transferencia de carga, principalmente cuando se diseña para un gran número de camiones. La banquina de hormigón también reduce significativamente las deflexiones en las esquinas.



Ubicación de las cargas de camiones

Cuando las cargas de rueda de los vehículos pesados se ubican en el borde exterior del pavimento, se genera la condición más desfavorable. Con el desplazamiento de las mismas de algunos pocos centímetros hacia el interior de la losa, el efecto disminuye considerablemente.

Solamente una pequeña fracción de los camiones transita con sus ruedas exteriores ubicadas en el borde del pavimento, mientras que la mayoría lo hace aproximadamente a unos 60 cm. del mismo. Los estudios llevados a cabo por Taragin y reportados en 1958 mostraron escasa circulación de camiones en el borde del pavimento, para carriles de 3,65 m. y sin banquina de hormigón. Estudios más recientes desarrollados por Emery, arrojan un mayor número de camiones transitando en el borde. Para los propósitos del diseño, se adopta la condición más desfavorable, con un 6 % de camiones en el borde, manteniéndose del lado de la seguridad y absorbiendo potenciales mayores anchos en la flota vehicular pesada de los próximos años.

A mayor distancia hacia el interior del pavimento, la frecuencia de la aplicación de las cargas se incrementa, mientras que la magnitud de las tensiones y deformaciones disminuyen. Los datos de la distribución de la ubicación de camiones y la distribución de tensiones y deformaciones debido a la ubicación de las cargas en y cerca del borde del pavimento, son difíciles de usar directamente en el procedimiento de diseño. Como resultado de esto, se analizaron las distribuciones y se prepararon técnicas de aplicación más sencillas para los propósitos del diseño.

Para el análisis de Fatiga, la misma fue computada incrementalmente a fracciones de pulgadas hacia el interior desde el borde de la losa, para diferentes distribuciones de la posición de los camiones; esto arrojó los factores equivalentes de Borde-Tensión, mostrados en la Figura 8. Este factor multiplicado por la tensión de carga de borde, da el mismo grado de consumo de Fatiga que el que resultaría de una determinada distribución de ubicación de camiones. Las tablas de diseño tienen incorporadas la condición más desfavorable del 6 % de camiones transitando en el borde del pavimento.

Para el análisis de Erosión, el cuál considera la deflexión en la esquina de la losa, se asume también el caso más severo de 6% de camiones en el borde. Donde no hay banquina de hormigón, las cargas de esquina con 6 % de camiones son críticas. Cuando existe banquina de hormigón, el mayor número de cargas hacia adentro de la esquina de la losa (94 % de camiones), brindan la condición más crítica. Estos factores están incorporados en las tablas de diseño de la siguiente manera:

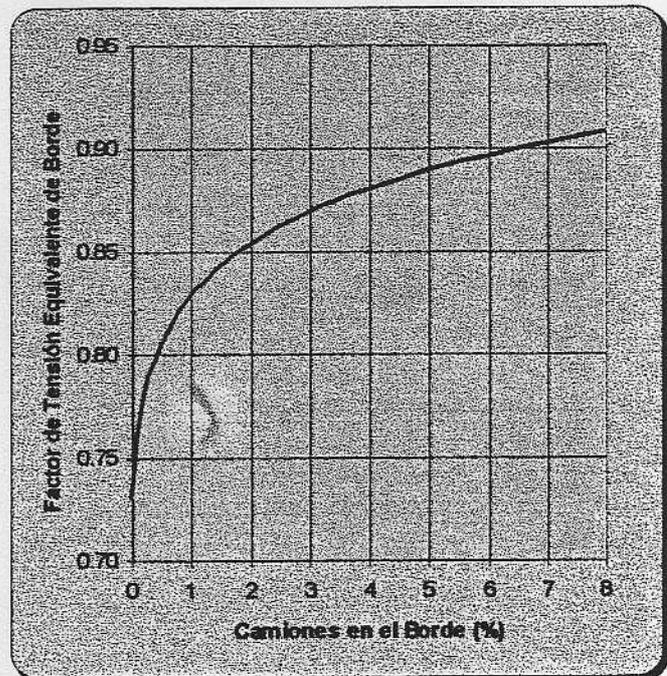


Figura 8. Factor de Tensión Equivalente de Borde en función del porcentaje de camiones que transitan sobre el borde.

$$\text{Porcentaje de Daño por Erosión} = 100 \sum n_i (C/N_i)$$

- Siendo n_i = Número esperado de repeticiones de cargas de eje, para el tipo de eje "i"
 N_i = Número de repeticiones admisibles para el tipo de eje "i"
 C = 0,06 para pavimentos sin banquina de hormigón
 0,94 para pavimentos con banquina de hormigón

Para ahorrar pasos en el cálculo de espesores, los efectos de (C/N_i) han sido incorporados en las Figuras 6.a y 6.b.

Variación en la Resistencia del Hormigón

La reconocida variación en la resistencia ha sido incorporada en el procedimiento de diseño. El rango de variación esperado en el Módulo de Rotura del hormigón tiene un mayor efecto que las variaciones usuales en las propiedades de otros materiales, tal como resistencia de la subrasante y subbase, y espesor de las capas. La variación en la resistencia del hormigón es introducida por medio de la reducción del Módulo de Rotura a través de un coeficiente de variación.

Para los propósitos del diseño, se asumió un coeficiente de variación del 15 % y fue incorporado en los ábacos y tablas de diseño. El valor de 15 % representa un control de calidad de regular a bueno, el que combinado con las restantes condiciones asumidas en el procedimiento de diseño, puede considerarse como realista, con resultados de diseño razonables.

Ganancia de Resistencia del Hormigón con la edad

Como resistencia de diseño se utiliza la resistencia a la flexión a 28 días (MR). Sin embargo el procedimiento de diseño incorpora el efecto de la ganancia de resistencia después de los 28 días. El efecto está incluido en los ábacos y tablas de diseño, de manera que el proyectista simplemente considera el valor de 28 días como resistencia de diseño.

Alabeo de las losas

El alabeo de las losas es provocado por gradientes de temperatura y humedad entre la parte superior e inferior de las mismas. La losa estará sometida a tensiones adicionales (tracción o compresión) a las originadas por el tránsito, debido al alabeo restringido por el peso propio del hormigón.

En el análisis de Fatiga, el procedimiento de diseño no tiene en cuenta las tensiones originadas por alabeo restringido. En cambio sí tiene en cuenta el efecto del alabeo en la pérdida de soporte a lo largo del borde del pavimento. Dicho efecto es considerado indirectamente en el análisis de Erosión, el cuál deriva del comportamiento real de pavimentos en servicio, incorporando la pérdida normal de las condiciones de soporte.

Fatiga

La Figura 9 muestra la curva de Fatiga utilizada en el procedimiento de diseño. Es similar a la usada en el método previo de la PCA, excepto que es aplicada a tensiones de carga de borde de mayor magnitud. Se efectuó una modificación en el rango de repetición de carga elevada, para eliminar la discontinuidad en la curva previa, la que en algunos casos provocaba efectos poco reales.

El número de repeticiones admisibles para una determinada carga de eje, está basado en la relación de tensiones (tensión de flexión dividida por el Módulo de Rotura a 28 días). La curva de Fatiga está incorporada en los ábacos de diseño para ser utilizada directamente por el proyectista.

El uso del criterio de Fatiga está hecho sobre la hipótesis de Miner, donde la fatiga no consumida por la repetición de una carga está disponible para la repetición de otra carga. En un problema específico de diseño, la fatiga total consumida no deberá exceder el 100 %.

El criterio de fatiga, combinado con la reducción del Módulo de Rotura de diseño a través de un coeficiente de variación, es considerado como un método conservador en el diseño de espesores.

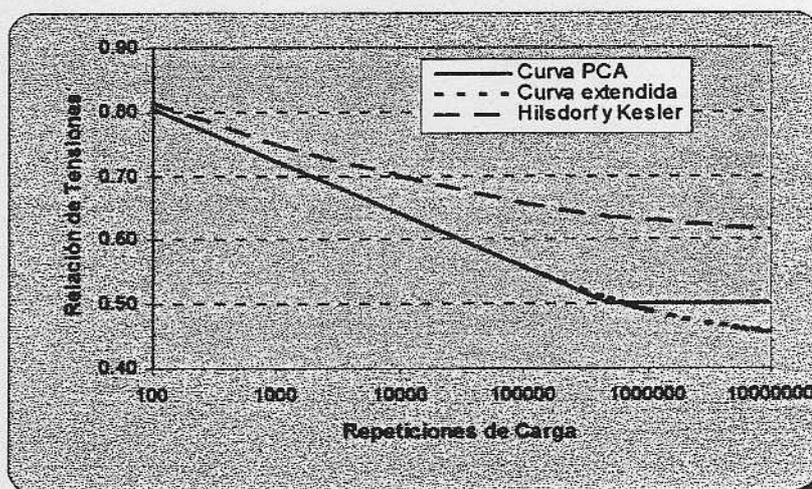


Figura 9. Curvas de Fatiga.

Nota: La curva de Hilsdorf y Kesler está hecha con una probabilidad constante de 0.05.

Erosión

Los procedimientos mecanicistas de diseño previos para pavimentos de hormigón están basados en el principio de la limitación de la tensión de tracción por flexión en la losa, a valores conservadores. Esto se efectúa para evitar fisuras de fatiga flexional debido a las repeticiones de carga.

Se ha observado que existe un importante mecanismo de daño además de la fisuración por fatiga, el cuál debe ser tenido en cuenta en el procedimiento de diseño. Este está referido a la erosión del material ubicado debajo y en los costados de la losa.

Muchas repeticiones de cargas de ejes pesados en las esquinas y bordes de las losas provocan bombeo, erosión de la subrasante, subbase y material de banquina, huecos debajo y en adyacencias de las losas, y escalonamiento de los pavimentos, principalmente en las juntas sin pasadores.

Este tipo de daño está más bien relacionado a las deflexiones del pavimento que a las tensiones de flexión.

Las correlaciones de deflexiones, entre las computadas con el análisis de elementos finitos y las de los pavimentos de la prueba AASHTO (AASHTO Road Test), no resultaron satisfactorias a los efectos del diseño.

Se observó en cambio una mayor correlación al multiplicar los valores de deflexión "w" computados en la esquina por los valores de presión "p" computados en la interfase losa-fundación. La Potencia con la que una carga deflecta la losa, es el parámetro usado para el criterio de erosión, el que se define como:

$$\text{Potencia} = p * w / l$$

Siendo:

p = Presión en la interfase losa- fundación

w = Deflexión

l = Relación de rigidez relativa. Equivale a la longitud de la configuración deformada por la aplicación de la carga

El concepto es que un pavimento delgado con su menor longitud deformada recibe una carga de punzonado más rápida que una losa de mayor espesor. Esto es, a igual potencia e igual velocidad del camión, la losa más delgada está sujeta a una mayor potencia.

El desarrollo del criterio de Erosión presentó además una buena correlación con estudios de escalonamiento de juntas. Estos estudios incluyeron pavimentos en Wisconsin, Minnesota, Dakota del Norte, Georgia y California, e incluyen rangos de variables no encontradas en el AASHTO Road Test, tal como mayor número de camiones, juntas sin pasadores, un amplio rango de edades de pavimentos en servicio, y subbases estabilizadas.

Estudios llevados a cabo por Brokaw sobre pavimentos sin pasadores sugieren que el clima o las condiciones de drenaje son factores significativos en el comportamiento de los pavimentos. Este tipo de estudios también ha sido reportado por M. Darter.

El criterio de Erosión puede ser modificado de acuerdo a las condiciones locales, ya que puede tener influencia el clima, condiciones de drenaje, factores locales e innovaciones en el diseño. Por ende, el criterio de daño por erosión del 100 %, valor índice correlacionado con la experiencia del comportamiento general de los pavimentos, puede ser aumentado o disminuido en base a datos de comportamiento específicos recogidos en el futuro, para condiciones más favorables o más adversas.

Cálculo de Espesores de Pavimentos

FIGURA 4

Proyecto: Alternativa N° 1			
Espesor estimado (cm) :	25 cm	Junta con pasadores :	Si
"k" Subrasante - Subbase :	3.56 kg/cm ³	Banquina de Hormigón :	No
Módulo de Rotura "MR" :	45 kg/cm ²	Posee Subbase :	Si
Factor de Seguridad de Cargas "FSC" :	1.2	Tipo :	Granular
Periodo de Diseño :	20 años	Espesor :	10 cm

Cargas de ejes	Carga por FSC	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Admisibles	Consumo de Fatiga (%)	Repeticiones Admisibles	Daño por Erosión (%)
1	2	3	4	5	6	7

EJES SIMPLES

8. Tensión Equivalente : 13.83
9. Factor de Relación de Tensiones: 0.307

10. Factor de Erosión: 2.55

14.0	16.8	4731	28102	16.83	1648626	0.29
13.0	15.6	9927	87016	11.41	2556372	0.39
12.0	14.4	23111	298179	7.75	4152327	0.56
11.0	13.2	43121	1911744	2.26	7439391	0.58
10.0	12.0	87327	Ilimitado	0.00	15503169	0.56
9.0	10.8	130370	Ilimitado	0.00	38990926	0.33
8.0	9.6	204126	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
7.0	8.4	283775	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
6.0	7.2	453466	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
5.0	6.0	1025979	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				38.25		2.71

EJES DOBLES

11. Tensión Equivalente : 13.02
12. Factor de Relación de Tensiones: 0.289

13. Factor de Erosión: 2.75

26.0	31.2	9539	226269	4.22	637882	1.50
24.0	28.8	30712	1062287	2.89	1005380	3.05
22.0	26.4	82054	106839870	0.08	1738851	4.72
20.0	24.0	248875	Ilimitado	0.00	3056723	8.14
18.0	21.6	329455	Ilimitado	0.00	5966160	5.52
16.0	19.2	477043	Ilimitado	0.00	14384942	3.32
14.0	16.8	591049	Ilimitado	0.00	46512001	1.27
12.0	14.4	701022	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
10.0	12.0	872342	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
8.0	9.6	1076468	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				7.18		27.52

EJES TRIPLES

14. Tensión Equivalente : 9.96
15. Factor de Relación de Tensiones: 0.221

16. Factor de Erosión: 2.92

36.0	43.2	2172	Ilimitado	0.00	332153	0.65
33.0	39.6	19854	Ilimitado	0.00	545449	3.64
30.0	36.0	44051	Ilimitado	0.00	939109	4.69
27.0	32.4	96944	Ilimitado	0.00	1803906	5.37
24.0	28.8	242671	Ilimitado	0.00	3636372	6.87
21.0	25.2	447029	Ilimitado	0.00	8941278	5.00
18.0	21.6	611911	Ilimitado	0.00	32097076	1.91
15.0	18.0	718705	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
12.0	14.4	889714	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
9.0	10.8	1057156	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.00		27.94

Consumo de Fatiga:	45.43 %	Daño por Erosión:	58.17 %
---------------------------	----------------	--------------------------	----------------

Cálculo de Espesores de Pavimentos

FIGURA 4

Proyecto: Alternativa N° 2			
Espesor estimado (cm) :	22 cm	Junta con pasadores :	SI
"k" Subrasante - Subbase :	7.74 kg/cm ³	Banquina de Hormigón :	No
Módulo de Rotura "MR" :	45 kg/cm ²	Posee Subbase :	SI
Factor de Seguridad de Cargas "FSC" :	1.2	Tipo :	Cementada
Periodo de Diseño :	20 años	Espesor :	10 cm

Cargas de ejes	Carga por FSC	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Admisibles	Consumo de Fatiga (%)	Repeticiones Admisibles	Daño por Erosión (%)
1	2	3	4	5	6	7

EJES SIMPLES

8. Tensión Equivalente : 14.36
9. Factor de Relación de Tensiones: 0.319

10. Factor de Erosión: 2.69

14.0	16.8	4731	15262	31.00	647240	0.73
13.0	15.6	9927	49233	20.16	982626	1.01
12.0	14.4	23111	159713	14.47	1634110	1.41
11.0	13.2	43121	755507	5.71	2735259	1.58
10.0	12.0	87327	37666429	0.23	4927403	1.77
9.0	10.8	130370	Ilimitado	0.00	10390192	1.25
8.0	9.6	204126	Ilimitado	0.00	27679856	0.74
7.0	8.4	283775	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
6.0	7.2	453466	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
5.0	6.0	1025979	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				71.57		8.50

EJES DOBLES

11. Tensión Equivalente : 12.27
12. Factor de Relación de Tensiones: 0.273

13. Factor de Erosión: 2.81

26.0	31.2	9539	750675	1.27	444746	2.14
24.0	28.8	30712	10564214	0.29	701900	4.38
22.0	26.4	82054	Ilimitado	0.00	1175914	6.98
20.0	24.0	248875	Ilimitado	0.00	2102593	11.84
18.0	21.6	329455	Ilimitado	0.00	3952584	8.34
16.0	19.2	477043	Ilimitado	0.00	8790907	5.43
14.0	16.8	591049	Ilimitado	0.00	26152338	2.26
12.0	14.4	701022	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
10.0	12.0	872342	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
8.0	9.6	1076468	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				1.56		41.38

EJES TRIPLES

14. Tensión Equivalente : 9.22
15. Factor de Relación de Tensiones: 0.205

16. Factor de Erosión: 2.91

36.0	43.2	2172	Ilimitado	0.00	371359	0.58
33.0	39.6	19854	Ilimitado	0.00	609831	3.26
30.0	36.0	44051	Ilimitado	0.00	1056336	4.17
27.0	32.4	96944	Ilimitado	0.00	2025718	4.79
24.0	28.8	242671	Ilimitado	0.00	4106629	5.91
21.0	25.2	447029	Ilimitado	0.00	10367000	4.31
18.0	21.6	611911	Ilimitado	0.00	38365414	1.59
15.0	18.0	718705	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
12.0	14.4	889714	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
9.0	10.8	1057156	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.00		24.61

Consumo de Fatiga:	73.13 %	Daño por Erosión:	74.47 %
---------------------------	----------------	--------------------------	----------------

Cálculo de Espesores de Pavimentos

FIGURA 4

Proyecto: Alternativa N° 3			
Espesor estimado (cm) :	21 cm	Junta con pasadores :	SI
"k" Subrasante - Subbase :	3.58 kg/cm ³	Banquina de Hormigón :	SI
Módulo de Rotura "MR" :	45 kg/cm ²	Posee Subbase :	SI
Factor de Seguridad de Cargas "FSC" :	1.2	Tipo :	Granular
Período de Diseño :	20 años	Esesor :	10 cm

Cargas de ejes	Carga por FSC	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Admisibles	Consumo de Fatiga (%)	Repeticiones Admisibles	Daño por Erosión (%)
1	2	3	4	5	6	7

EJES SIMPLES

8. Tensión Equivalente : 14.40
9. Factor de Relación de Tensiones: 0.320

10. Factor de Erosión: 2.36

14.0	16.8	4731	14614	32.37	454854	1.04
13.0	15.6	9927	47280	21.00	767106	1.29
12.0	14.4	23111	153828	15.02	1411534	1.64
11.0	13.2	43121	714776	6.03	2997648	1.44
10.0	12.0	87327	28428000	0.31	8398640	1.04
9.0	10.8	130370	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
8.0	9.6	204126	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
7.0	8.4	283775	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
6.0	7.2	453466	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
5.0	6.0	1025979	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				74.73		6.45

