

I. Diseño de Pavimentos Rígidos

Las capas que conforman el pavimento rígido son: subrasante, subbase, y losa o superficie de rodadura como se muestra en la Figura 3.1

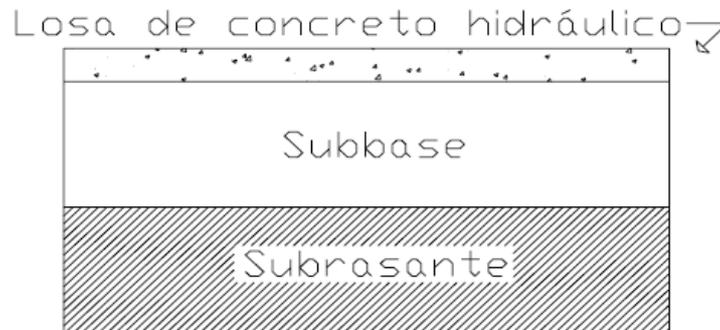


Figura 3.1. Capas del pavimento rígido.

Los elementos y funciones de un pavimento rígido son:

Subrasante.- Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante. Se considera como la cimentación del pavimento y una de sus funciones principales es la de soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, así como evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

Subbase.- Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las

variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase. La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una subrasante o subbase adecuada.

Losa (superficie de rodadura).- Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base.

III.1 Procedimiento de diseño

Para el diseño del pavimento rígido se seguirá el método AASTHO que se presenta a continuación:

La fórmula general para el diseño de pavimentos rígidos está basada en los resultados obtenidos de la prueba AASTHO. La fórmula es la siguiente:

$$\log_{10}(E18) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Desviación normal estándar} \uparrow \\ Z_r \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.006 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} \\ \text{Error estándar combinado} \uparrow \\ \text{Espesor} \uparrow \\ \text{Serviciabilidad final} \leftarrow \\ + (4.22 - 0.32 \times Pt) \times \log_{10} \left[\frac{S'c \times Cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{Ec}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right] \\ \text{Módulo de ruptura} \uparrow \quad \text{Coeficiente de drenaje} \uparrow \\ \text{Módulo de transferencia de carga} \quad \text{Módulo de elasticidad} \quad \text{Módulo de reacción} \end{array} \right\}$$

↑
↑
↑

El procedimiento de diseño normal es **suponer un espesor de pavimento** e iniciar a realizar tanteos, con el espesor supuesto **calcular los ejes equivalentes** y posteriormente evaluar todos los factores adicionales de diseño, si se cumple en equilibrio en la ecuación el espesor supuesto es resultado del problema, de lo contrario de debe de seguir haciendo tanteos.

Las variables de diseño de un pavimento rígido son:

- a) Espesor.
- b) Serviciabilidad
- c) Tránsito
- d) Transferencia de carga
- e) Propiedades del concreto
- f) Resistencia a la subrasante
- g) Drenaje
- h) Confiabilidad

a) ESPESOR

El espesor del pavimento de concreto es la variable que se pretende determinar al realizar un diseño, el resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que interviene en los cálculos.

b) SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de **servir al tipo de tráfico** (autos y camiones) que circulan en la vía, se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente. La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo la tendencia es poder definirla con parámetros medibles.

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

El **índice de serviciabilidad inicial (Po)** es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo, para su elección es necesario considerar los métodos de construcción, ya que de esto depende la calidad del pavimento.

Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento de concreto puede tener una serviciabilidad $P_o = 4.7$ ó 4.8 .

En la Figura 3.2 se puede observar que mientras mejor se construya inicialmente un pavimento, o bien, mientras mejor índice de serviciabilidad inicial tenga mayor será su vida útil.

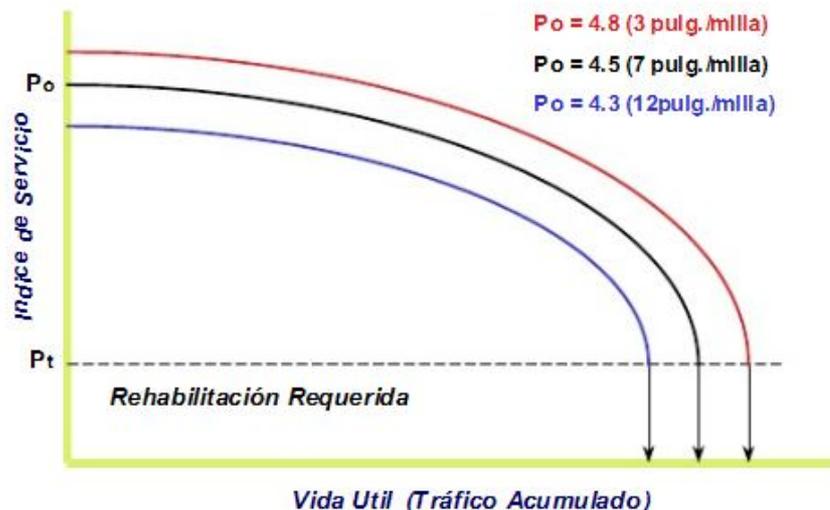


Figura 3.2. Comportamiento del pavimento de acuerdo al índice de serviciabilidad inicial (P_o).

El **índice de serviciabilidad final (Pt)** tiene que ver con la **calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil**, o bien, el valor más bajo que pueda ser admitido, antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo o la reconstrucción del pavimento.

Los valores recomendados de serviciabilidad final Pt para el caso de México se pueden observar en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de serviciabilidad final (Pt) en función del tipo de camino.

Tipo de camino	Serviciabilidad final (Pt)
Autopistas	2.5
Carreteras	2.0
Zonas industriales	1.8
Pavimentos urbanos Principales	1.8
Pavimentos urbanos secundarios	1.5

La diferencia entre ambos índices es: $\Delta PSI = P_o - P_t$, que se define como **pérdida de serviciabilidad**.

c) TRÁNSITO

El tránsito es una de las variables más significativas del diseño del pavimento y sin embargo es una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse. **Es importante hacer notar que debemos contar con la información más precisa posible del tráfico para el diseño, ya que de no ser así podríamos tener diseños inseguros o con un grado importante de sobre diseño, debido a esto, en este trabajo se tratará de manera sencilla esta parte.**

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada al número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el camino. El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de **Ejes Equivalentes**, es decir, que antes de entrar a las fórmulas de diseño, debemos transformar los **Ejes de**

Pesos Normales de los vehículos que circulan por el camino, en **Ejes Sencillos Equivalentes** de 18 kips (8.2Ton) también conocidos como ESAL's.

Lo conducente es realizar los cálculos para el carril de diseño, seleccionado para estos fines por ser el que mejor representa las condiciones críticas de servicio de la calle o camino. Existen algunos factores que nos ayudan a determinar con precisión el tráfico que circula en el carril de diseño, estos factores se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3.2. Porcentaje de ejes equivalentes

Número de carriles en una dirección	Porcentaje de ejes simples equivalentes de 82kN en el carril de diseño
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 – 75

AASTHO diseña los pavimentos por fatiga. La fatiga se entiende como el **número de repeticiones ó ciclos de carga y descarga que actúan sobre un elemento**. En realidad al establecer una vida útil de diseño, lo que estamos haciendo es tratar de estimar, en un periodo de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento.

La vida útil mínima con la que se debe diseñar un pavimento rígido es de 20 años, es común realizar diseños para 30, 40 ó más de 50 años. Otro factor que hay que tomar en cuenta es la **tasa de crecimiento anual**, que depende del desarrollo económico – social, de la capacidad de la vía, tipo de vehículo que pueden ser más de un tipo que de otro.

Es conveniente prever este crecimiento del tráfico, tomando en consideración una tasa de crecimiento anual con la que se calcula un **factor de crecimiento de tráfico**.

Es importante investigar adecuadamente la tasa de crecimiento apropiada para el caso en particular que se este considerando. A continuación se presentan algunos valores típicos de tasas de crecimiento, sin embargo estos pueden variar según el caso.

Tabla 3.3. Valores comunes de tasa de crecimiento.

Caso	Tasa de crecimiento
Crecimiento normal	1% a 3%
Vías completamente saturadas	0% a 1%
Con tráfico inducido*	4% a 5%
Alto crecimiento*	mayor al 5%

*solamente durante 3 a 5 años

El **Factor de Crecimiento del Tráfico** considera los años de vida útil más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vía.

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

Donde:

g = tasa de crecimiento

n= años de vida útil

d) TRANSFERENCIA DE CARGA

También se conoce como **coeficiente de transmisión de carga (J)** y es **la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir las fuerzas cortantes con sus losas adyacentes**, con el objetivo de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento. Mientras mejor sea la transferencia de cargas, mejor será el comportamiento de las losas del pavimento.

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

- Cantidad de tráfico
- Utilización de pasajuntas
- Soporte lateral de las losas

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, por lo que se recomienda su utilización cuando:

- El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- El número de ejes equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de ESAL's.

Esta transferencia de cargas se realiza a través de los extremos de las losas (juntas o grietas) y su valor depende del tipo de pavimento, del tipo de borde u hombro y de la colocación de los elementos de transmisión de carga.

En la siguiente tabla se muestran los valores del coeficiente de transmisión de carga en función de estos parámetros:

Tabla 3.5. Valores de coeficiente de transmisión de carga J.

Tipo de pavimento	Hombro Elementos de transmisión de carga Concreto hidráulico	
	si	no
No reforzado o armado con juntas	2.5 - 3.2	3.6 - 4.2
Armado continuo	2.3 - 2.9	-

Fuente: Guía para el Diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993

El coeficiente de transmisión de carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta como se observa en las siguientes figuras.



Figura 3.3. Junta 0% efectiva. La carga la soporta una sola losa.

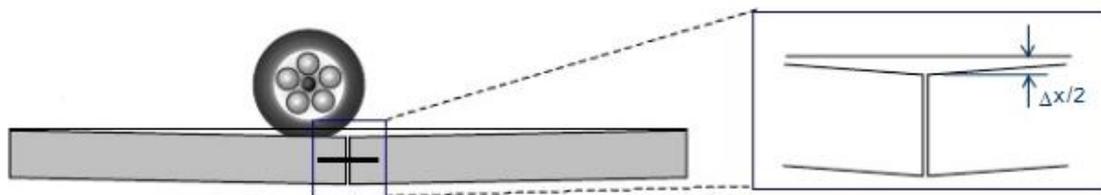
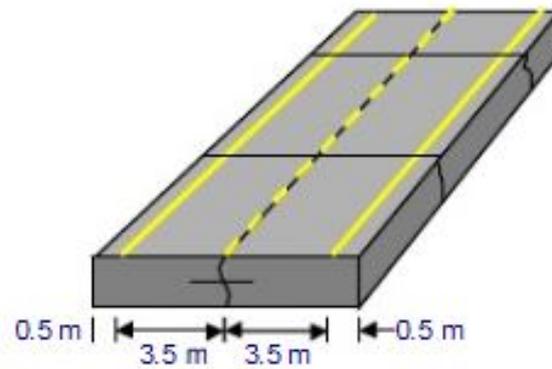


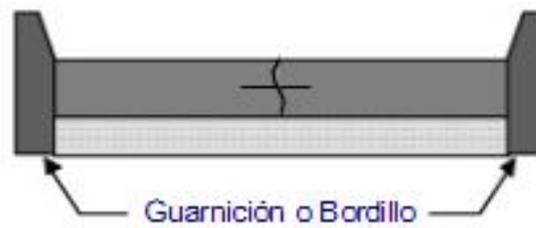
Figura 3.4. Junta 100% efectiva. La carga la soportan entre las dos losas.