EJES DOBLES

11. Tensión Equivalente : 12.60
12. Factor de Relación de Tensiones: 0.280

13. Factor de Erosión: 2.50

26.0	31.2	9539	424720	2.25	253331	3.77
24.0	28.8	30712	2850472	1.08	430335	7.14
22.0	26.4	82054	Ilimitado	0.00	794388	10.33
20.0	24.0	248875	Ilimitado	0.00	1661906	14.98
18.0	21.6	329455	Ilimitado	0.00	4385811	7.51
16.0	19.2	477043	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
14.0	16.8	591049	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
12.0	14.4	701022	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
10.0	12.0	872342	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
8.0	9.6	1076468	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				3.32		43.72

EJES TRIPLES

14. Tensión Equivalente : 9.65
15. Factor de Relación de Tensiones: 0.214

16. Factor de Erosión: 2.60

36.0	43.2	2172	Ilimitado	0.00	196825	1.10
33.0	39.6	19854	Ilimitado	0.00	345012	5.75
30.0	36.0	44051	Ilimitado	0.00	665202	6.62
27.0	32.4	96944	Ilimitado	0.00	1476204	6.57
24.0	28.8	242671	Ilimitado	0.00	4292522	5.65
21.0	25.2	447029	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
18.0	21.6	611911	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
15.0	18.0	718705	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
12.0	14.4	889714	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
9.0	10.8	1057156	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.00		25.70

Consumo de Fatiga: 78.06 % Daño por Erosión: 75.87 %

Cálculo de Espesores de Pavimentos

FIGURA 4

Proyecto: Alternativa N° 4			
Espesor estimado (cm) :	27 cm	Junta con pasadores :	No
"K" Subrasante - Subbase :	7.74 kg/cm ³	Banquina de Hormigón :	No
Módulo de Rotura "MR" :	45 kg/cm ²	Posee Subbase :	SI
Factor de Seguridad de Cargas "FSC" :	1.2	Tipo :	Cementada
Período de Diseño :	20 años	Espesor :	10 cm

Cargas de ejes	Carga por FSC	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Admisibles	Consumo de Fatiga (%)	Repeticiones Admisibles	Daño por Erosión (%)
1	2	3	4	5	6	7

EJES SIMPLES

8. Tensión Equivalente : 10.77 10. Factor de Erosión: 2.64
 9. Factor de Relación de Tensiones: 0.239

14.0	16.8	4731	5025679	0.09	861144	0.55
13.0	15.6	9927	Ilimitado	0.00	1360255	0.73
12.0	14.4	23111	Ilimitado	0.00	2200091	1.05
11.0	13.2	43121	Ilimitado	0.00	3699931	1.17
10.0	12.0	87327	Ilimitado	0.00	6918883	1.26
9.0	10.8	130370	Ilimitado	0.00	15481818	0.84
8.0	9.6	204126	Ilimitado	0.00	43668024	0.47
7.0	8.4	283775	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
6.0	7.2	453466	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
5.0	6.0	1025979	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.09		6.07

EJES DOBLES

11. Tensión Equivalente : 9.66 13. Factor de Erosión: 2.84
 12. Factor de Relación de Tensiones: 0.215

26.0	31.2	9539	Ilimitado	0.00	354551	2.69
24.0	28.8	30712	Ilimitado	0.00	559555	5.49
22.0	26.4	82054	Ilimitado	0.00	918880	8.93
20.0	24.0	248875	Ilimitado	0.00	1660238	14.99
18.0	21.6	329455	Ilimitado	0.00	3099855	10.63
16.0	19.2	477043	Ilimitado	0.00	6604664	7.22
14.0	16.8	591049	Ilimitado	0.00	18533766	3.19
12.0	14.4	701022	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
10.0	12.0	872342	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
8.0	9.6	1076468	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.00		53.14

EJES TRIPLES

14. Tensión Equivalente : 7.33 16. Factor de Erosión: 2.89
 15. Factor de Relación de Tensiones: 0.163

36.0	43.2	2172	Ilimitado	0.00	413143	0.53
33.0	39.6	19854	Ilimitado	0.00	678447	2.93
30.0	36.0	44051	Ilimitado	0.00	1193761	3.69
27.0	32.4	96944	Ilimitado	0.00	2261660	4.29
24.0	28.8	242671	Ilimitado	0.00	4625388	5.25
21.0	25.2	447029	Ilimitado	0.00	11991015	3.73
18.0	21.6	611911	Ilimitado	0.00	45615229	1.34
15.0	18.0	718705	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
12.0	14.4	889714	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
9.0	10.8	1057156	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.00		21.74

Consumo de Fatiga:	0.09 %	Daño por Erosión:	80.95 %
---------------------------	---------------	--------------------------	----------------

Cálculo de Espesores de Pavimentos

FIGURA 4

Proyecto: Alternativa N° 5			
Espesor estimado (cm) :	23 cm	Junta con pasadores :	No
"k" Subrasante - Subbase :	7.74 kg/cm ³	Banquina de Hormigón :	Si
Módulo de Rotura "MR" :	45 kg/cm ²	Posee Subbase :	Si
Factor de Seguridad de Cargas "FSC" :	1.2	Tipo :	Cementada
Período de Diseño :	20 años	Espesor :	10 cm

Cargas de ejes	Carga por FSC	Repeticiones Esperadas	Análisis de Fatiga		Análisis de Erosión	
			Repeticiones Admisibles	Consumo de Fatiga (%)	Repeticiones Admisibles	Daño por Erosión (%)
1	2	3	4	5	6	7

EJES SIMPLES

8. Tensión Equivalente : 11.19 10. Factor de Erosión: 2.42
 9. Factor de Relación de Tensiones: 0.249

14.0	16.8	4731	1275192	0.37	287909	1.64
13.0	15.6	9927	47167342	0.02	472973	2.10
12.0	14.4	23111	Ilimitado	0.00	835302	2.77
11.0	13.2	43121	Ilimitado	0.00	1641996	2.63
10.0	12.0	87327	Ilimitado	0.00	3897329	2.24
9.0	10.8	130370	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
8.0	9.6	204126	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
7.0	8.4	283775	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
6.0	7.2	453466	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
5.0	6.0	1025979	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.39		11.38

EJES DOBLES

11. Tensión Equivalente : 9.54 13. Factor de Erosión: 2.52
 12. Factor de Relación de Tensiones: 0.212

26.0	31.2	9539	Ilimitado	0.00	221441	4.31
24.0	28.8	30712	Ilimitado	0.00	373227	8.23
22.0	26.4	82054	Ilimitado	0.00	681937	12.03
20.0	24.0	248875	Ilimitado	0.00	1400081	17.78
18.0	21.6	329455	Ilimitado	0.00	3542823	9.30
16.0	19.2	477043	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
14.0	16.8	591049	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
12.0	14.4	701022	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
10.0	12.0	872342	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
8.0	9.6	1076468	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.00		51.64

EJES TRIPLES

14. Tensión Equivalente : 7.44 16. Factor de Erosión: 2.54
 15. Factor de Relación de Tensiones: 0.165

36.0	43.2	2172	Ilimitado	0.00	307590	0.71
33.0	39.6	19854	Ilimitado	0.00	554782	3.58
30.0	36.0	44051	Ilimitado	0.00	1114030	3.95
27.0	32.4	96944	Ilimitado	0.00	2685652	3.61
24.0	28.8	242671	Ilimitado	0.00	9632665	2.52
21.0	25.2	447029	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
18.0	21.6	611911	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
15.0	18.0	718705	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
12.0	14.4	889714	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
9.0	10.8	1057156	Ilimitado	0.00	Ilimitado	0.00
Suma Parcial				0.00		14.37

Consumo de Fatiga: 0.39 % Daño por Erosión: 77.39 %

Tabla 5.a. Tensión Equivalente - Sin Banquina de Hormigón
Ejes Simples (S) - Ejes Tandem (D) - Ejes Tridem (T)

Espesor de losa (cm)	k de subrasante - Subbase, (kg/cm ² /cm)																											
	1.39				2.77				4.16				5.54				8.31				13.85				19.39			
	Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje	
12	46.1	39.0	29.3	40.7	33.2	25.1	37.7	30.4	23.6	35.7	28.7	22.8	33.0	26.8	22.1	29.7	24.8	21.4	27.6	23.8	21.2							
13	41.1	35.4	26.6	36.3	29.9	22.4	33.7	27.3	20.8	31.9	25.7	20.0	29.5	23.8	19.1	26.7	21.9	18.4	24.8	20.9	18.2							
14	36.9	32.4	24.4	32.6	27.2	20.4	30.2	24.8	18.7	28.7	23.2	17.8	26.6	21.4	16.8	24.1	19.5	16.1	22.5	18.5	15.8							
15	33.5	29.9	22.6	29.6	25.0	18.8	27.5	22.7	17.1	26.1	21.3	16.1	24.2	19.5	15.1	21.9	17.7	14.4	20.5	16.8	14.0							
16	30.7	27.8	21.1	27.1	23.2	17.4	25.2	21.0	15.7	23.9	19.6	14.8	22.1	17.9	13.7	20.1	16.2	12.9	18.8	15.3	12.5							
17	28.2	25.9	19.7	24.8	21.6	16.2	23.1	19.5	14.6	21.9	18.2	13.7	20.3	16.6	12.6	18.5	14.9	11.7	17.3	14.0	11.3							
18	26.0	24.2	18.5	22.9	20.1	15.2	21.3	18.2	13.6	20.2	16.9	12.7	18.8	15.4	11.6	17.0	13.8	10.7	16.0	12.9	10.2							
19	24.0	22.8	17.4	21.2	18.9	14.3	19.7	17.0	12.8	18.7	15.8	11.9	17.4	14.3	10.8	15.8	12.8	9.8	14.8	11.9	9.3							
20	22.4	21.5	16.5	19.7	17.9	13.5	18.4	16.0	12.1	17.4	14.9	11.2	16.2	13.5	10.1	14.8	12.0	9.1	13.8	11.2	8.7							
21	20.9	20.4	15.6	18.5	16.9	12.8	17.2	15.1	11.4	16.3	14.1	10.6	15.1	12.7	9.5	13.8	11.3	8.5	12.9	10.5	8.0							
22	19.6	19.4	14.8	17.3	16.0	12.2	16.1	14.3	10.9	15.2	13.3	10.0	14.1	12.0	9.0	12.9	10.6	8.0	12.1	9.8	7.5							
23	18.4	18.5	14.0	16.2	15.2	11.6	15.1	13.6	10.4	14.3	12.7	9.5	13.3	11.4	8.5	12.1	10.1	7.5	11.4	9.3	7.0							
24	17.4	17.8	13.3	15.3	14.5	11.1	14.2	13.0	9.9	13.5	12.0	9.1	12.5	10.8	8.1	11.4	9.5	7.2	10.7	8.8	6.6							
25	16.4	16.8	12.5	14.4	13.8	10.6	13.4	12.4	9.5	12.7	11.5	8.7	11.8	10.3	7.8	10.8	9.0	6.8	10.1	8.4	6.3							
26	15.5	16.1	11.9	13.6	13.2	10.1	12.7	11.9	9.1	12.1	11.0	8.4	11.2	9.9	7.4	10.2	8.6	6.5	9.6	8.0	6.0							
27	14.8	15.4	11.3	12.9	12.7	9.7	12.0	11.4	8.7	11.4	10.5	8.0	10.6	9.4	7.2	9.7	8.3	6.2	9.1	7.6	5.7							
28	14.0	14.8	10.7	12.3	12.2	9.3	11.4	10.9	8.4	10.8	10.0	7.7	10.1	9.1	6.9	9.2	7.9	6.0	8.6	7.3	5.5							
29	13.4	14.3	10.1	11.7	11.7	8.9	10.9	10.5	8.0	10.3	9.7	7.4	9.6	8.7	6.8	8.7	7.8	5.7	8.2	7.0	5.3							

Tabla 5.b. Tensión Equivalente - Con Banquina de Hormigón
Ejes Simples (S) - Ejes Tandem (D) - Ejes Tridem (T)

Espesor de losa (cm)	k de subrasante - Subbase, (kg/cm ² /cm)																											
	1.39				2.77				4.16				5.54				8.31				13.85				19.39			
	Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje	
12	36.2	30.6	24.2	31.7	26.5	21.6	29.4	24.6	20.5	27.9	23.5	20.0	25.9	22.3	19.4	23.6	21.1	19.0	22.2	20.7	18.9							
13	32.5	27.7	21.7	28.5	23.9	19.2	26.5	22.1	18.1	25.1	21.1	17.6	23.3	19.8	17.0	21.3	18.7	16.6	20.1	18.2	16.4							
14	29.3	25.3	19.6	25.8	21.7	17.3	24.0	20.0	16.2	22.7	19.0	15.6	21.2	17.8	15.0	19.4	16.7	14.6	18.3	16.2	14.4							
15	26.8	23.3	17.9	23.6	19.9	15.7	21.9	18.3	14.7	20.8	17.4	14.2	19.4	16.2	13.5	17.8	15.2	13.0	16.8	14.7	12.9							
16	24.6	21.6	16.5	21.6	18.4	14.4	20.1	16.9	13.5	19.1	16.0	12.9	17.9	14.9	12.3	16.4	13.9	11.8	15.5	13.3	11.6							
17	22.6	20.1	15.3	19.9	17.1	13.3	18.6	15.6	12.4	17.6	14.8	11.9	16.5	13.8	11.2	15.1	12.7	10.7	14.4	12.2	10.5							
18	20.9	18.8	14.1	18.4	16.0	12.3	17.2	14.6	11.4	16.4	13.7	10.9	15.2	12.8	10.3	14.1	11.8	9.8	13.3	11.2	9.5							
19	19.4	17.6	13.2	17.2	14.9	11.4	16.0	13.6	10.7	15.2	12.9	10.1	14.2	11.9	9.5	13.1	10.9	9.0	12.4	10.5	8.8							
20	18.1	16.6	12.4	16.0	14.1	10.7	14.9	12.8	9.9	14.2	12.1	9.4	13.3	11.1	8.9	12.2	10.2	8.4	11.6	9.7	8.1							
21	17.0	15.7	11.6	15.0	13.3	10.1	14.0	12.1	9.3	13.3	11.4	8.8	12.5	10.5	8.3	11.5	9.6	7.8	10.9	9.1	7.5							
22	15.9	14.9	10.9	14.1	12.6	9.5	13.1	11.4	8.8	12.5	10.8	8.3	11.7	9.9	7.8	10.8	9.0	7.3	10.3	8.6	7.0							
23	15.0	14.1	10.3	13.3	11.9	8.9	12.4	10.8	8.3	11.8	10.2	7.8	11.0	9.4	7.3	10.2	8.5	6.8	9.7	8.1	6.6							
24	14.2	13.5	9.7	12.5	11.3	8.5	11.6	10.3	7.9	11.1	9.7	7.4	10.4	8.9	6.9	9.6	8.1	6.5	9.1	7.7	6.2							
25	13.4	12.8	9.2	11.8	10.8	8.1	11.0	9.8	7.5	10.5	9.3	7.1	9.9	8.5	6.6	9.1	7.7	6.1	8.7	7.3	5.8							
26	12.7	12.3	8.7	11.2	10.4	7.6	10.5	9.4	7.1	10.0	8.8	6.7	9.3	8.1	6.2	8.7	7.3	5.7	8.2	6.9	5.5							
27	12.1	11.8	8.2	10.7	9.9	7.3	10.0	9.0	6.7	9.5	8.4	6.4	8.9	7.7	6.0	8.2	7.0	5.5	7.8	6.6	5.3							
28	11.5	11.3	7.8	10.1	9.5	6.9	9.5	8.6	6.5	9.1	8.1	6.1	8.4	7.4	5.7	7.9	6.7	5.2	7.4	6.3	5.0							
29	11.0	10.9	7.4	9.7	9.1	6.6	9.0	8.3	6.1	8.6	7.7	5.8	8.0	7.1	5.4	7.5	6.4	5.0	7.1	6.0	4.8							

**Tabla 6.a. Factor de Erosión - Con Pasadores, Sin banquina de hormigón
Ejes Simples (S) - Ejes Tandem (D) - Ejes Tridem (T)**

Espesor de losa (cm)	k de subrasante - Subbase, (kg/cm ² /cm)																							
	1.39				2.77				5.54				8.31				13.85				19.39			
	Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje	
12	S	3.53	3.65	3.74	T	3.51	3.59	3.64	T	3.50	3.55	3.57	T	3.49	3.52	3.46	S	3.48	3.49	3.46	T	3.46	3.47	3.40
13	S	3.42	3.55	3.66	T	3.40	3.49	3.56	T	3.39	3.45	3.48	T	3.38	3.42	3.37	S	3.37	3.39	3.36	T	3.38	3.37	3.32
14	S	3.33	3.47	3.59	T	3.31	3.41	3.49	T	3.29	3.36	3.40	T	3.28	3.33	3.27	S	3.27	3.30	3.26	T	3.30	3.28	3.25
15	S	3.24	3.40	3.53	T	3.21	3.33	3.42	T	3.20	3.28	3.33	T	3.19	3.25	3.17	S	3.17	3.22	3.16	T	3.23	3.19	3.18
16	S	3.15	3.33	3.47	T	3.13	3.26	3.36	T	3.11	3.20	3.26	T	3.10	3.17	3.09	S	3.09	3.14	3.07	T	3.16	3.11	3.11
17	S	3.08	3.26	3.41	T	3.05	3.19	3.30	T	3.03	3.13	3.20	T	3.02	3.10	3.01	S	3.01	3.07	3.00	T	3.09	3.04	3.05
18	S	3.00	3.20	3.36	T	2.98	3.13	3.25	T	2.95	3.07	3.15	T	2.94	3.04	2.93	S	2.93	3.00	2.92	T	3.03	2.97	2.99
19	S	2.93	3.14	3.31	T	2.91	3.06	3.20	T	2.88	3.00	3.09	T	2.87	2.97	2.86	S	2.86	2.93	2.84	T	2.97	2.90	2.93
20	S	2.87	3.09	3.27	T	2.84	3.01	3.16	T	2.82	2.95	3.05	T	2.81	2.91	2.79	S	2.79	2.87	2.78	T	2.92	2.84	2.88
21	S	2.81	3.04	3.23	T	2.78	2.96	3.11	T	2.76	2.89	3.00	T	2.75	2.85	2.73	S	2.73	2.81	2.72	T	2.87	2.78	2.82
22	S	2.75	2.99	3.18	T	2.72	2.91	3.07	T	2.70	2.84	2.95	T	2.68	2.80	2.67	S	2.67	2.76	2.66	T	2.82	2.73	2.77
23	S	2.69	2.95	3.15	T	2.66	2.86	3.03	T	2.64	2.79	2.91	T	2.62	2.75	2.58	S	2.61	2.70	2.57	T	2.87	2.67	2.72
24	S	2.64	2.91	3.11	T	2.61	2.82	3.00	T	2.59	2.75	2.88	T	2.57	2.71	2.52	S	2.56	2.66	2.49	T	2.82	2.63	2.69
25	S	2.58	2.87	3.08	T	2.58	2.78	2.96	T	2.53	2.70	2.84	T	2.52	2.66	2.48	S	2.50	2.61	2.49	T	2.87	2.58	2.65
26	S	2.53	2.83	3.04	T	2.51	2.74	2.92	T	2.48	2.66	2.81	T	2.47	2.62	2.44	S	2.45	2.57	2.40	T	2.86	2.54	2.61
27	S	2.48	2.80	3.01	T	2.46	2.70	2.89	T	2.43	2.62	2.77	T	2.42	2.58	2.40	S	2.40	2.53	2.39	T	2.83	2.49	2.57
28	S	2.44	2.76	2.98	T	2.42	2.67	2.86	T	2.39	2.56	2.74	T	2.38	2.54	2.36	S	2.36	2.49	2.35	T	2.89	2.45	2.54
29	S	2.39	2.73	2.95	T	2.37	2.63	2.83	T	2.34	2.55	2.71	T	2.33	2.50	2.31	S	2.31	2.45	2.30	T	2.90	2.41	2.51