Soporte lateral es el confinamiento que produce el soporte lateral y contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse **lateralmente soportado** cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:

- Carril ancho $\geq 4.0m$



- Confinamiento con guarniciones o banquetas



- Con acotamientos laterales

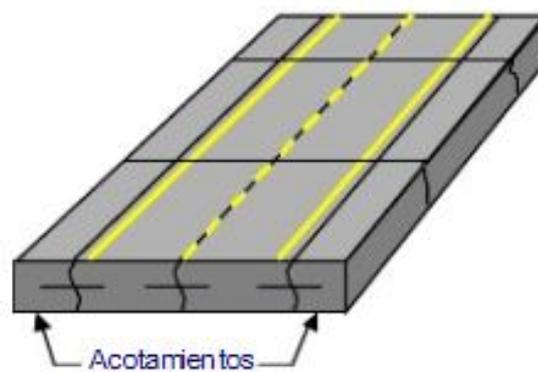


Figura 3.5. Pavimento lateralmente soportado.

Las **pasajuntas** son **barras de acero redondo liso** con un $f_y = 4,200\text{kg/cm}^2$, la cual no se debe adherir al concreto permitiendo el libre movimiento de las losas longitudinalmente, pero si debe de transferir verticalmente parte de la carga aplicada en una losa adyacente. Se colocan perfectamente alineadas a la mitad del espesor de la losa.

e) PROPIEDADES DEL CONCRETO

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño y en su comportamiento a lo largo de su vida útil.

- Resistencia a la tensión por flexión o Módulo de Ruptura (MR)
- Módulo de elasticidad del concreto (E_c)

Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera resistencia del concreto trabajando a flexión, que se conoce como resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o **Módulo de ruptura (MR)** normalmente especificada a los 28 días.

Existe una prueba normalizada por la ASTM C78 para la obtención del módulo de ruptura la cual consiste en aplicar carga a la viga de concreto en los tercios de su claro de apoyo (Figura 3.6). Se puede realizar otra prueba similar aplicándole carga el centro del claro; los resultados obtenidos son diferentes aproximadamente entre 15% a 20% mayores.

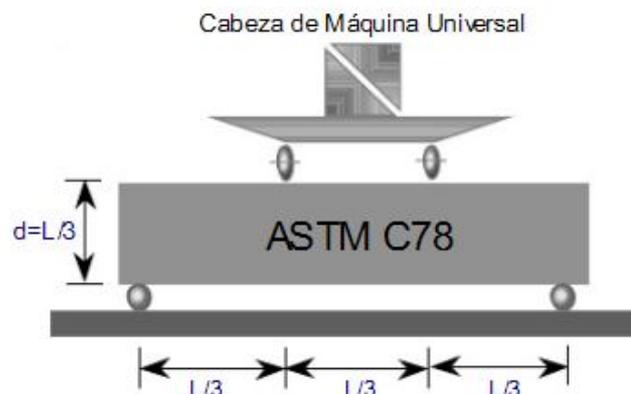


Figura 3.6 Prueba para la obtención de módulo de ruptura.

En la siguiente tabla se muestra el Módulo de Ruptura (MR) recomendado.

Tabla 3.6. Módulo de ruptura

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

AASHTO permite utilizar la resistencia a la flexión promedio que se haya obtenido del resultado de ensayos a flexión de las mezclas diseñadas para cumplir la resistencia especificada del proyecto.

$$MR_{promedio} = MR_{especificado} + Z_r \times (\text{desviación estándar del MR})$$

↓
Desviación normal estándar

Los valores típicos utilizados para la **desviación estándar** son:

Tabla 3.7. Valores típicos de desviación estándar.

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

La **desviación normal estándar (Zr)** define que, para un conjunto de variables (espesor de las capas, características de los materiales, condiciones de drenaje, etc.) que intervienen en un pavimento, el **tránsito que puede soportar el mismo a lo largo de un periodo de diseño**. A continuación se muestra en la Tabla III.8 la desviación normal estándar en función de la confiabilidad (R).

Tabla 3.8. Valores para Zr en función de la Confiabilidad R.

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

Fuente: Guía para el Diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993.

El **módulo de elasticidad del concreto (Ec)** esta relacionado con su módulo de ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. En su defecto correlacionarlo con otras características del material como puede ser su **resistencia a la compresión (f'c)**. Esto es:

$$E_c = 21000 \times f'c^{1/2}$$

f) RESISTENCIA A LA SUBRASANTE

La resistencia a la subrasante se obtiene mediante el **módulo de reacción del suelo (K)** por medio de la prueba de placa.

El **módulo de reacción del suelo** corresponde a la **capacidad portante que tiene el terreno natural en donde se soportará el cuerpo del pavimento.**

El valor del módulo de reacción se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 Y D1196 (Figura 3.7). El resultado de la prueba indica la característica de resistencia que implica la elasticidad del suelo. Esto es igual al coeficiente del esfuerzo aplicado por una placa entre las deformaciones correspondientes, producida por este esfuerzo. Dado que la prueba de placa es tardada y cara, el valor de k, es usualmente estimado por correlación a una prueba simple, tal como la **Relación de Soporte de California (CBR)**. El resultado es válido ya que no se requiere una determinación exacta del valor de k; las variaciones normales de un valor

estimado no afectan apreciablemente los requerimientos del espesor del espesor del pavimento.

Cuando se diseña un pavimento es probable que tenga diferentes valores de K a lo largo del tramo por diseñar, por lo que se recomienda utilizar el valor promedio de los módulos K para el diseño.

Si no se cuenta con información geotécnica del sitio, la Tabla 3.9 proporciona órdenes de magnitud en los módulos de reacción de las capas de apoyo.

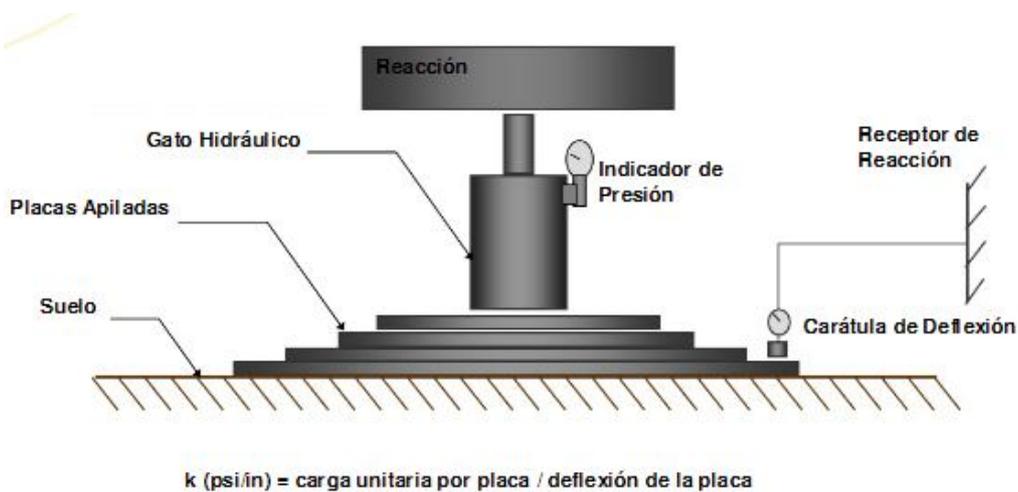


Figura 3.7. Esquema de la prueba de placa ASTM D1195 Y D1196

Tabla 3.9. Tipos de suelo de subrasante y valores aproximados de k.

TIPOS DE SUELO	SOPORTE	RANGO DE VALORES DE K (PCI)
Suelo de grano fino en el cual el tamaño de las partículas de limo y arcilla predominan	Bajo	75 – 120
Arenas y mezclas de arena con gravas, con una cantidad considerable de limo y arcilla	Medio	130 – 170
Arenas y mezclas de arena con grava, relativamente libre de finos.	Alto	180 – 220
Subbase tratada con cemento	Muy alto	250 - 400

Fuente: Salazar Rodríguez Aurelio. Guía para diseño y construcción de pavimentos rígidos

g) DRENAJE

En cualquier tipo de pavimento, el drenaje es un factor importante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil y por lo tanto en el diseño del mismo. Se puede evaluar mediante el **coeficiente de drenaje (Cd)** el cual depende de:

- **Calidad del drenaje.**

Viene determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada de la estructura del pavimento

- **Exposición a la saturación.**

Porcentaje de tiempo durante el año en que un pavimento esta expuesto a niveles de humedad que se aproximan a la saturación. Este valor depende de la precipitación media anual y de las condiciones del drenaje. Para el caso se definen varias condiciones del drenaje:

Tabla 3.10. Calidad del drenaje.

Calidad de drenaje	Tiempo en que tarde el agua en ser evacuada
Excelente	El suelo libera el 50% de agua en 2 horas
Bueno	El suelo libera el 50% de agua en 1 día
Mediano	El suelo libera el 50% de agua libre en 7 días
Malo	El suelo libera el 50% de agua libre en 1 mes
Muy malo	El agua no evacua

Fuente: Guía para el Diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993.

Combinando todas las variables que interviene para llegar a determinar el coeficiente de drenaje Cd, se llega a los valores de la siguiente Tabla:

Tabla 3.11. Valores para el Coeficiente de drenaje Cd

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	más del 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Mediano	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Mala	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy malo	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: Guía para el Diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993.

Es importante evitar que exista presencia de agua, dado que en caso de presentarse afectará en gran medida a la respuesta estructural del pavimento. El agua atrapada puede producir efectos nocivos como:

- Reducción de la resistencia de materiales granulares.
- Reducción de la resistencia de la subrasante.
- Expulsión de finos.
- Levantamientos diferenciales de suelos expansivos.
- Expansión por congelamiento del suelo.

h) CONFIABILIDAD

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

- Confiabilidad R
- Desviación estándar

La **confiabilidad** esta definida como la **probabilidad de que el sistema de pavimento se comporte de manera satisfactoria durante su vida útil** en condiciones adecuadas para su operación. Otra manera de interpretar este concepto sería aquella que la probabilidad de que los problemas de deformación y resistencia estén por debajo de los permisibles durante la vida de diseño del pavimento.

En la Tabla 3.12 se observa la confiabilidad recomendada en función del tipo de camino:

Tabla 3.12. Valores recomendados del nivel de confianza atendiendo al tipo de camino.

Clasificación del camino	Urbano	Rural
Autopistas	85% - 99.9%	80% - 99.9%
Arterias principales	80% - 99%	75% - 99%
Colectoras	80% - 95%	75% - 95%
Locales	50% - 80%	50% - 80%

La confiabilidad recomendado para México se muestra a continuación:

Tabla 3.13. Valores de Confiabilidad para el tipo de pavimento en México.

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

La confiabilidad puede relacionarse con un **Factor de Seguridad** y va asociada con la **desviación estándar (So)** ó también llamado **error estándar**. Este último representa el **número de ejes que puede soportar el pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado índice de servicio final (Pt)**

La desviación estándar (So) relacionada con la confiabilidad (R) se muestra a continuación:

Tabla 3.14. Desviación estándar y confiabilidad.