**Tabla 6.b. Factor de Erosión - Trabazón entre Agregados, Sin banquina de hormigón
Ejes Simples (S) - Ejes Tandem (D) - Ejes Tridem (T)**

Espesor de losa (cm)	k de subrasante - Subbase, (kg/cm ² /cm)																							
	1.39				2.77				5.54				8.31				13.85				19.39			
	Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje		Tipo de Eje	
12	S	3.73	3.87	3.91	T	3.70	3.78	3.81	T	3.67	3.70	3.72	T	3.65	3.67	3.66	S	3.62	3.62	3.58	T	3.58	3.59	3.52
13	S	3.63	3.79	3.83	T	3.60	3.70	3.73	T	3.57	3.61	3.64	T	3.55	3.57	3.58	S	3.52	3.52	3.49	T	3.50	3.49	3.44
14	S	3.54	3.72	3.76	T	3.51	3.62	3.66	T	3.48	3.53	3.56	T	3.46	3.49	3.51	S	3.43	3.44	3.41	T	3.43	3.41	3.37
15	S	3.46	3.66	3.70	T	3.42	3.55	3.60	T	3.39	3.46	3.50	T	3.37	3.42	3.44	S	3.34	3.36	3.32	T	3.37	3.32	3.31
16	S	3.38	3.59	3.64	T	3.34	3.49	3.53	T	3.30	3.39	3.43	T	3.29	3.35	3.37	S	3.26	3.28	3.24	T	3.30	3.24	3.24
17	S	3.31	3.53	3.58	T	3.27	3.43	3.47	T	3.23	3.33	3.37	T	3.21	3.28	3.31	S	3.19	3.22	3.17	T	3.24	3.17	3.16
18	S	3.25	3.48	3.53	T	3.20	3.38	3.42	T	3.16	3.28	3.32	T	3.14	3.23	3.26	S	3.11	3.16	3.09	T	3.19	3.09	3.13
19	S	3.18	3.43	3.48	T	3.13	3.32	3.37	T	3.09	3.22	3.26	T	3.07	3.17	3.20	S	3.04	3.10	3.02	T	3.13	3.06	3.08
20	S	3.13	3.39	3.44	T	3.07	3.28	3.33	T	3.03	3.18	3.22	T	3.01	3.12	3.16	S	2.98	3.05	2.96	T	3.09	2.96	3.03
21	S	3.07	3.34	3.39	T	3.01	3.23	3.28	T	2.97	3.13	3.17	T	2.95	3.07	3.11	S	2.92	3.00	2.90	T	3.04	2.90	2.98
22	S	3.02	3.30	3.35	T	2.96	3.19	3.23	T	2.91	3.08	3.13	T	2.89	3.02	3.07	S	2.86	2.95	2.86	T	2.99	2.84	2.94
23	S	2.97	3.26	3.31	T	2.90	3.15	3.19	T	2.85	3.04	3.08	T	2.83	2.96	3.02	S	2.80	2.91	2.78	T	2.94	2.78	2.89
24	S	2.93	3.23	3.28	T	2.86	3.12	3.16	T	2.81	3.01	3.05	T	2.78	2.95	2.99	S	2.76	2.87	2.74	T	2.91	2.74	2.86
25	S	2.88	3.19	3.24	T	2.81	3.08	3.12	T	2.76	2.97	3.01	T	2.73	2.91	2.95	S	2.70	2.83	2.68	T	2.87	2.68	2.82
26	S	2.84	3.16	3.20	T	2.77	3.04	3.09	T	2.71	2.93	2.98	T	2.68	2.87	2.91	S	2.65	2.79	2.63	T	2.83	2.63	2.78
27	S	2.80	3.13	3.17	T	2.73	3.01	3.05	T	2.67	2.90	2.94	T	2.64	2.83	2.88	S	2.61	2.75	2.58	T	2.80	2.58	2.75
28	S	2.77	3.10	3.14	T	2.69	2.98	3.02	T	2.63	2.86	2.91	T	2.60	2.80	2.84	S	2.57	2.72	2.54	T	2.77	2.54	2.71
29	S	2.73	3.07	3.11	T	2.65	2.95	2.99	T	2.59	2.83	2.88	T	2.56	2.77	2.81	S	2.52	2.69	2.50	T	2.73	2.50	2.68

**Tabla 7.a. Factor de Erosión - Con Pasadores, Con Banquina de Hormigón
Ejes Simples (S) - Ejes Tandem (D) - Ejes Tridem (T)**

Espesor de losa (cm)	k de subrasante - Subbase, (kg/cm ² /cm)																	
	1.39			2.77			5.54			8.31			13.85			19.39		
	Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje		
	S	D	T	S	D	T	S	D	T	S	D	T	S	D	T	S	D	T
12	3.08	3.15	3.20	3.04	3.04	3.06	3.00	2.95	2.95	2.98	2.91	2.90	2.95	2.87	2.86	2.92	2.85	2.82
13	2.98	3.07	3.14	2.94	2.96	2.99	2.90	2.87	2.87	2.87	2.82	2.81	2.87	2.82	2.76	2.82	2.74	2.72
14	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.79	2.74	2.68	2.73	2.65	2.64
15	2.81	2.95	3.04	2.77	2.83	2.88	2.72	2.73	2.74	2.70	2.67	2.68	2.70	2.67	2.60	2.64	2.58	2.56
16	2.74	2.89	2.99	2.69	2.78	2.84	2.65	2.68	2.69	2.62	2.60	2.62	2.62	2.59	2.53	2.56	2.49	2.49
17	2.67	2.83	2.95	2.62	2.72	2.80	2.58	2.60	2.65	2.55	2.54	2.57	2.52	2.47	2.47	2.49	2.42	2.42
18	2.60	2.78	2.91	2.55	2.67	2.75	2.51	2.55	2.60	2.48	2.49	2.52	2.45	2.41	2.42	2.42	2.37	2.36
19	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
20	2.48	2.69	2.84	2.43	2.58	2.68	2.38	2.46	2.52	2.35	2.40	2.43	2.32	2.32	2.33	2.29	2.26	2.27
21	2.42	2.65	2.81	2.37	2.53	2.65	2.32	2.41	2.49	2.29	2.35	2.40	2.28	2.27	2.29	2.23	2.21	2.22
22	2.37	2.60	2.78	2.32	2.49	2.62	2.27	2.37	2.46	2.24	2.30	2.37	2.20	2.22	2.26	2.18	2.16	2.18
23	2.31	2.56	2.75	2.26	2.45	2.59	2.21	2.33	2.43	2.18	2.26	2.34	2.15	2.18	2.22	2.12	2.12	2.15
24	2.27	2.53	2.71	2.22	2.42	2.55	2.17	2.30	2.39	2.14	2.23	2.30	2.10	2.15	2.19	2.08	2.09	2.11
25	2.22	2.49	2.68	2.17	2.38	2.52	2.12	2.26	2.36	2.09	2.19	2.27	2.05	2.11	2.16	2.03	2.05	2.08
26	2.18	2.45	2.66	2.12	2.34	2.50	2.07	2.23	2.34	2.04	2.16	2.25	2.00	2.07	2.13	1.98	2.01	2.06
27	2.14	2.42	2.63	2.08	2.31	2.47	2.03	2.19	2.31	1.99	2.13	2.22	1.96	2.04	2.10	1.93	1.98	2.03
28	2.10	2.38	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
29	2.06	2.36	2.57	2.00	2.25	2.42	1.94	2.13	2.26	1.91	2.06	2.17	1.88	1.98	2.05	1.85	1.92	1.97

**Tabla 7.b. Factor de Erosión - Trabazón entre Agregados, Con Banquina de Hormigón
Ejes Simples (S) - Ejes Tandem (D) - Ejes Tridem (T)**

Espesor de losa (cm)	k de subrasante - Subbase, (kg/cm ² /cm)																	
	1.39			2.77			5.54			8.31			13.85			19.39		
	Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje			Tipo de Eje		
	S	D	T	S	D	T	S	D	T	S	D	T	S	D	T	S	D	T
12	3.27	3.35	3.36	3.23	3.24	3.24	3.19	3.15	3.14	3.17	3.11	3.09	3.17	3.11	3.07	3.10	3.04	2.99
13	3.18	3.28	3.31	3.13	3.16	3.17	3.09	3.07	3.06	3.07	3.03	3.01	3.07	3.03	2.98	3.04	2.94	2.91
14	3.10	3.22	3.26	3.05	3.10	3.11	3.01	3.00	3.00	2.99	2.95	2.94	2.99	2.95	2.90	2.96	2.86	2.83
15	3.02	3.16	3.21	2.97	3.04	3.06	2.92	2.94	2.94	2.90	2.89	2.88	2.88	2.83	2.83	2.85	2.79	2.76
16	2.95	3.11	3.16	2.90	2.98	3.01	2.85	2.88	2.88	2.83	2.82	2.82	2.83	2.76	2.75	2.78	2.72	2.70
17	2.89	3.06	3.12	2.83	2.94	2.97	2.78	2.82	2.84	2.76	2.76	2.77	2.73	2.70	2.69	2.71	2.65	2.64
18	2.82	3.01	3.08	2.76	2.89	2.93	2.72	2.77	2.79	2.69	2.71	2.72	2.67	2.65	2.64	2.64	2.60	2.59
19	2.76	2.97	3.05	2.70	2.84	2.89	2.65	2.72	2.75	2.62	2.66	2.67	2.60	2.59	2.59	2.57	2.54	2.54
20	2.71	2.93	3.02	2.65	2.80	2.85	2.59	2.68	2.71	2.57	2.62	2.63	2.54	2.55	2.55	2.52	2.50	2.50
21	2.66	2.90	2.99	2.59	2.76	2.82	2.54	2.64	2.67	2.51	2.58	2.60	2.48	2.50	2.51	2.46	2.45	2.45
22	2.61	2.86	2.96	2.54	2.73	2.79	2.49	2.60	2.64	2.46	2.54	2.56	2.43	2.46	2.47	2.41	2.41	2.41
23	2.56	2.83	2.94	2.49	2.69	2.77	2.43	2.57	2.61	2.41	2.50	2.53	2.38	2.42	2.44	2.35	2.37	2.38
24	2.52	2.79	2.91	2.45	2.66	2.73	2.39	2.53	2.58	2.37	2.47	2.49	2.34	2.39	2.40	2.31	2.34	2.34
25	2.48	2.76	2.89	2.41	2.62	2.71	2.35	2.50	2.55	2.32	2.43	2.47	2.28	2.35	2.37	2.26	2.30	2.31
26	2.44	2.74	2.87	2.36	2.60	2.69	2.30	2.47	2.53	2.27	2.40	2.44	2.22	2.32	2.34	2.22	2.26	2.28
27	2.40	2.71	2.84	2.32	2.57	2.66	2.26	2.44	2.50	2.23	2.37	2.41	2.20	2.29	2.31	2.18	2.23	2.25
28	2.36	2.68	2.83	2.28	2.54	2.65	2.22	2.41	2.48	2.19	2.34	2.39	2.16	2.26	2.29	2.14	2.20	2.22
29	2.33	2.65	2.80	2.25	2.51	2.62	2.18	2.38	2.45	2.15	2.31	2.36	2.12	2.23	2.26	2.10	2.17	2.19

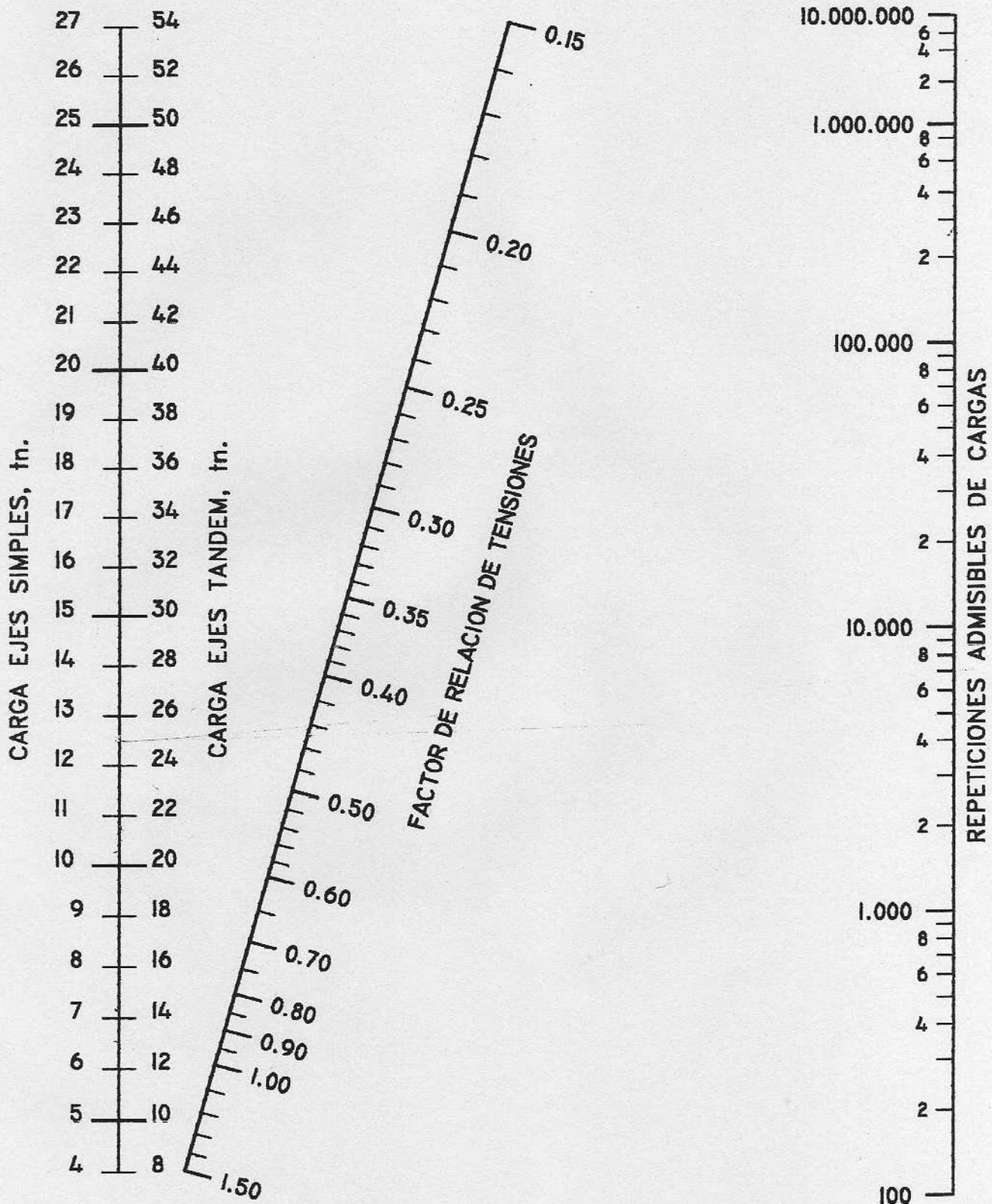


FIGURA 5. ANALISIS DE FATIGA

REPETICIONES ADMISIBLES DE CARGAS BASADO EN EL FACTOR DE RELACION DE TENSIONES
(CON Y SIN BANQUINA DE HORMIGON)

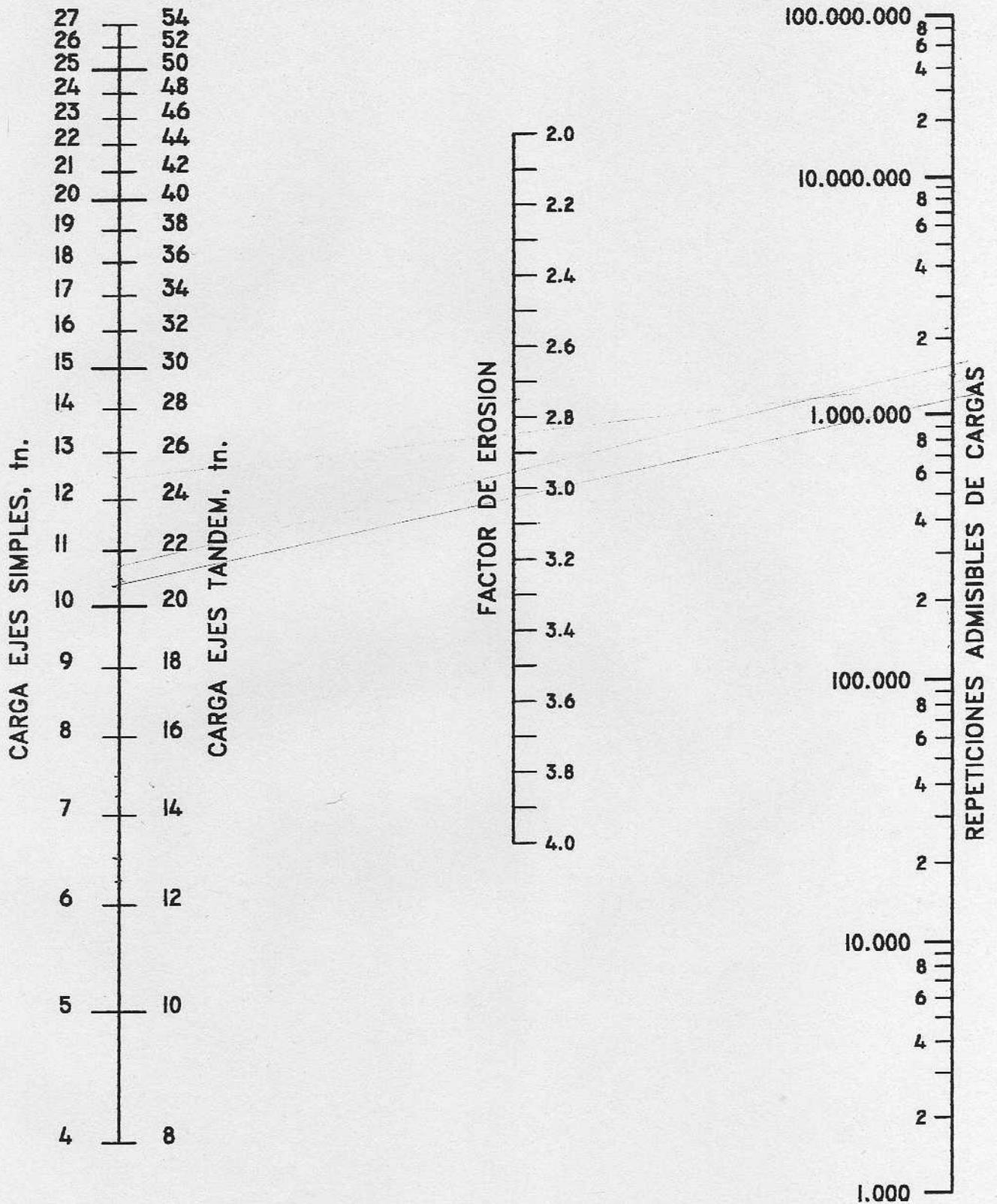


FIGURA 6A. ANALISIS DE EROSION

REPETICIONES ADMISIBLES DE CARGAS BASADO EN EL FACTOR DE EROSION
(SIN BANQUINA DE HORMIGON)