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

Para una mejor claridad se presenta enseguida un ejemplo para el cálculo del espesor de la losa utilizando el método AASTHO.

EJEMPLO USANDO EL MÉTODO AASTHO

El desarrollo del problema se realizará a partir de los siguientes datos:

- *Módulo de reacción del suelo* (K) = $\frac{10kg}{cm^3}$

Para poder entrar al nomograma se tendrá que convertir a PCI (*libra/pulgada³*)

$$\frac{10kg}{cm^3} \left(\frac{2.2046lb}{1kg} \right) \left(\frac{1cm^3}{6.1024 \times 10^{-2}pulg^3} \right) = 360.65 lb/pulg^3 = 360.65PCI$$

- *Resistencia a la compresión del concreto* $f'c = 300kg/cm^2$
- *Módulo de elasticidad del concreto* Ec

$$Ec = 21000f'c^{1/2}$$

$$Ec = 21000(300)^{1/2} = 3.6 \times 10^5 kg/cm^2$$

$$\frac{3.6 \times 10^5 kg}{cm^2} \left(\frac{2.2046lb}{1kg} \right) \left(\frac{1cm^2}{0.155pulg^2} \right) = 51.20 \times 10^5 lb/pulg^2 = 5 \times 10^6 psi$$

O bien:

$$Ec = 3.6 \times 10^5 (14.223)$$

$$Ec = 5 \times 10^6 psi$$

- *Módulo de ruptura MR* o $S'c = 650psi$
- *Coefficiente de transmisión de carga J* = 2.5

Pavimento de concreto en masa con pasadores en las juntas y acotamientos de concreto.

- *Coefficiente de drenaje Cd* = 1.20

Corresponde a un drenaje de calidad buena y un 1% de porcentaje de tiempo en el que la estructura esta expuesta a niveles próximos a la saturación.

- *Desviación estándar So* = 0.30

- *Indice de serviciabilidad inicial Po* = 4.5
 - *Indice de serviciabilidad final Po* = 2.5
- $$\left. \begin{array}{l} Po = 4.5 \\ Po = 2.5 \end{array} \right\} \Delta PSI = 4.5 - 2.5 = 2.0$$

El número total de ejes equivalentes se obtiene a partir del resultado del aforo del tránsito.

Tabla 3.15. Aforo del tránsito

TIPO DE VEHÍCULOS	PORCENTAJE	VPD
A	50	20500
A₁	25	10250
B	10	4100
C₂	6	2460
C₃	4	1640
T₂ - S₂	3	1230
T₃ - S₂	2	820

El volumen de tránsito real (TDPA) se convierte en tránsito equivalente de ejes sencillos de 8.2ton, mediante la aplicación de los **coeficientes de daño por tránsito por vehículos típicos**. Se considerará tránsito en ambas direcciones.

DETERMINACIÓN DEL TRÁNSITO EQUIVALENTE

Para transformar el tránsito mezclado al correspondiente tránsito equivalente a ejes sencillos de 8.2ton, referido al carril de diseño y considerando que los vehículos transitan en ambas direcciones se explica a continuación:

El coeficiente de distribución es del 30%.

Tabla 3.16. Cálculo de número de ejes equivalentes.

1	2	3	4	5
TIPO DE VEHÍCULOS	TDPA DOS DIRECCIONES	NÚMERO DE VEHÍCULOS CARRIL DE DISEÑO	COEFICIENTE DE DAÑO	NÚM. DE EJES EQUIVALENTES
A	20500	6150	0.0046	28.29
A₁	10250	3075	0.34	1045.5
B	4100	1230	2.0	2460
C₂	2460	738	0.88	649.44
C₃	1640	492	0.88	432.96
T₂ - S₂	1230	369	4.0	1476
T₃ - S₂	820	246	5.0	1230
			TOTALES (T ₀) =	7322.19

De la Tabla 3.16, el número de vehículos del carril de diseño (columna 3) se obtiene multiplicando el TDPA (columna 2) por el coeficiente de distribución de 30% el cual fue seleccionado en función del número de carriles (8 en este caso).

El coeficiente de distribución se obtiene según la siguiente tabla y de acuerdo al número de carriles que se esté diseñando.

Tabla 3.17. Coeficiente de distribución.

NÚMERO DE CARRILES EN AMBAS DIRECCIONES	COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN PARA EL CARRIL DEL PROYECTO
2	50%
4	40 – 50%
6 o más	30 – 40%

Recomendaciones dadas por el Instituto de Ingeniería

Regresando a la Tabla 3.16, el número de ejes equivalentes (columna 5) para cada renglón se determina multiplicando el número de vehículos del carril de diseño (columna 3) por el coeficiente de daño (columna 4) que se obtiene a partir de la tabla 3.18. La suma de estos resultados parciales se tiene al final de la columna 5. Cada una de estas sumas representa el tránsito equivalente en ejes simples de 8.2ton, referido a un canal de diseño y a un día medio del año.

Tabla 3.18. Coeficiente de daño por tránsito para vehículos típicos.