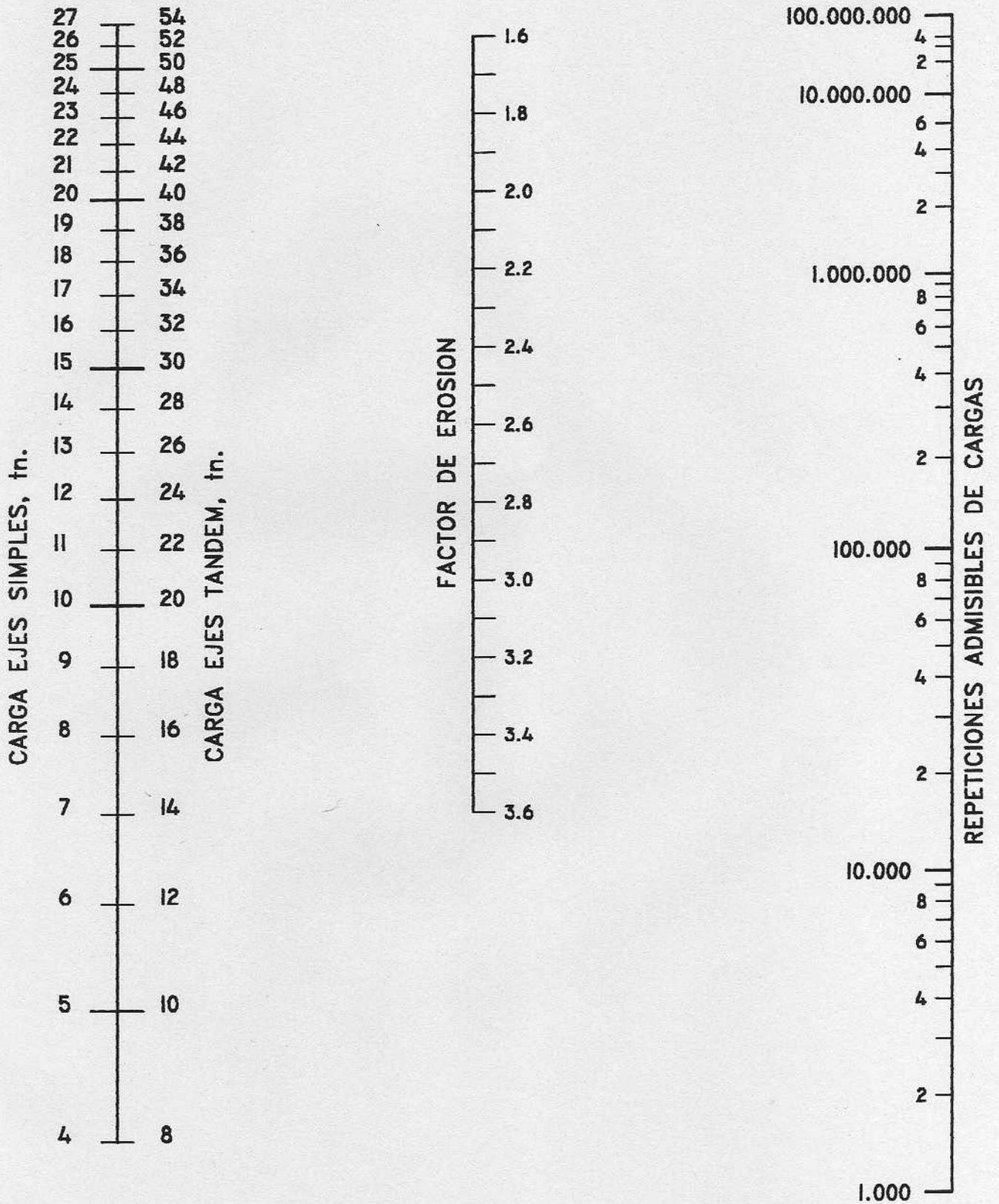


FIGURA 6B. ANALISIS DE EROSION

REPETICIONES ADMISIBLES DE CARGAS BASADO EN EL FACTOR DE EROSION
(CON BANQUINA DE HORMIGON)

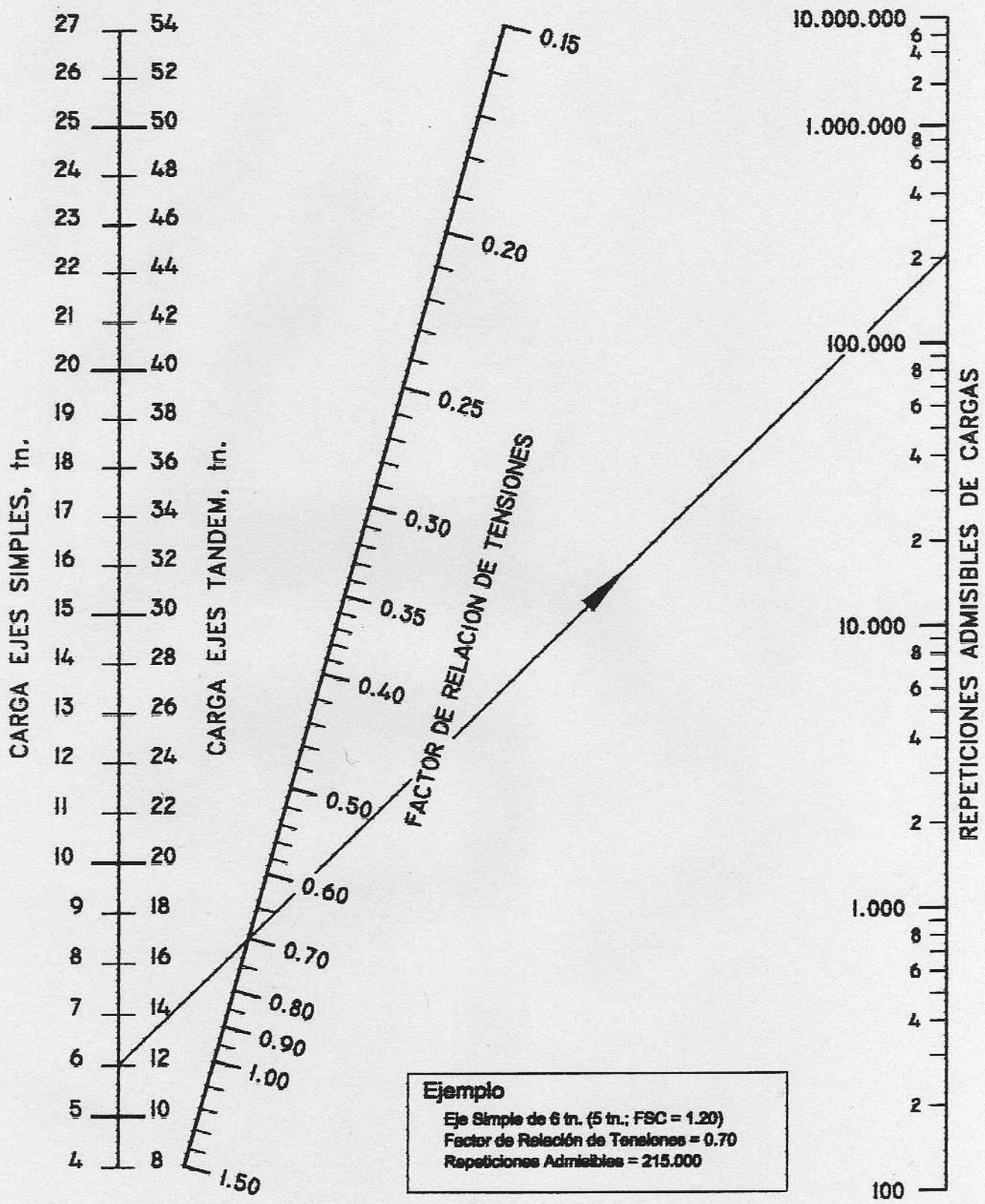
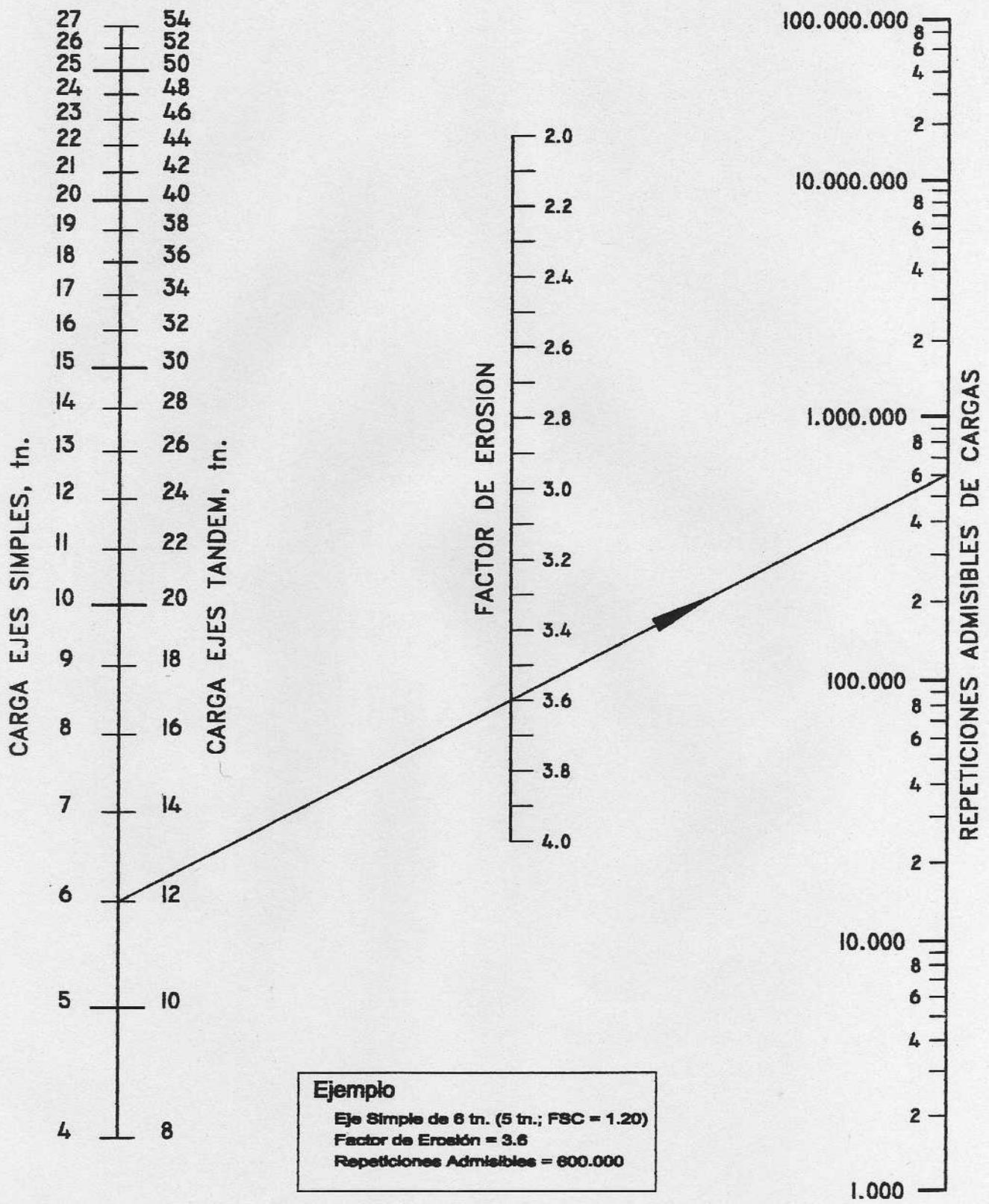


FIGURA 5. ANALISIS DE FATIGA

REPETICIONES ADMISIBLES DE CARGAS BASADO EN EL FACTOR DE RELACION DE TENSIONES
(CON Y SIN BANQUINA DE HORMIGON)



Ejemplo
 Eje Simple de 6 tn. (5 tn.; FSC = 1.20)
 Factor de Erosión = 3.6
 Repeticiones Admisibles = 800.000

FIGURA 6A. ANALISIS DE EROSION
 REPETICIONES ADMISIBLES DE CARGAS BASADO EN EL FACTOR DE EROSION
 (SIN BANQUINA DE HORMIGON)

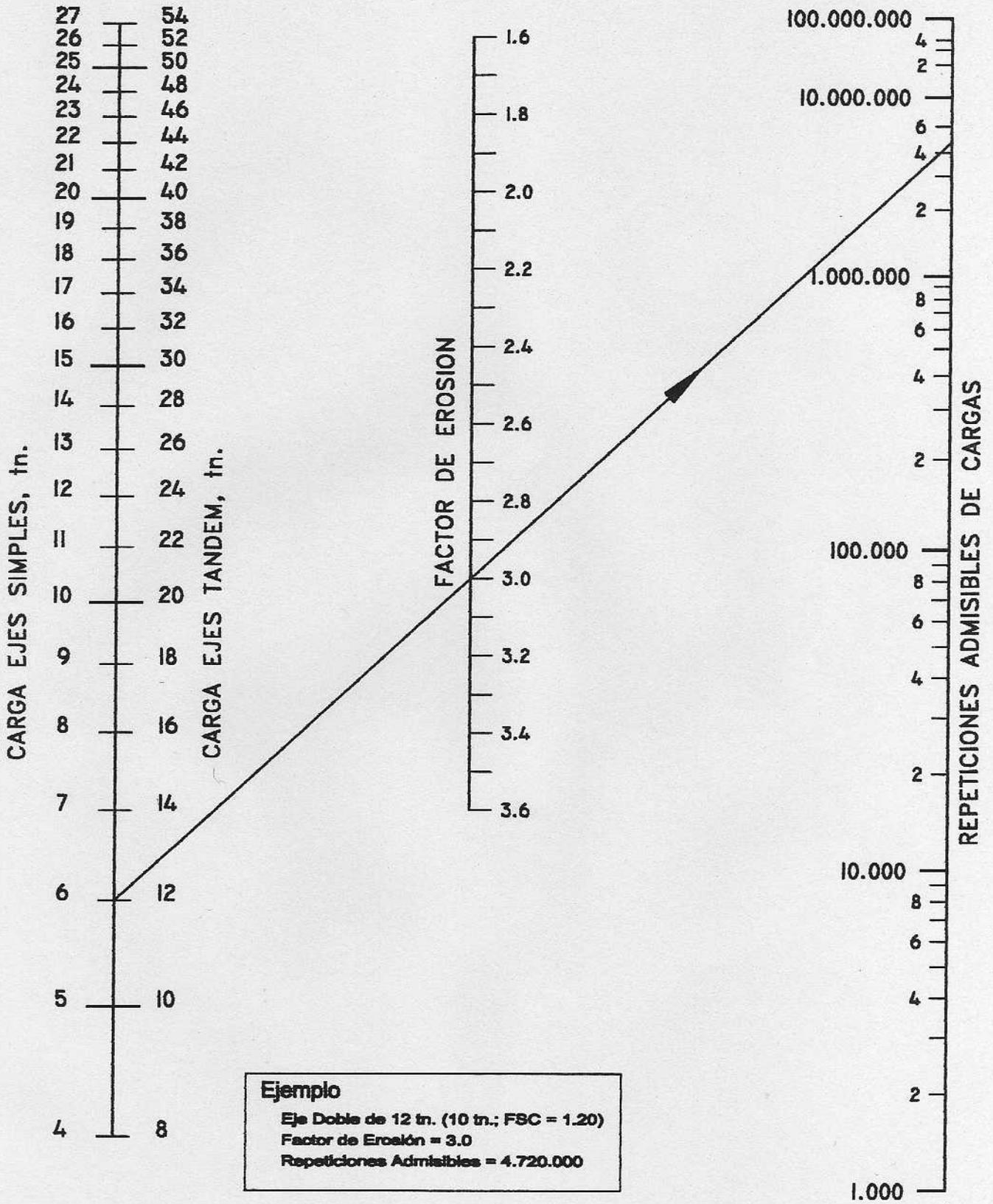


FIGURA 6B. ANALISIS DE EROSION

REPETICIONES ADMISIBLES DE CARGAS BASADO EN EL FACTOR DE EROSION
 (CON BANQUINA DE HORMIGON)

PAVIMENTOS DE HORMIGON

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

INTRODUCCION

Las características del hormigón como material de construcción para pavimentos, conduce a la inevitable formación de fisuras a corta edad (en relación al período de diseño), que forman paños de dimensiones similares, aunque variables según las características y condiciones de cada pavimento.

El origen de estas fisuras está dado inicialmente por la disminución del volumen del material (pérdida de agua), causa de la aparición de las primeras fisuras transversales. Posteriormente, la tendencia al curvado de los paños (previamente formados) debido al alabeo por gradientes térmicos y de humedad, y la restricción del peso propio a este movimiento, generará fisuras intermedias transversales. Al alabeo restringido por peso propio se suma luego la carga del tránsito, provocando fisuras transversales intermedias y fisuras longitudinales (una o más, dependiendo del ancho del pavimento).

Por medio de un adecuado diseño y ejecución de juntas transversales y longitudinales, se "copiará" el patrón de fisuración que naturalmente desarrolla el pavimento (con la ventaja del menor costo para la conservación) e incorporar en las mismas mecanismos apropiados para la disminución de deformaciones y tensiones en las losas.

OBJETIVOS

Las principales finalidades del diseño y construcción de juntas son:

- Controlar la fisuración transversal y longitudinal
- Proporcionar una transferencia de carga adecuada
- Proveer el espacio necesario para el sellado de las mismas
- Controlar el movimiento de las losas

FUNDAMENTOS TEORICO EXPERIMENTALES

El desarrollo de diseño de juntas se efectuó a partir de:

- Estudios teóricos sobre el comportamiento de losas de hormigón
- Pruebas de laboratorio en modelos y a escala natural
- Tramos experimentales con tránsito controlado
- Evaluación del comportamiento de diseños experimentales de juntas
- Evaluaciones de comportamiento a largo plazo de rutas en servicio

FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LA JUNTA

- | | |
|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Espesor de la losa | <input checked="" type="checkbox"/> Materiales de sellado |
| <input checked="" type="checkbox"/> Condiciones ambientales | <input checked="" type="checkbox"/> Materiales constructivos |
| <input checked="" type="checkbox"/> Tránsito | <input checked="" type="checkbox"/> Antecedentes locales |
| <input checked="" type="checkbox"/> Tipo de Subbase | |

DESARROLLO NATURAL DE FISURAS

El diseño de juntas tiene por finalidad la inducción de fisuras en zonas programadas, con una geometría y separación similar a la que naturalmente se desarrollaría en un pavimento de hormigón, pero con ventajas técnicas y económicas en las operaciones de sellado y mantenimiento de las mismas.

El origen y secuencia natural de fisuración es la siguiente:

1. Contracción

La disminución de volumen de la masa de hormigón provocará un pequeño acortamiento en la dirección longitudinal. Las causas que generan la contracción están dadas por:

- a. Pérdida de agua
Puede ser demorada a través de adecuadas condiciones de curado.
- b. Menor temperatura de la 1^{er} noche posterior a la colocación
Es inevitable, cualquiera sea la época constructiva. Además, la elevada relación superficie / volumen no ayuda a la conservación del calor de hidratación.

La contracción de la masa induce tensiones de tracción en el hormigón debido a la fricción desarrollada en el plano de contacto suelo hormigón. La acumulación de tensiones tangenciales en la losa supera a la resistencia (tracción) de la sección hormigón, produciendo fisuras transversales.

El espaciamiento entre las fisuras iniciales varía entre 12 y 45 m, dependiendo de:

- ✓ Fricción de contacto con subrasante o subbase
- ✓ Espesor de la losa
- ✓ Características del hormigón
- ✓ Condiciones climáticas durante y después de la colocación

2. Alabeo por gradientes de temperatura y humedad

La superficie del pavimento está sujeta a variaciones diarias de temperatura y humedad, de mayor amplitud que la parte inferior de la losa. Esos gradientes provocan el alabeo de los paños (diferente longitud de fibras extremas). Una vez que el hormigón ha endurecido, el peso propio restringe la libre ondulación e induce esfuerzos de flexión que superan la resistencia a la tracción del material y provocan fisuras transversales intermedias (aproximadamente a la mitad de las de contracción).

La fisuración transversal intermedia continúa debido al alabeo restringido por peso propio más la carga de tránsito, hasta una separación que va de 3 a los 6 m, dependiente del espesor de losa, características del hormigón, rigidez de la capa de apoyo y condiciones climáticas. Las mismas causas antes citadas formarán una fisura longitudinal, con traza aproximada al centro de la calzada.

TRANSFERENCIA DE CARGA

Es la capacidad de una junta para transmitir parte de la carga aplicada en una losa a la losa contigua. Puede ser cuantificada en función de las deflexiones de las losas a ambos lados de la junta, cuando se aplica una carga sobre una de las losas y al borde de la junta.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

Los factores que contribuyen a mejorar la eficiencia en la junta son:

- ✓ Trabazón entre agregados
- ✓ Rigidez de la subbase
- ✓ Pasadores

Eficiencia

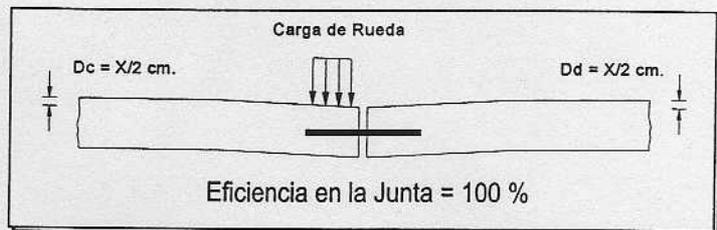
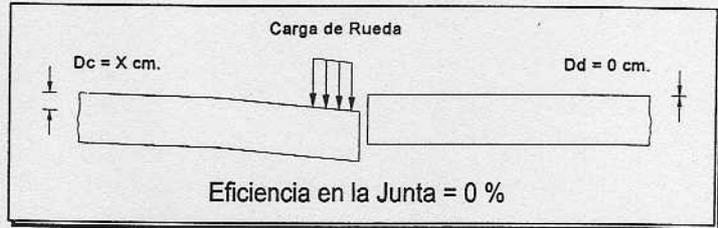
$$E = \frac{2 * D_d}{D_d + D_c} * 100$$

E: Eficiencia (%)

D_d : Deflexión losa descargada (cm.)

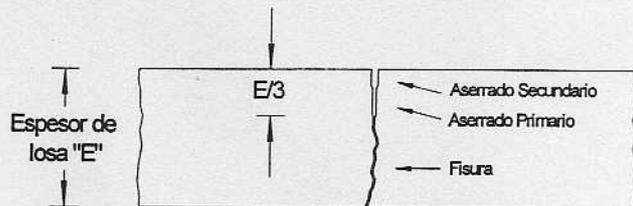
D_c : Deflexión losa cargada (cm.)

- ✓ E = 0 0% de traspaso de carga
- ✓ E = 100 50% de traspaso de carga



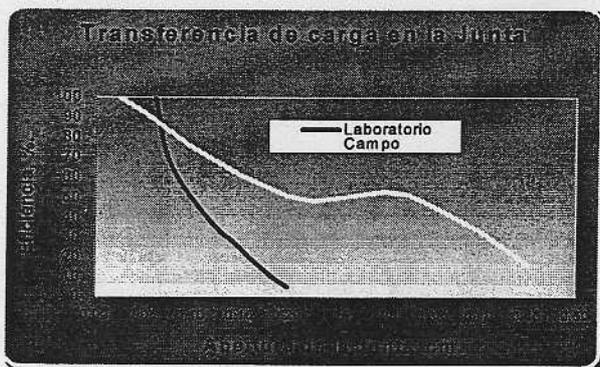
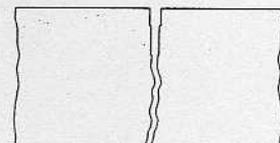
1. Trabazón entre agregados

La transmisión de carga se efectúa a lo largo de las caras de la fisura en la junta (por debajo del aserrado). Su desempeño es aceptable para tránsito liviano (80 a 100 camiones/día, variable según tipo de apoyo). Otros resultados indican que se requieren de 4 a 5 millones de ejes simples equivalentes (8172 kg) para producir una falla objetable.



Adecuada transferencia

Escasa o nula transferencia



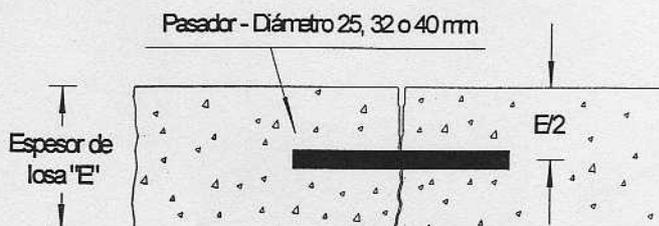
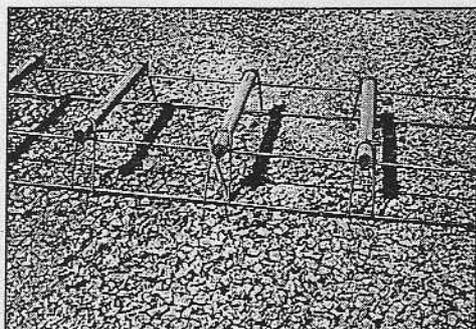
Para su optimización se recomienda:

- ✓ Menor separación entre juntas.
- ✓ Utilización de agregados triturados $TM \geq 25 \text{ mm}$

2. Pasadores

Son barras lisas colocadas en la junta transversal para transferir cargas. **No deben restringir el movimiento horizontal de las losas.** Colaboran en la disminución de: deflexión, potencial de falla, efecto de bombeo y rotura de esquinas en las losas.

Deben utilizarse en pavimentos con tránsito pesado (losas de 18 cm de espesor o superiores), donde no es suficiente la transferencia por trabazón de agregados.



Características de los pasadores

Tipo de hierro	Barra redonda recta
Superficie	Lisa, libre de óxido y con tratamiento que impida la adherencia al hormigón
Longitud	45 cm
Diámetro	25 mm para $E \leq 20$ cm 32 mm para $20 < E \leq 25$ cm 40 mm para $E > 25$ cm
Separación	30 cm de centro a centro, 15 cm de centro a borde
Ubicación	Paralelo a la superficie del pavimento y al eje de calzada Mitad del espesor de losa Mitad a cada lado de la junta transversal

3. Rigidez de la subbase

Las subbases rígidas tienen más capacidad de apoyo, mejorando el comportamiento en las juntas:

- ✓ Menor deflexión de las losas
- ✓ Mantiene la eficiencia de carga a largo plazo
- ✓ Menor consumo de fatiga

TIPOS DE JUNTA

Juntas transversales	Juntas longitudinales
Contracción	Contracción
Construcción	Construcción
Dilatación	

1. JUNTAS TRANSVERSALES DE CONTRACCION

Se ubican perpendicularmente al eje de calzada y se separan a una determinada distancia, que permita controlar fisuras naturales por esfuerzos de contracción y alabeo de losas.

Separación

- ☞ Para el caso de **Pavimentos Urbanos**, la Portland Cement Association (PCA) recomienda la siguiente separación entre juntas de contracción:

$$S = (24 \text{ a } 30) * E$$

Máximo 4,6 m

Espesor de losa E (cm)	Separación S (m)
15	3,6 a 4,5
18	4,3 a 4,6

- ☞ En carreteras, donde los espesores son de 20 cm. o mayores, la PCA recomienda la separación de juntas según el tipo de subbase:

$$S_{NE} = 24 * E$$

Máximo 6,1 m

$$S_E = 21 * E$$

Máximo 6,1 m

Espesor de losa E (cm)	Separación S (m)	
	c/c* Tipo de Subbase	
	Estabilizada	No Estabilizada
20	4,2	4,8
22	4,6	5,3
24	5,0	5,8

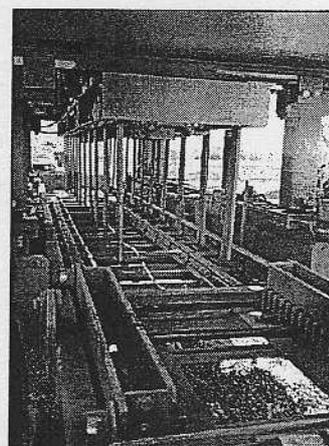
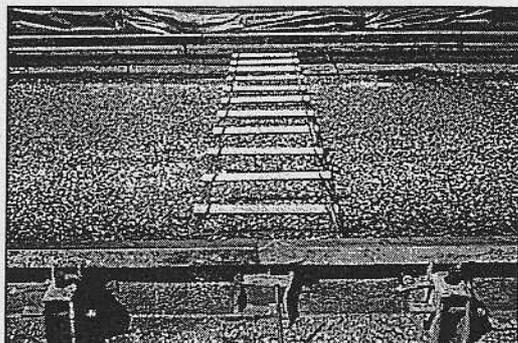
- ☞ En el caso de pavimentos con malla, la fisura transversal se mantiene cerrada por la armadura. Para éstos, el largo máximo de losas es de 9,15 m, ya que una mayor longitud incrementa el riesgo de grietas de trabajo en la zona central (rotura de armadura).

Construcción

Colocación de pasadores

Es importante la correcta colocación del pasador, para que al momento de la contracción inicial del pavimento, la fisuración se produzca por debajo de la zona debilitada (aserrado). El adecuado posicionamiento del pasador solamente puede asegurarse por medio de:

Canastos (Pavimentación con regla vibradora o terminadora)



Inserción automática
(pavimentadoras moldes deslizantes)

Para facilitar el movimiento relativo de losas, el pasador deberá lubricarse antes de su colocación (grasa, aceite, pintura asfáltica). El espesor de lubricación no superará los 0,13 mm, para permitir un buen empotramiento en el hormigón.

Aserrado

El debilitamiento del hormigón puede realizarse en estado fresco (hendidura con vaina o cuchilla) o en estado endurecido a través del aserrado. Se recomienda el aserrado porque presenta, en comparación con la debilitación del hormigón en fresco, las siguientes ventajas:

- ✓ Juntas sanas y durables (menor costo de reparación)
- ✓ Mayor comodidad a la rodadura
- ✓ Menor costo de materiales de sellado

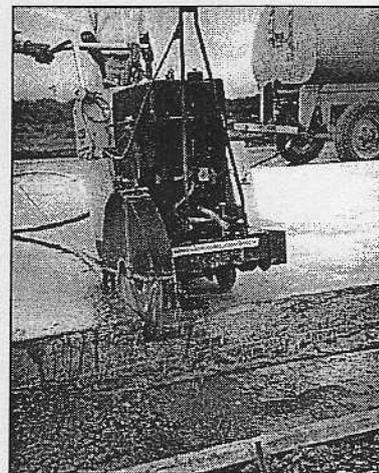
Aserrado primario

Función	Debilitar la sección para inducir la fisura
Ancho	3 mm.
Profundidad	1/3 del espesor de losa
Condición de inicio	Cuando no produce desprendimiento del agregado (corte sano)
Tiempo de inicio	Generalmente, entre 4 y 20 horas después de la colocación del hormigón (variable con condiciones ambientales y tipo de hormigón)
Tiempo disponible	Varía con condiciones ambientales y curado
Causas de fisuras transversales	Demoras excesivas en inicio de aserrado Mal curado (contracción más violenta) Mala colocación de pasadores

Secuencia del aserrado primario

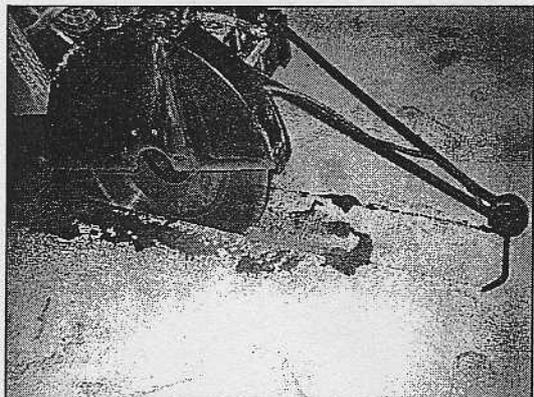
El orden de aserrado del pavimento será el mismo con el que tiende a desarrollarse la fisuración natural:

1. Juntas Transversales (contracción)
2. Juntas transversales intermedias a las anteriores (alabeo)
3. Junta longitudinal (alabeo)



Aserrado primario en junta transversal de contracción

Nota: En caso de demoras, donde no sea posible aserrar junta por medio, se debilitará 1 cada 4 juntas, para aliviar tensiones.



Disco de Aserrado

Subbases estabilizadas

En este caso, la adherencia de la subbase al hormigón (elevada fricción en el plano de contacto), producirá una menor separación entre fisuras iniciales. Además, las tensiones de alabeo son mayores debido a la rigidez de la capa de apoyo. Se recomienda por precaución, que las juntas transversales sean aserradas en forma continua, terminando con la longitudinal.

Aserrado secundario

Función	Ensanchar (o cajear) la junta para colocar el material de sellado
Ancho	6 a 12 mm (variable según largo de losa, época constructiva y material de sellado)
Profundidad	2 a 4 cm (variable según el material de sellado)
Inicio	En cuanto sea posible para permitir el sellado.
Ancho de corte	Se utilizan discos del ancho previsto para la adecuada colocación del sellador, o 2 discos de 3,2 (con los que se ejecutó el aserrado de control) con un espaciador.

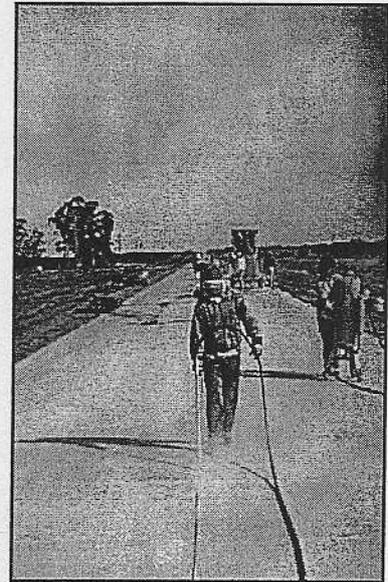
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

Limpieza

Es un requisito necesario para un buen desempeño del material de sellado, principalmente los que trabajan adheridos a las caras del aserrado, como en el caso de las siliconas. Las tareas y secuencias de la limpieza de las juntas son las siguientes:

Operación	Objetivo
Lavado con agua a presión (5 a 7 kg/cm ²)	Eliminar el lodo de aserrado
Arenado <i>cuando se usa silicona</i>	Mejorar la adherencia del sellador
Soplado con aire (mayor a 6 kg/cm ²)	Extracción de arena de la tarea anterior y materiales depositados por viento o propio tránsito de la obra

Nota: Con los materiales de sellado que no requieran adherencia (sellos preformados de neopreno), puede evitarse el arenado.

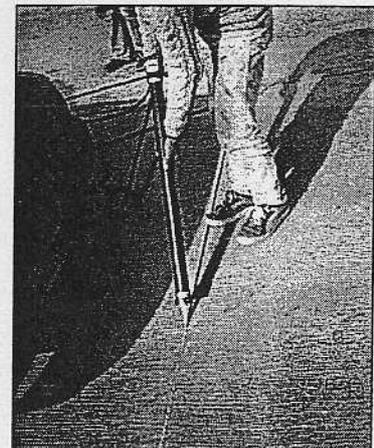


Arenado de Junta longitudinal

Sellado

La correcta ejecución y un mantenimiento oportuno de las juntas (principalmente transversales) son factores muy importantes en el desempeño del pavimento.