NOTA
 k_1 : Coeficiente de equivalencia para el vehículo vacío
 k_2 : Coeficiente de equivalencia para el vehículo cargado

Eje	CARACTERÍSTICAS			COEFICIENTES DE DAÑO				COEFICIENTES DE DAÑO				
	Peso, ton	Cargado	Vacio	CARGADO, F				VACIO, F ^a				
				z = 0	z = 15	z = 22.5	z = 30	z = 0	z = 15	z = 22.5	z = 30	
Ap 	1	1.0	0.8	2.0	0.0023	0.000	0.000	0.000	0.0023	0.000	0.000	0.000
	2	1.0	0.8	2.0	0.0023	0.000	0.000	0.000	0.0023	0.000	0.000	0.000
	3											
	Σ	2.0	1.6	-	0.0046	0.000	0.000	0.000	0.0046	0.000	0.000	0.000
Ac 	1	1.6	1.2	4.2	0.17	0.002	0.001	0.000	0.17	0.001	0.000	0.000
	2	3.3	1.2	4.2	0.17	0.040	0.010	0.010	0.17	0.000	0.000	0.000
	3											
	Σ	4.9	2.4	-	0.34	0.042	0.011	0.010	0.34	0.001	0.000	0.000
B 	1	4.2	3.0	5.8	1.0	0.150	0.080	0.050	1.0	0.040	0.015	0.007
	2	8.3	7.0	5.8	1.0	1.000	1.020	1.050	1.0	0.600	0.500	0.500
	3											
	Σ	12.5	10.0	-	2.0	1.150	1.100	1.100	2.0	0.640	0.515	0.507
C2 	1	2.5	1.5	5.0	0.44	0.025	0.008	0.002	0.44	0.002	0.000	0.000
	2	6.8	2.7	5.0	0.44	0.440	0.440	0.440	0.44	0.025	0.008	0.003
	3											
	Σ	9.3	4.2	-	0.88	0.465	0.448	0.442	0.88	0.027	0.008	0.003
C3 	1	2.6	1.7	5.0	0.44	0.025	0.008	0.003	0.44	0.004	0.001	0.000
	2	14.0	5.2	5.0	0.44	0.650	0.650	0.650	0.44	0.040	0.010	0.006
	3											
	Σ	16.6	6.9	-	0.88	0.675	0.658	0.653	0.88	0.044	0.011	0.006
T2-S1 	1	3.0	2.5	5.8	1.0	0.040	0.015	0.007	1.0	0.020	0.006	0.002
	2	8.0	3.6	5.8	1.0	0.900	0.900	0.900	1.0	0.080	0.030	0.020
	3	7.8	3.0	5.8	1.0	0.800	0.800	0.800	1.0	0.040	0.015	0.007
	Σ	18.8	9.1	-	3.0	1.740	1.715	1.707	3.0	0.140	0.051	0.029
T2-S2 	1	4.0	3.5	5.8	1.0	0.120	0.060	0.030	1.0	0.080	0.030	0.020
	2	8.5	4.0	5.8	1.0	1.000	1.020	1.050	1.0	0.120	0.060	0.030
	3	12.1	3.8	5.8	2.0	0.450	0.400	0.400	2.0	0.010	0.002	0.001
	Σ	24.6	11.3	-	4.0	1.570	1.480	1.480	4.0	0.210	0.092	0.051
T3-S2 	1	3.9	3.5	5.8	1.0	0.100	0.050	0.025	1.0	0.080	0.030	0.020
	2	13.0	5.4	5.8	2.0	0.600	0.500	0.500	2.0	0.040	0.015	0.007
	3	13.0	5.0	5.8	2.0	0.600	0.500	0.500	2.0	0.030	0.010	0.005
	Σ	29.9	13.9	-	5.0	1.300	1.050	1.025	5.0	0.150	0.055	0.032

CÁLCULO DEL TRÁNSITO EQUIVALENTE ACUMULADO

El tránsito acumulado de ejes equivalentes de 8.2ton durante un periodo de n años de servicio se calcula mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$\Sigma In = C' \times To$$

Donde:

ΣIn = tránsito acumulado durante n años de servicio y tasa de crecimiento r, en ejes equivalentes de 8.2ton.

To = tránsito medio diario en el primer año de servicio para el carril de diseño, en ejes equivalentes de 8.2ton.

C' = coeficiente de acumulación de tránsito para n años de servicio y una tasa de crecimiento anual r, que se puede obtener mediante la ecuación siguiente:

$$C' = 365 \left[\frac{(1 + r)^n - 1}{r} \right]$$

Considerando un periodo de diseño para 15 años y una tasa de crecimiento anual de 4% se determina el coeficiente de acumulación de tránsito:

$$C' = 365 \left[\frac{(1 + 0.04)^{15} - 1}{0.04} \right] \quad C' = 7308.61$$

Por lo tanto:

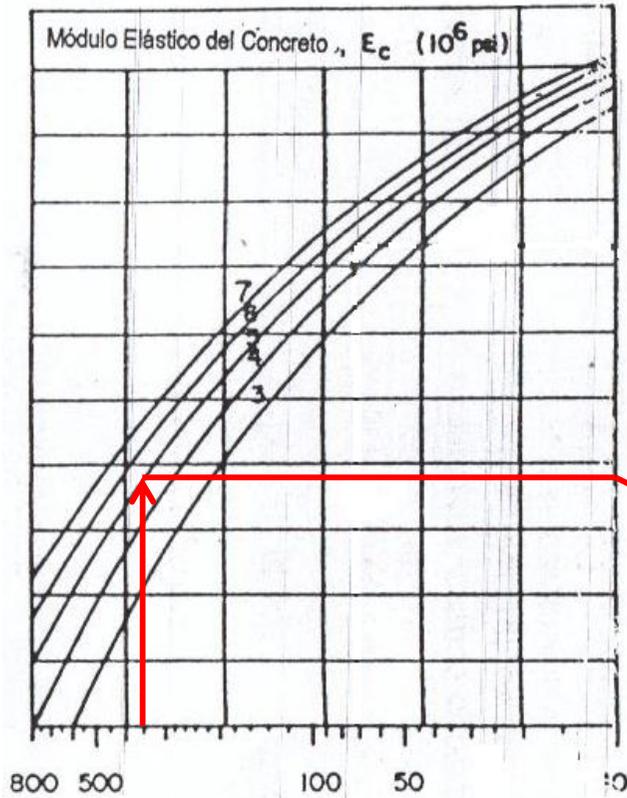
$$\Sigma In = 7308.61 \times 7322.19 = \mathbf{53515027.31}$$

Es decir; que el número total de ejes equivalentes de 18kips (8.2ton) es de 53 515 027.31.