Objetivo	Daños asociados por un mal sellado
Evitar el ingreso de agua por la junta	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ablandamiento de la capa de apoyo ✓ Mayor posibilidad de bombeo ✓ Saturación del hormigón en zona de juntas, con daños por congelamiento y deshielo en zona fría (D-cracking)
Impedir el ingreso de materiales incompresibles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reventones de losas (blow-up) por la no ejecución periódica del sellado ✓ Astillamiento de bordes de junta



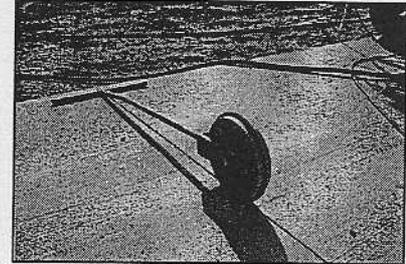
Sellado en junta transversal de contracción

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

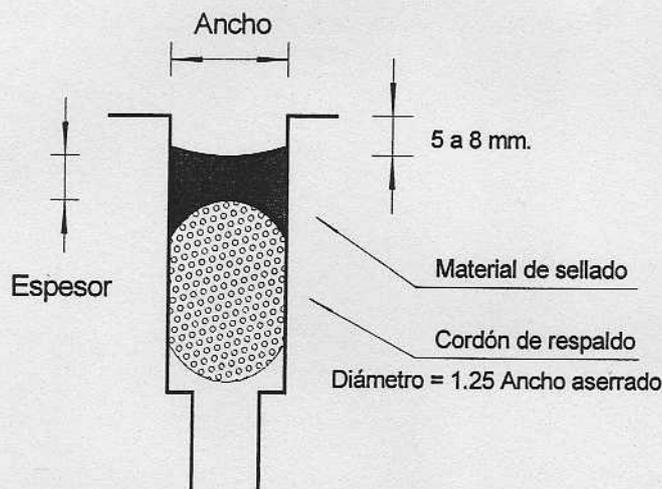
Materiales de sellado

1. Selladores líquidos

- a. Su vida útil depende de la adherencia a largo plazo con la cara de la junta
- b. Requieren de la aplicación de un cordón de respaldo
 - ✓ Su función es impedir el contacto del sellador con la parte inferior del aserrado secundario
 - ✓ Diámetro: 25 % mayor que ancho de caja (no estirar)
 - ✓ Se coloca con una herramienta especial (rueda), que posiciona el cordón a la profundidad necesaria (foto adjunta)
 - ✓ Material adecuado para la temperatura del sellador



c. Se respetará el "Factor de Forma", según material de sellado



Handwritten notes:
 a. cordón de respaldo
 b. cordón de respaldo
 c. cordón de respaldo
 1,25 x ancho
 10 mm

Factor de Forma

$$FF = \frac{\text{Espesor}}{\text{Ancho}}$$

FF siliconas = 0.5

FF materiales en caliente = 1.0

Sección transversal típica de sellado a base de materiales líquidos

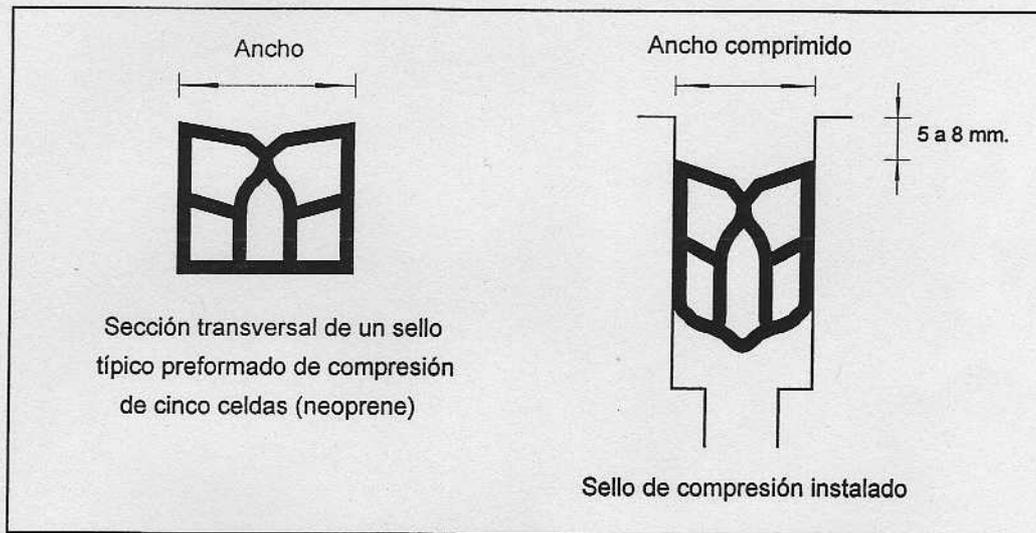
REQUISITOS DE LA JUNTA (sellado con silicona)			
Ancho de Junta (mm)	Espesor del Material (mm)	Profundidad aserrado secundario (mm)	Diámetro cordón de respaldo (mm)
6.4	6.4	22.3	9.5
9.5	6.4	25.4	12.7
12.7	6.4	28.6	15.9
19.0	9.5	31.8	22.3
25.4	12.7	57.2	31.8

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

- d. Trabajos previos a su colocación: lavado, arenado y soplado
- e. Diferentes tipos de materiales
 - Aplicación en frío o en caliente
 - De uno o dos componentes
 - Autonivelantes o de terminación con herramienta

2. Sellos de Compresión Preformados

- a. A diferencia de los selladores líquidos, trabajan siempre a la compresión, con un rango que varía normalmente entre 20 y 50% del ancho original
- b. Su buen desempeño depende de la recuperación de la compresión a largo plazo
- c. Trabajos previos a su colocación: lavado y soplado
- d. Requieren de la aplicación de un material lubricante, que además actúa como mejorador de adherencia con las caras del aserrado



hasta 22 años de vida útil.

Movimiento en la junta

$$\Delta L = C L (\alpha \Delta t + \epsilon)$$

Siendo:

ΔL	Variación de longitud de la losa (m)
C	Factor de restricción friccional ✓ 0,65 materiales estabilizados ✓ 0,80 materiales granulares
L	Longitud de la losa (m)
α	Coefficiente de dilatación térmica (1/°C)
Δt	Amplitud térmica anual
ϵ	Coefficiente de contracción del hormigón (no tenido en cuenta en rehabilitación)

Coefficientes de contracción ϵ (m/m)	
Tracción indirecta (kg/cm ²)	Coefficiente ϵ
21 o menor	0.00080
28	0.00060
35	0.00045
42	0.00030
49 o mayor	0.00020

Coefficientes de dilatación térmica α (1/°C)	
Agregado grueso	Coefficiente
Cuarzo	11.9 x 10 ⁻⁶
Arenisca	11.7 x 10 ⁻⁶
Grava	10.8 x 10 ⁻⁶
Granito	9.6 x 10 ⁻⁶
Basalto	8.7 x 10 ⁻⁶
Caliza	6.9 x 10 ⁻⁶

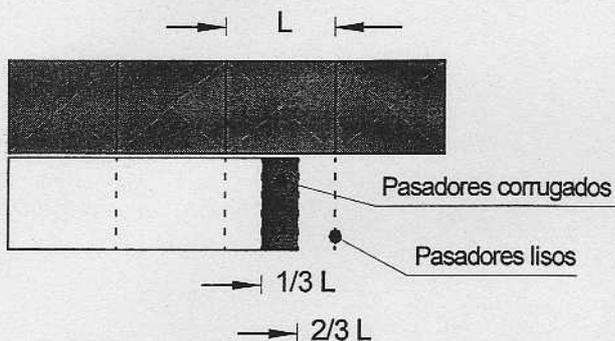
2. JUNTAS TRANSVERSALES DE CONSTRUCCION

Diseño

Este tipo de juntas se efectúan al final de la jornada o en interrupciones programadas como puentes, estructuras fijas o intersecciones. En el caso de paradas de emergencia y en lo posible, se las ubicará en la posición que correspondería a la de contracción; caso contrario en el tercio medio de la losa.

Son juntas a tope y por ser planas no transfieren carga por intertrabado. Toda la transferencia recae en el pasador, por lo que se deben colocar aún en pavimentos con juntas de contracción sin pasadores. Las características de éstos son idénticas a los de las juntas de contracción. Se aconseja la utilización de vibrador manual en esta zona, para asegurar la compactación del hormigón en cercanías del pasador.

Pavimentación por trochas



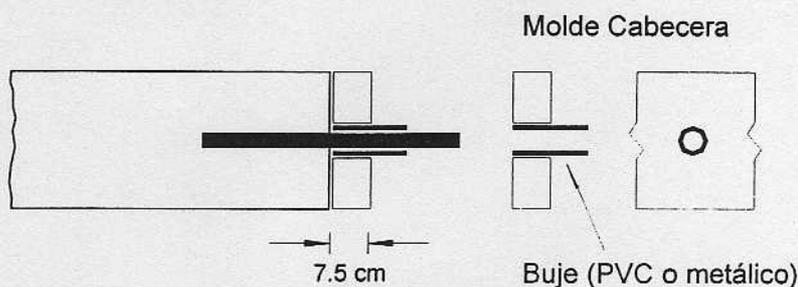
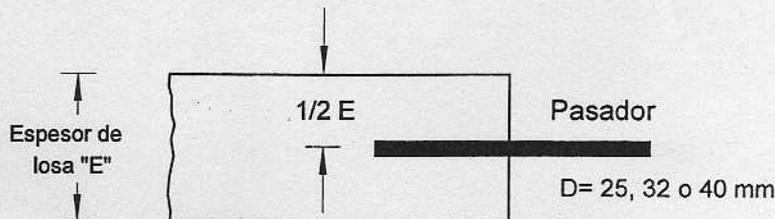
En estos casos y cuando la junta constructiva sea ejecutada en el tercio medio de la losa, el pasador será corrugado; caso contrario la junta "trabaja" e inducirá una fisura en la losa lateral contigua. Una vez reiniciado el hormigonado, la siguiente junta de contracción se replanteará en coincidencia con la de la losa lateral adyacente. Las demás características del pasador son idénticas a las mencionadas para las juntas de contracción.

Construcción

Para la colocación de pasadores se utiliza un molde cabecera de altura igual a la de la losa, con agujeros cada 30 cm y a 15 cm del borde.

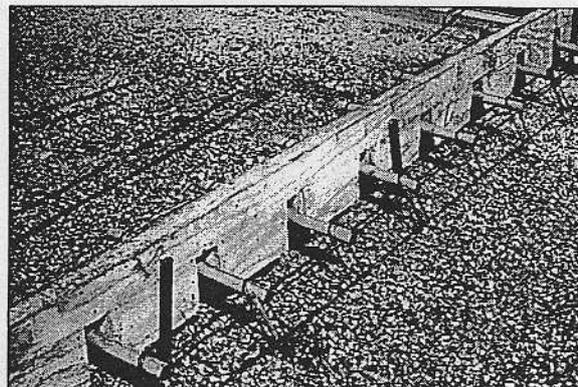
En caso de utilizar una madera como tal, su espesor deberá ser al menos de 7,5 cm de espesor, ayudando a que el pasador quede en correcta posición (alineado con el eje de calzada). Caso contrario, al momento de la extracción del molde será necesario torcer los pasadores, con el riesgo de roturas de borde (costosas y difíciles de reparar). Para ayudar a facilitar aún más esta

tarea, se pueden colocar "bujes" (plásticos o metálicos) entre la madera y el hierro, los que serán retirados antes que la madera, permitiendo un mayor "juego" entre el pasador y el molde.



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

Otra variante del caso anterior, para que resulte sencillo la extracción del molde sin provocar roturas de borde, es colocar los pasadores con el canasto (al igual que en las juntas de contracción), con la diferencia que se ranura el molde en coincidencia con el pasador, desde el parte inferior hasta un par de centímetros por encima del mismo (foto adjunta). De lado interno del molde, se fija al mismo con un par de clavos, una madera terciada en cada pasador (de unos 3 mm de espesor y con orificio central para introducir el pasador), con el fin de cubrir la zona ranurada (evitando que el hormigón se "escape" al momento de la compactación). Al día siguiente se quitan las estacas del molde y se introduce una herramienta plana entre el terciado y el molde para su desvinculación, liberando al molde para su libre extracción. Una vez quitado el molde, sólo resta retirar cada una de las maderas, sin necesidad de "doblar" los pasadores.



Juntas Constructivas aserradas

En caso de no lograr una transición suave entre las distintas secciones del pavimento, podrá avanzarse con el hormigonado hasta pasar la ubicación futura de la junta (40 a 50 cm), colocando los canastos con caños metálicos o de PVC en lugar de pasadores. Al día siguiente se aserrará la losa en todo su espesor por el centro del canasto y se insertarán los pasadores. Los caños deberán tener un diámetro interno igual al del pasador.

Otra alternativa similar a la anterior y técnicamente aceptable, aunque más costosa, es la de perforar la losa una vez aserrada en toda su profundidad. El diámetro de los agujeros deberá ser de 2 o 5 mm más que el del pasador, según se rellene posteriormente el espacio anular con material epoxy o con pasta de cemento ($a/c = 0,5$), respectivamente.

Cualquiera sea el material de relleno, éste será colocado en el fondo de la perforación (previa limpieza con aire a presión) y se introducirá el pasador a medida que se lo gira (foto adjunta), logrando de esta manera que todo el espacio anular quede recubierto, si es que se ha colocado suficiente material.



Esto se comprueba cuando el material rebalsa por la zona anular, caso contrario de repetirá el procedimiento. Para evitar que el material (aun no endurecido) se salga del orificio, se suele colocar un disco de retención que recubre al pasador

Si se adopta el procedimiento de juntas de construcción aserradas, se debe asegurar que en la mañana siguiente la junta pueda ser aserrada sin inconvenientes. Si el hormigón no tuviese la suficiente resistencia, el último pastón de la próxima junta constructiva deberá tener una mayor resistencia inicial (10 a 15 % más de cemento o incorporación de un acelerante).

Las juntas de construcción no requieren aserrado inicial. Las dimensiones de la cámara del sellador son idénticas a las mencionadas en las juntas de contracción.

3. JUNTAS TRANSVERSALES DE EXPANSION

Diseño

Las juntas de expansión fueron reemplazadas por juntas de contracción, debido al comportamiento no satisfactorio de las mismas. Las juntas transversales de contracción suministran espacio suficiente para permitir la expansión de las losas formadas entre las fisuras controladas, reduciendo lo necesario las tensiones de compresión generadas por la expansión por temperatura.

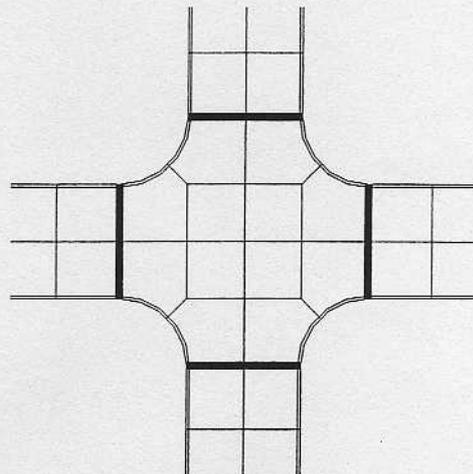
La práctica indica que solamente se recurrirá al empleo de juntas de expansión en los casos siguientes:

- ✓ Intersecciones asimétricas
- ✓ En curvas de pequeño radio, al principio y fin de curva
- ✓ Cambios de pendiente vertical
- ✓ Contra construcciones fijas

Siempre que:

- ✓ Los materiales utilizados posean características normales de expansión
- ✓ El pavimento se construya cuando la temperatura está muy por encima de la de congelación
- ✓ Las juntas de contracción se conserven adecuadamente impidiendo la penetración de incompresibles

Pero en los casos en que el mantenimiento de juntas no se efectúe en el momento oportuno, se deberá recurrir a la ejecución de juntas de expansión. Si bien esta junta absorberá por deformación y durante un corto tiempo, parte del empuje de las losas (por ingreso de incompresibles en las juntas de contracción), llegará el momento en que no podrá hacerlo, porque ambas caras de la junta habrán quedado a tope. Ante la situación planteada, en Pavimentos Urbanos es recomendable la ejecución de juntas de expansión en todas las bocacalles, en los lugares que muestra la figura adjunta.



Juntas de Expansión

En el caso de intersecciones asimétricas, se la ubicará en la última junta de la zona recta del cordón cuneta. En los extremos de puentes o cualquier otra construcción fija, las juntas de expansión se ubican normalmente a por lo menos una losa de distancia.

Material de Relleno

Entre la subbase y el material de sello, en todo el ancho de calzada, se debe colocar un material de relleno (madera blanda o algún material sintético durable), el cual no debe ser absorbente ni reactivo y no tendrá contracción. Alcanzará una deformación del 50 % con una carga de compresión de 7 a 50 kg/cm² (ASTM). Su altura será aproximadamente 5 cm menos que la altura de la losa, dependiendo del material que se utilice para el sellado. El espesor debe ser de 2 a 2,5 cm.

Si la junta de expansión no es simultáneamente junta constructiva (continuidad del hormigonado antes y después de la junta), por encima del material de relleno se coloca un listón (madera), para generar el espacio del sellado, el que será retirado una vez que el hormigón haya endurecido.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

Pavimentos sin Pasadores

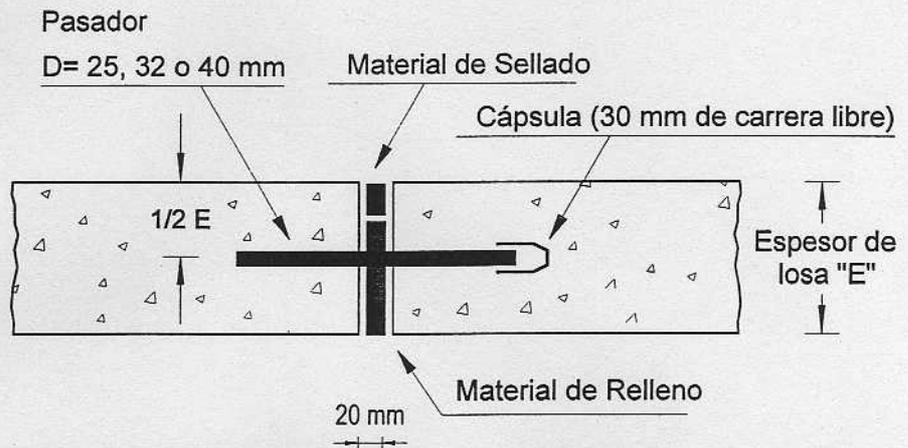
En el caso de pavimentos urbanos sin pasadores, las 3 o 4 juntas de contracción próximas a la de expansión, deberán ejecutarse con pasadores. Esto se hace para incrementar la transferencia de carga por intertrabado de las juntas transversales, disminuida o inexistente con aberturas excesivas.

Construcción

Juntas de expansión con pasadores

Para la transferencia de carga se utilizan pasadores (hierro liso) de 50 cm de longitud. Un extremo del pasador lleva una cápsula o capuchón (mínimo 5 cm) con un extremo envainado y lubricado interiormente para evitar la adherencia y permitir el movimiento al momento del cierre de la junta (mayor temperatura de las losas). A excepción de lo anterior, las características restantes y posición del pasador, son iguales a los

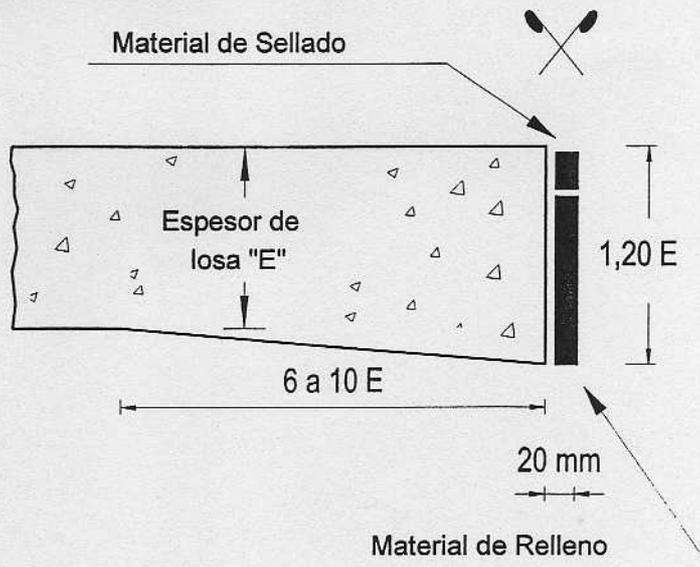
de las juntas de contracción. Se recomienda el recubrimiento con epoxy para evitar oxidación. Se colocarán con canasto, que ayudará a mantener además en posición al material de relleno.



Juntas de expansión sin pasadores.

Se debe aumentar el espesor del pavimento, desde un 20 % en la junta, reduciéndolo en forma gradual hasta el espesor original, en un tramo de 6 a 10 veces su espesor.

Este tipo de solución podrá también aplicarse a extremos de calles en donde se interrumpa la pavimentación, que aunque se considere en el diseño la colocación de pasadores, inicialmente trabajará como junta sin transferencia de carga. Su mayor espesor, al igual que la colocación de pasadores, brinda capacidad estructural adicional, con disminución de tensiones y deformaciones.

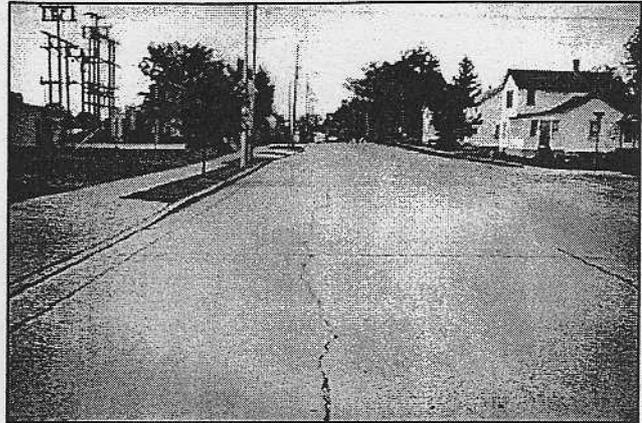


DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

4. JUNTAS LONGITUDINALES DE CONTRACCION

Se construyen para controlar la fisuración longitudinal. Para esto, el ancho de losas no deberá nunca superar los 4 m.

Se ejecutan cuando se pavimentan 2 o más trochas simultáneamente. La transferencia de carga se efectúa por intertrabado. En la futura posición de la junta se colocan barras de unión, para evitar la separación de las caras de la fisura.



Fisura longitudinal por exceso de ancho de losa.

Diseño

Barras de unión.

Son barras corrugadas y no se lubrican (para lograr adherencia con el hormigón). No es crítica su orientación, pero se colocarán lo más perpendicular posible a la dirección longitudinal. Deben alejarse 40 cm de las juntas transversales para no interferir con el movimiento de las mismas.

Dimensiones

Las barras de unión cumplen la función de evitar que las losas se separen. Su dimensionamiento se basa en calcular el esfuerzo que deben soportar para mantener unidas a las losas, función del espesor de losa, distancia al borde libre más cercano y fricción en el plano de contacto (suelo-losa). Conocido el esfuerzo, con la tensión admisible del hierro se determina la cuantía a la tracción:

$$S \text{ (cm}^2\text{/m)} = C_f d \gamma h / \sigma_{adm}$$

- Siendo:
- d = Distancia al borde libre más cercano, m.
 - C_f = Coeficiente de fricción en el plano suelo-losa, adimensional.
 - γ = Peso Unitario del Hormigón compactado, kg/m^3 .
 - h = Espesor de Losa, m.
 - σ_{adm} = Tensión admisible a la tracción del hierro, kg/cm^2 .

Se considera $C_f = 0.15$, ya que si bien es un valor que depende del tipo de subbase, su valor varía normalmente entre 1 y 2.

Con este valor de C_f y adoptando una tensión admisible para el hierro de 2.400 kg/cm^2 (4.200 kg/cm^2 de tensión de Fluencia y un coeficiente de seguridad de 1,75), en pavimentos de hasta 20 cm de espesor y anchos de losa de 4 metros, se puede aplicar la tabla adjunta para el dimensionamiento de la barra.

Separación entre barras de unión (cm)		
Junta al borde libre más cercano	$\phi = 10 \text{ mm.}$ L= 70 cm.	$\phi = 12 \text{ mm.}$ L= 90 cm.
Primera	70	90
Segunda	35	45

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

Para el caso de losas de mayor espesor (21 cm o más), se debe calcular la cuantía con la fórmula anterior. Adoptando alguna de las barras de la tabla anterior, se recalcula el espaciamiento con la siguiente fórmula:

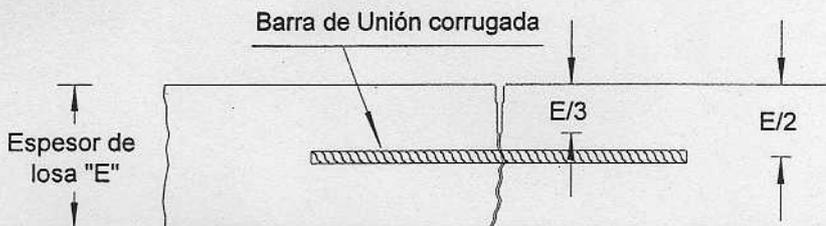
$$E = 100 A / S$$

Siendo: E = Espaciamiento de las barras de unión, cm.
 A = Area de la Barra adoptada, cm².
 $\phi = 10 \text{ mm}$, L= 70 cm, A = 0,78 cm²
 $\phi = 12 \text{ mm}$, L= 90 cm, A = 1.13 cm²
 S = Cuantía para las nuevas condiciones, cm²/m

En el caso de que el ancho de losa sea menor a 4 metros, se procede en forma similar al caso anterior, con la salvedad de que para la primera junta desde el borde libre más cercano, la máxima separación de las barras de unión es de 80 cm para la barra de 10 mm de diámetro, y de 110 cm para la de 12 mm.

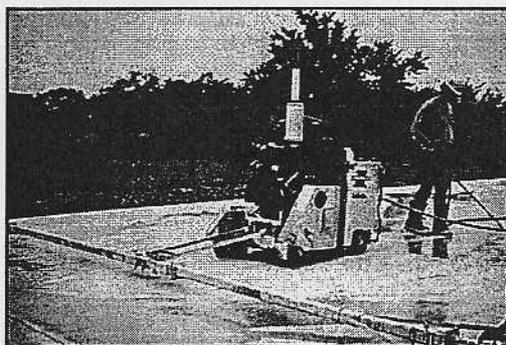
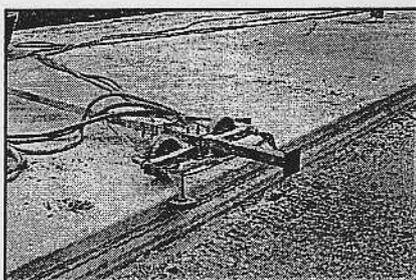
Construcción

Las barras de unión se insertan a media profundidad y a la separación especificada. No es crítico el tiempo de aserrado, pero se recomienda iniciarlo sin demoras luego del aserrado de las juntas transversales.



Se aserrará en 1/3 del espesor de losa. El factor de forma no es crítico debido a los pequeños movimientos de la losa (cuando no nulos) en esta dirección. La cavidad varía de 6 a 9 mm de ancho, con una profundidad de 30 mm.

En la figura adjunta (derecha) se puede ver el aserrado de la junta longitudinal, guiado por un dispositivo que ayuda a replantear la posición de la misma. Este último apoya sus extremos en los bordes de la calzada, lo que permite "guiar" la operación del aserrado primario (foto inferior).



Nota: no se unirán más de 16 metros de pavimento. De hacerlo, se superaría la resistencia a la tracción del hormigón con el desarrollo de fisuras longitudinales.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE JUNTAS

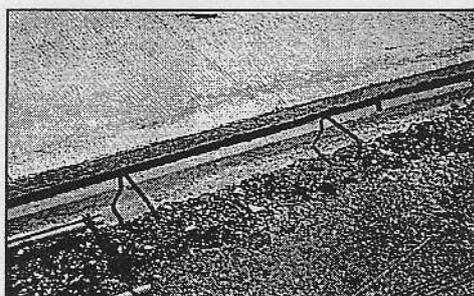
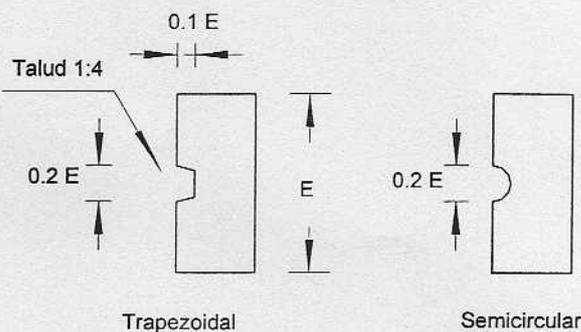
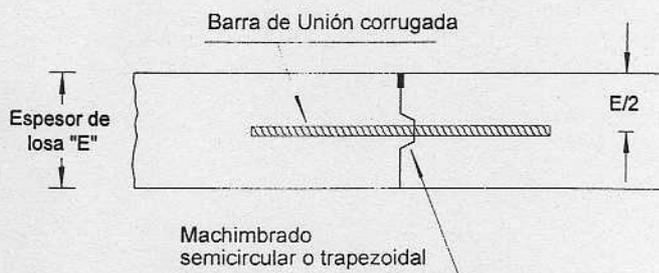
5. JUNTAS LONGITUDINALES DE CONSTRUCCION

Diseño

Se ejecutan cuando la calzada en construida en distintas etapas. Las caras machimbradas proveen la transferencia de carga. Los bordes deben quedar con machimbre en caso de futuras ampliaciones (siempre y cuando esto sea posible).

El diseño del encastre puede ser trapezoidal o semicircular, ubicado siempre a media profundidad.

Para mantener la transferencia de carga se usarán barras de unión (mismas características que para las juntas longitudinales de contracción)

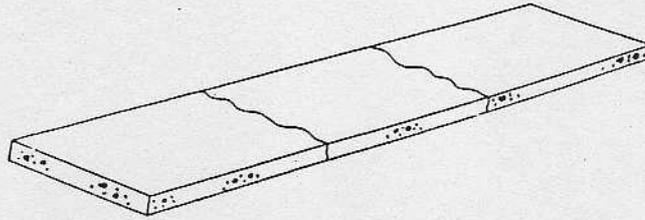


Construcción

Existen 3 métodos básicos para la ubicación de las barras de unión en este tipo de juntas:

- Moldes perforados a la separación especificada, y colocación durante el hormigonado
- Barras de unión dobladas a 90° y enderezadas antes de la pavimentación de la trocha adyacente (moldes deslizantes)
- Taladrado de agujeros posterior al hormigonado e inserción de barras untadas en resinas adhesivas o pasta de cemento

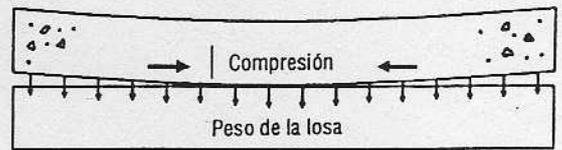
Diseño y construcción de juntas



Agrietamiento inicial en un pavimento sin juntas.

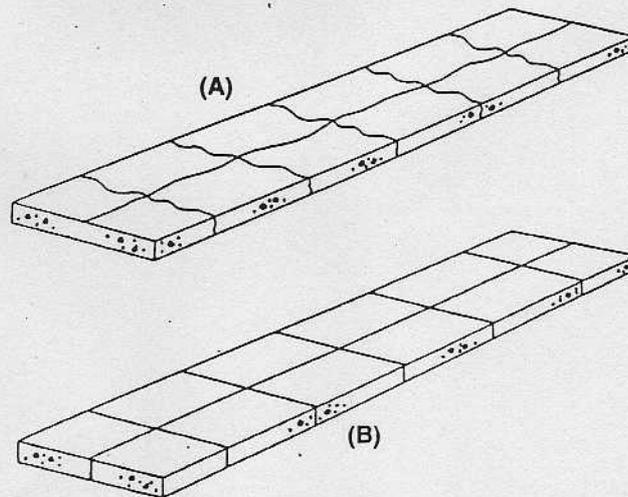


Deflexión diurna

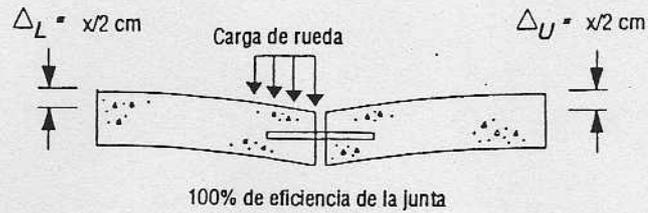
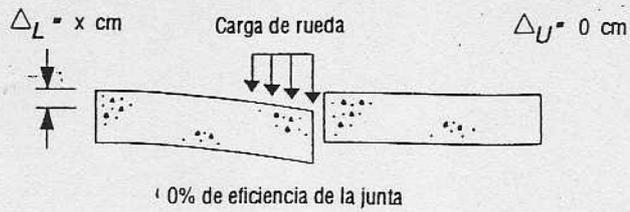


Deflexión nocturna

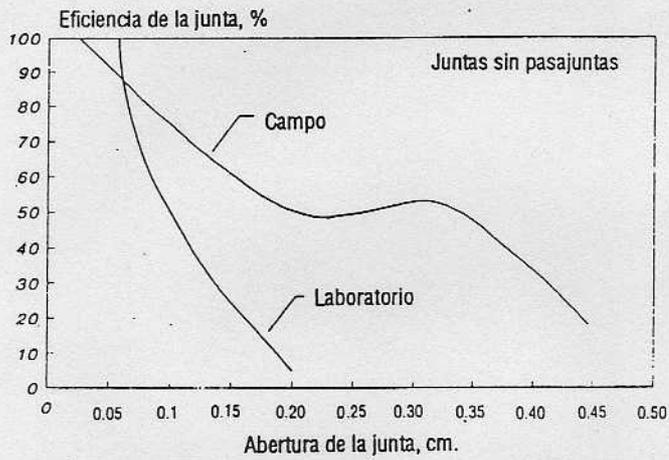
Acción de ondulación en una losa de pavimento de concreto.



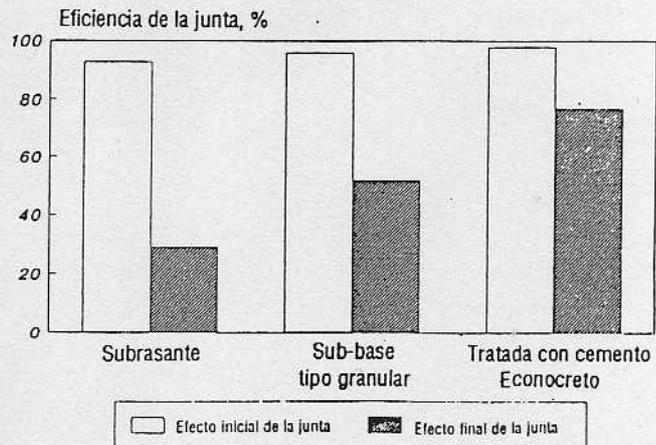
(a) Patrón de agrietamiento en un pavimento de concreto sin juntas como resultado de los esfuerzos por cambios climáticos y por cargas aplicadas. (b) La separación adecuada entre juntas de pavimentos de concreto controla la ubicación y geometría de las grietas.



Eficiencia en la transferencia de carga.



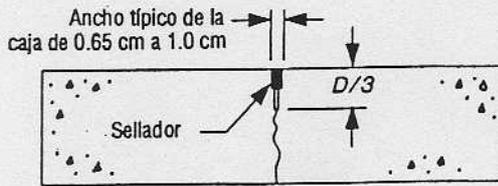
Susceptibilidad de la eficiencia en las juntas en función de la apertura de las juntas con base en datos de laboratorio y de campo de juntas sin refuerzo de dovelas ⁽²⁾.



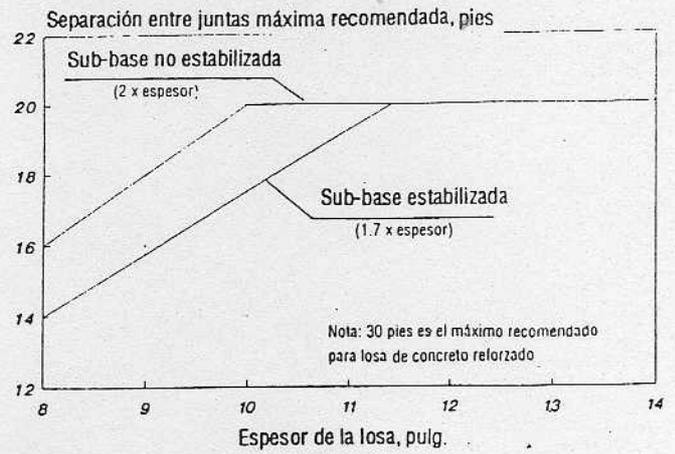
Eficiencia de la junta para varios tipos de sub-bases (tomando como referencia una losa de 22.5 cm después de un millón de aplicaciones de carga).



Con pasa juntas

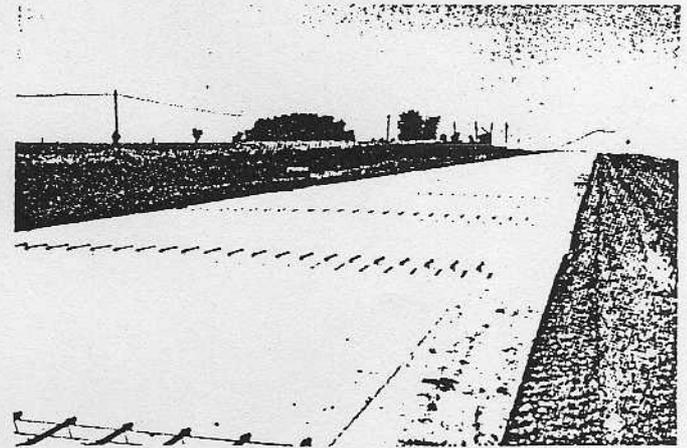
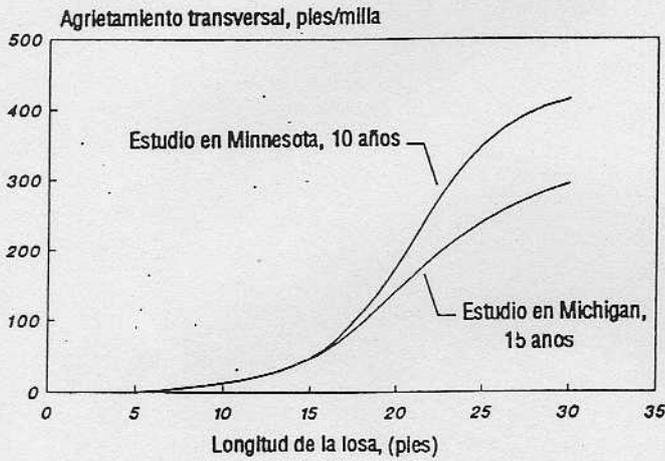


Sin pasa juntas



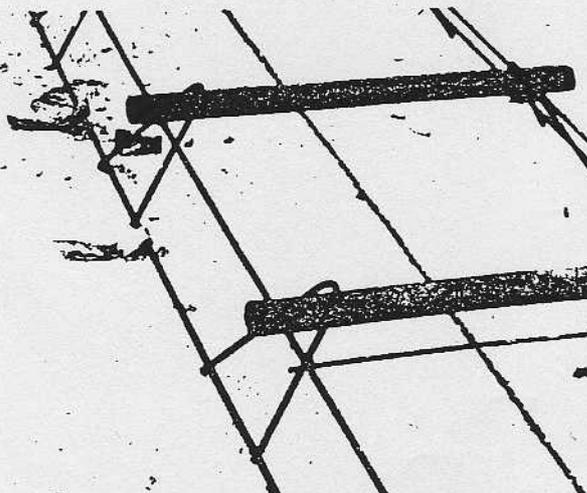
Juntas transversales de contracción

Separación máxima recomendada entre juntas para pavimentos de carreteras.