En la siguiente tabla se concentran los datos calculados de las diferentes variables para poder entrar al nomograma y obtener el espesor de la losa.

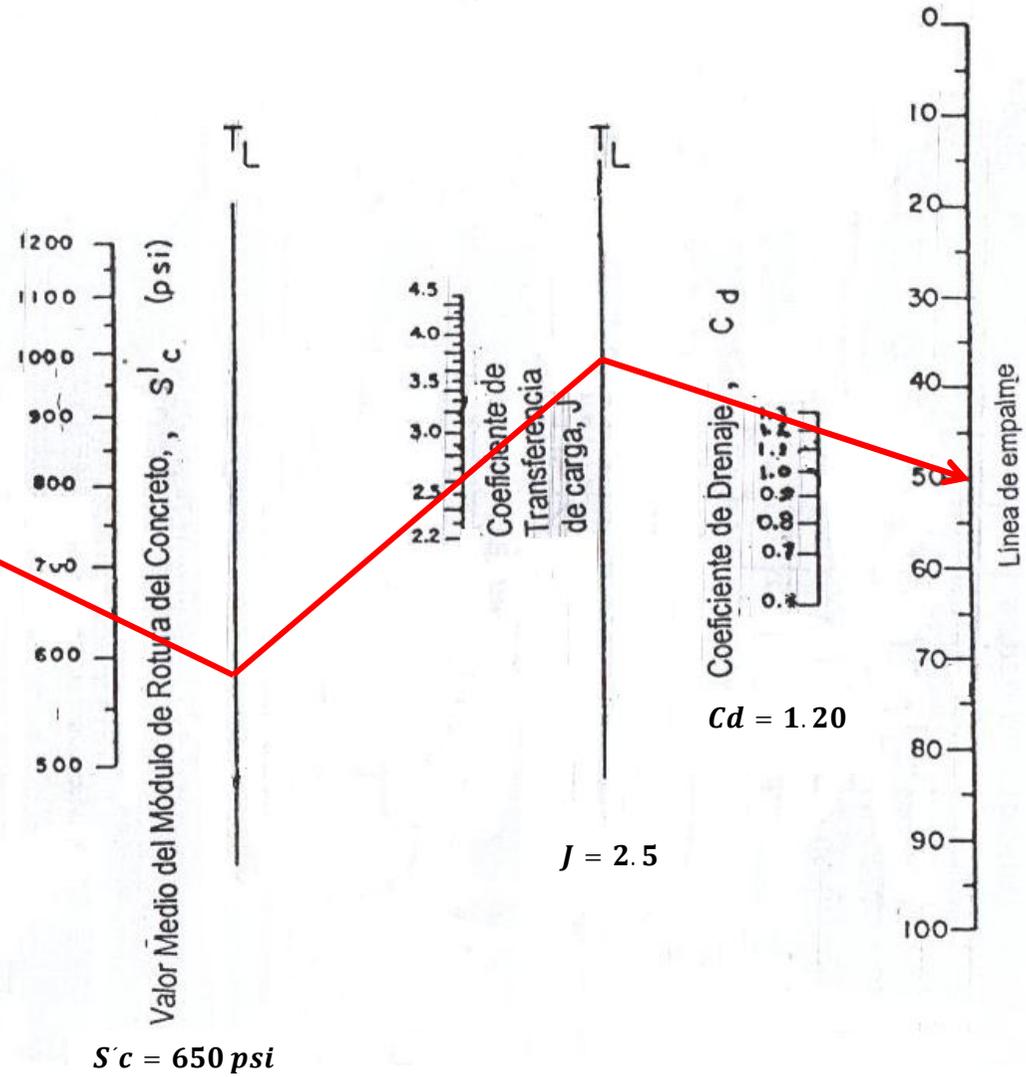
NOMBRE DE LA VARIABLE	VARIABLE (UNIDADES)	VALOR DE LA VARIABLE
Módulo de reacción del suelo	$K = \text{PCI}$	360.36
Módulo de elasticidad del concreto	$E_c = \text{PSI}$	5×10^6
Módulo de ruptura	$MR = \text{PSI}$	650
Coefficiente de transferencia de carga	$J = \text{Adim.}$	2.5
Coefficiente de drenaje	$C_d = \text{Adim.}$	1.20
Pérdida de serviciabilidad	$\Delta\text{PSI} = \text{Adim.}$	2.0
Confiabledad	$R = \%$	90
Desviación estándar	$S_o = \text{Adim.}$	0.30
Carga equivalente	$\text{ESAL's} = \text{kip } 10^6$	53 515 027.31

Debajo de cada escala del nomograma se indica el dato de cada variable.