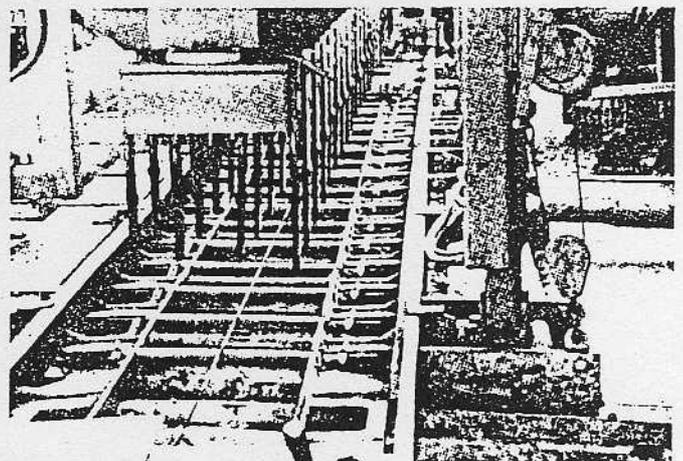


Colocación de las pasajuntas antes de la pavimentación.

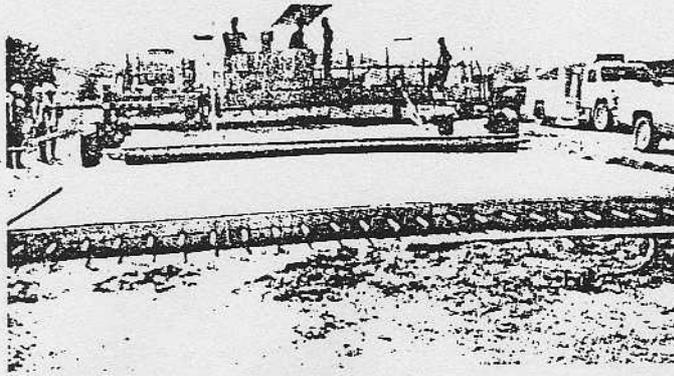
Relación entre agrietamiento transversal y longitud de la losa a partir de estudios realizados en Minnesota y Michigan (4).



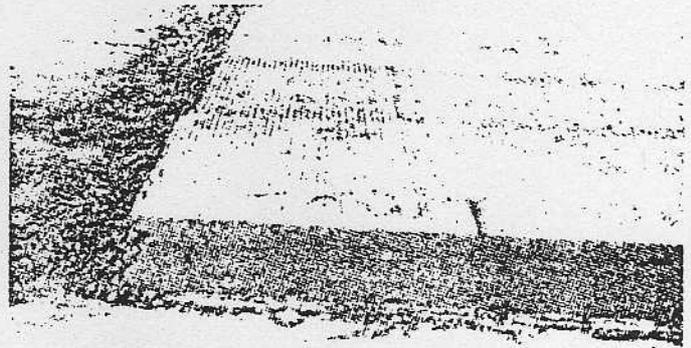
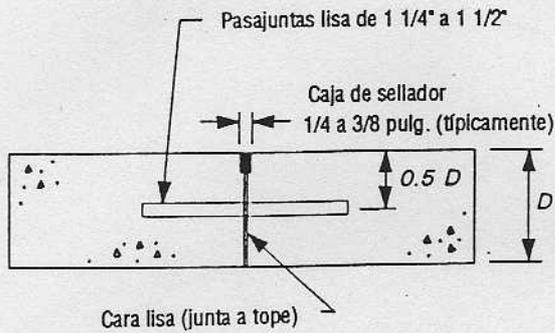
Se usan generalmente grapas para fijar las canastillas o silletas de las pasajuntas a las sub-bases estabilizadas.



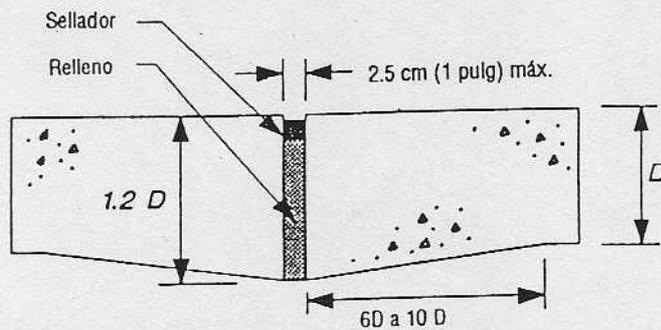
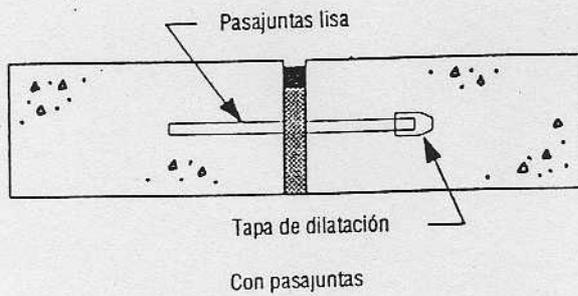
Introducir de las barras de pasajuntas en operación.



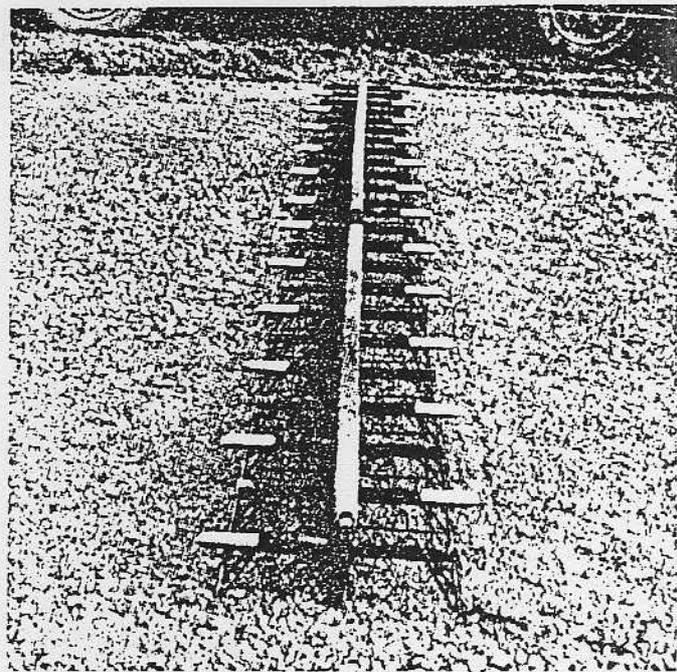
Junta cimbrada transversal de construcción (cabecera)



Junta transversal de construcción aserrada. (Observe que está bien definida la localización de la junta y corresponde a la ubicación proyectada de una junta transversal de construcción.)

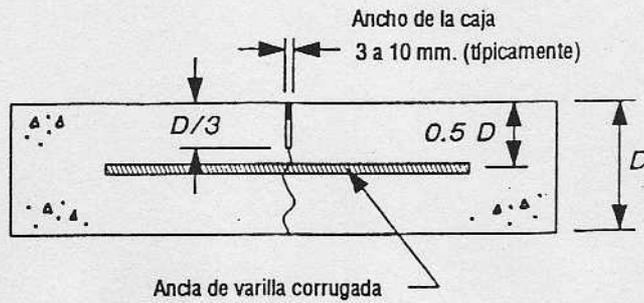


Sin pasajuntas - Borde engrosado (aislamiento)

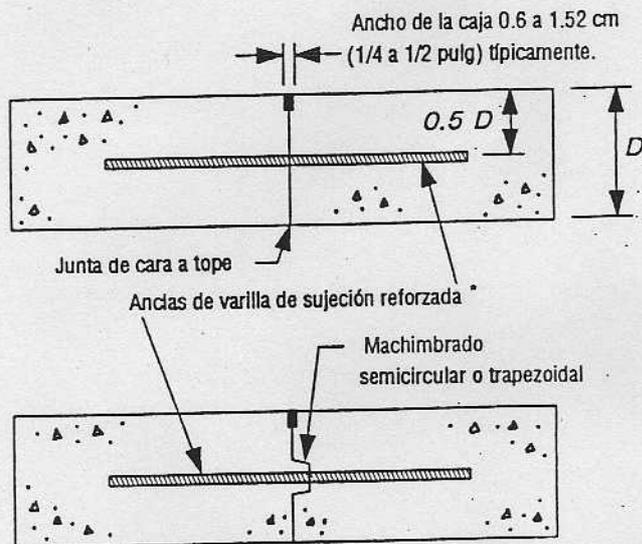


Junta típica de dilatación con pasajuntas. Nótese la espiga de las pasajuntas y el material de relleno.

Junta longitudinal de contracción

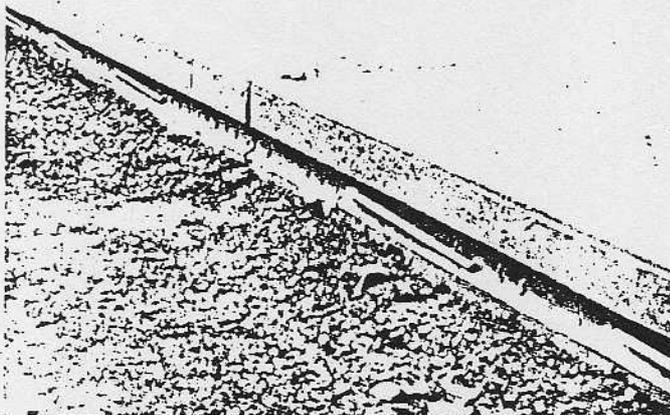


Junta longitudinal de contracción

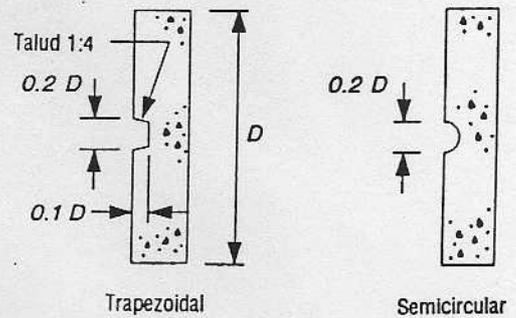


* Las varillas de sujeción se doblan, perforan e introducen, o se enroscan a su lugar definitivo

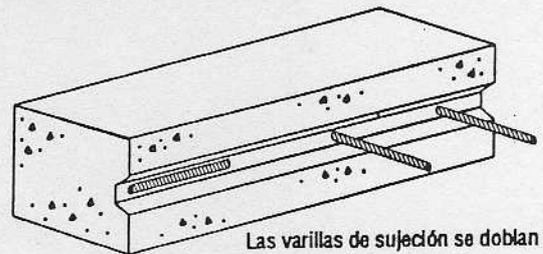
Junta longitudinal de construcción



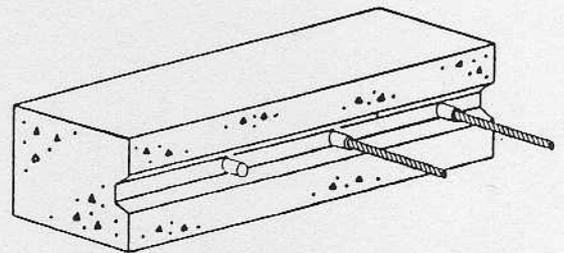
Junta de construcción longitudinal machimbrada. El machimbre proporciona espacio para alojar las varillas de sujeción, para colocarlas a su posición final justo antes de la siguiente pavimentación.



Dimensiones estándar para el diseño del machimbrado y/o varillas de sujeción.



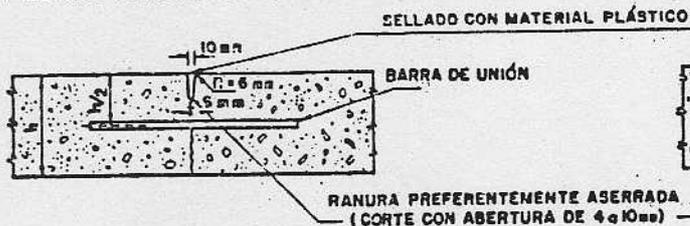
Las varillas de sujeción se doblan a su posición final después de colocarlas



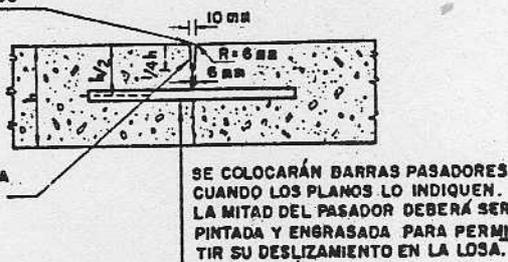
Varillas de dos partes roscadas entre sí después de colocarlas (el machimbrado es opcional)

Colocación típica de las varillas de sujeción en concreto fresco. Las varillas de sujeción también se pueden colocar e inyectar dentro de barrenos perforados en el concreto endurecido cuando no se use machimbrado ni coples roscados.

① JUNTA LONGITUDINAL de ARTICULACIÓN



② JUNTA TRANSVERSAL de CONTRACCIÓN



③ JUNTA LONGITUDINAL ENSAMBLADA (BORDES LIBRES)

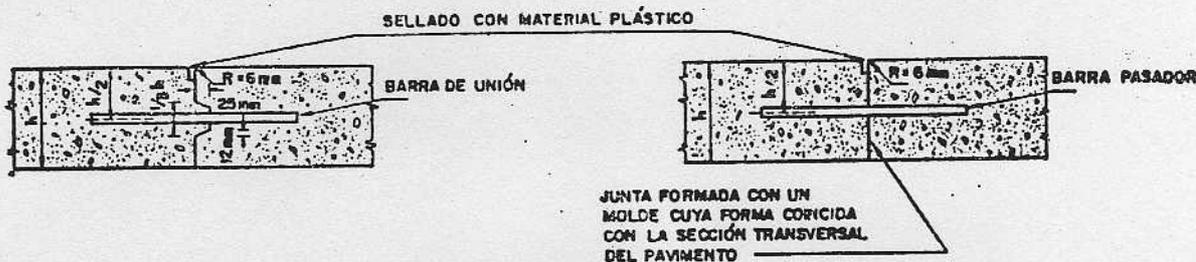


④ JUNTA TRANSVERSAL de EXPANSIÓN



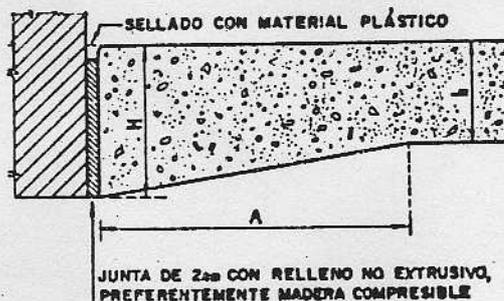
⑤ JUNTAS de CONSTRUCCIÓN

a) Tipo ensamblada (Longitudinal); b) Tipo a tope (Transversal)



⑥ JUNTA de EXPANSIÓN CONTRA OTRAS ESTRUCTURAS

FIG. 5. Tipos de junta.



A	0,50	0,90	1,20
H	1,5 h	1,334 h	1,273 h

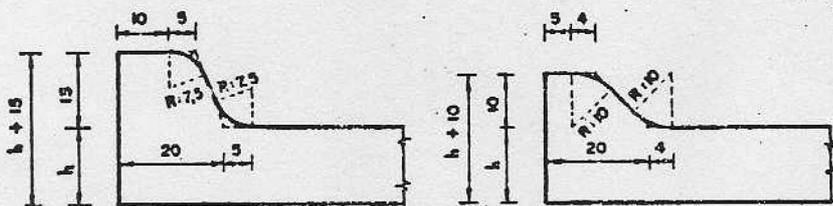


FIG. 6. Cordones integrales.

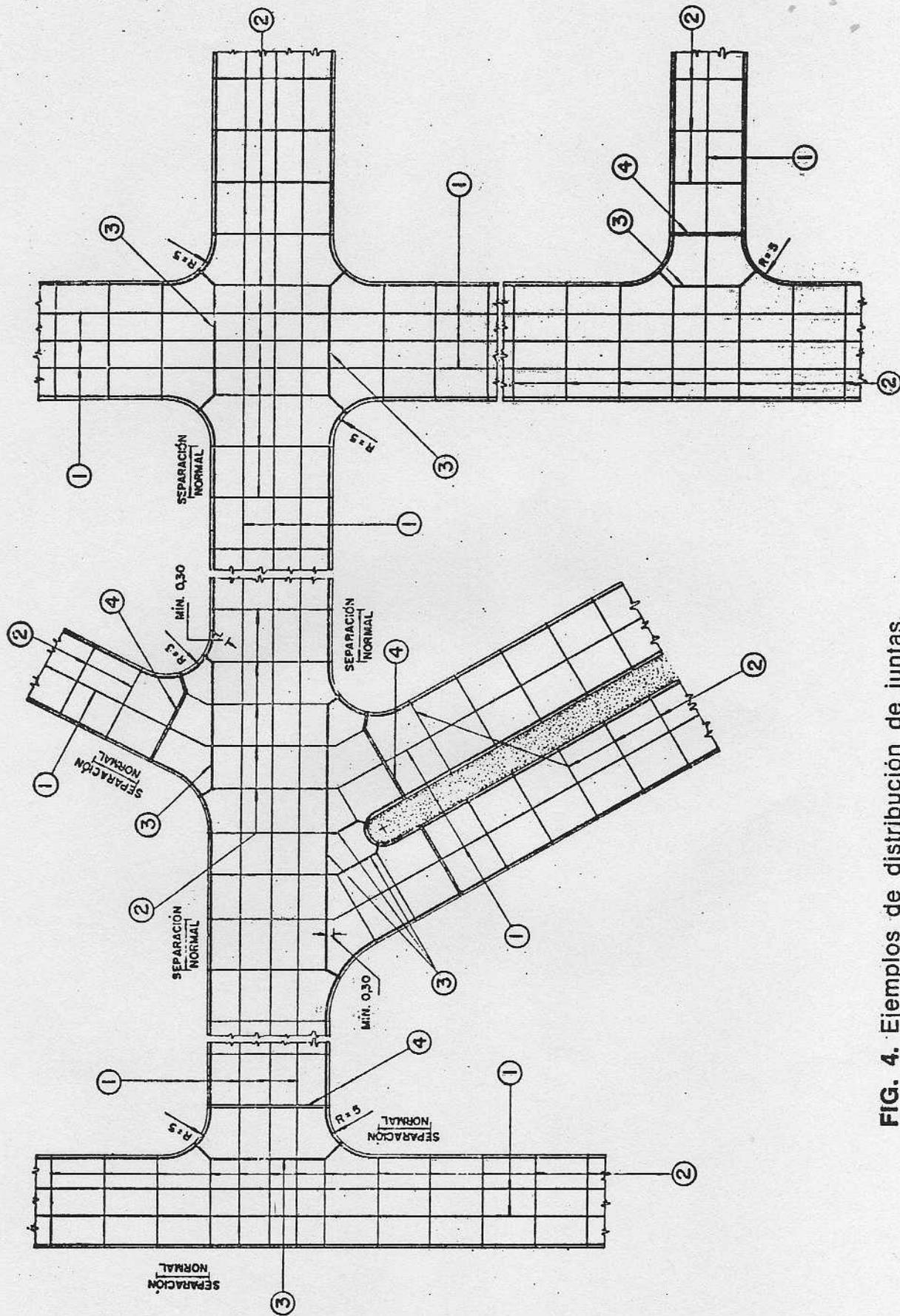


FIG. 4. Ejemplos de distribución de juntas.

Ver TIPOS DE JUNTA en fig. 5

Las medidas están expresadas en metros