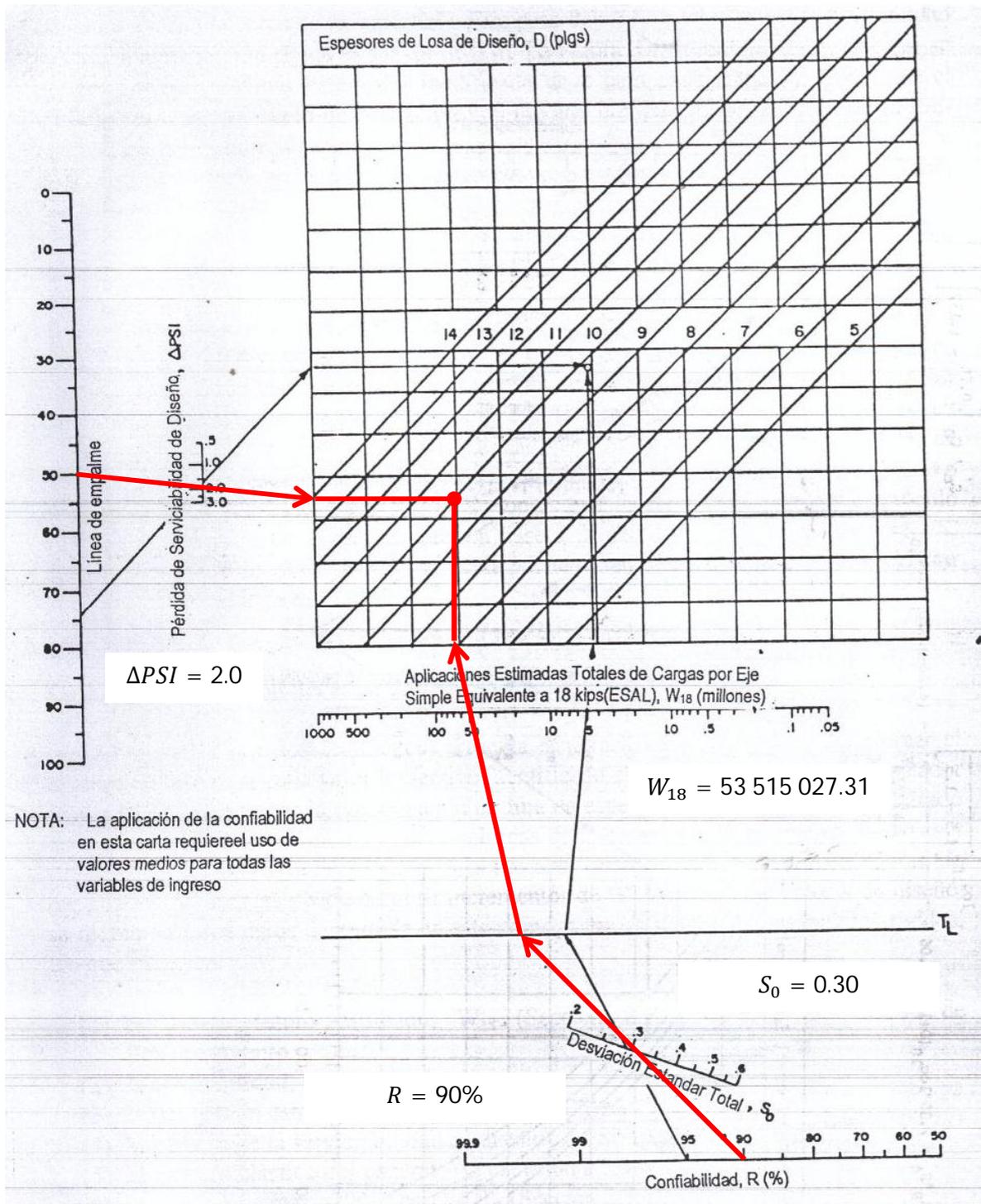


$K = 360.36 \text{ PCI}$

$E_c = 5 \times 10^6 \text{ psi}$



$S_c = 650 \text{ psi}$



El espesor del pavimento obtenido es de **10 pulgadas (25cm)**.

III.2 Definición, función y tipo de juntas

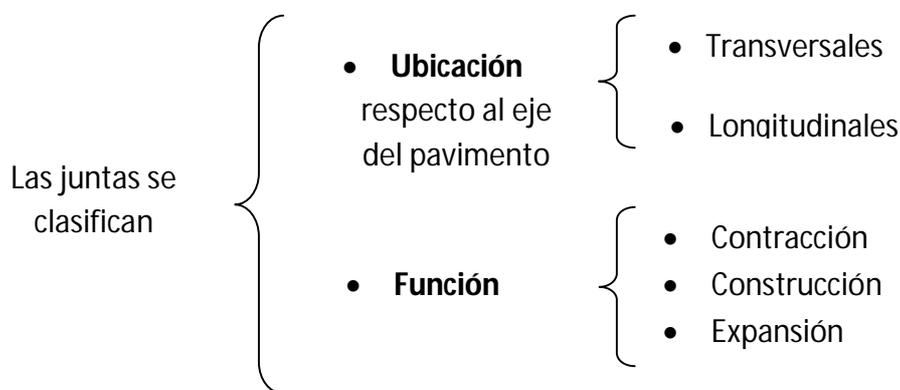
Debido a los cambios volumétricos que por su naturaleza experimenta el concreto y a los sistemas constructivos de los pavimentos rígidos, se hace necesaria la construcción de **juntas y/o uniones entre paños o losas de un pavimento.**

La función de las juntas consiste en:

- Mantener las tensiones que se desarrollan en la estructura de un pavimento dentro de los valores admisibles del concreto o disipar tensiones debidas a agrietamientos inducidos debajo de las mismas juntas.
- Controla el agrietamiento transversal y longitudinal.
- Divide al pavimento en secciones adecuadas por efecto de las cargas de tránsito.
- Permite la transferencia de cargas entre losas.

Los tipos de juntas más comunes en los pavimentos rígidos caen dentro de dos clasificaciones: transversales y longitudinales que a su vez se clasifican como de contracción, construcción y de expansión.

Las juntas se pueden clasificar según el siguiente cuadro.



Las juntas longitudinales se utilizan para tender franjas nuevas de la losa sobre tendidos ya existentes, mientras que las juntas transversales se utilizan para controlar el agrietamiento transversal .

En la siguiente tabla se muestran los tipos más comunes de juntas y sus funciones principales.

Tabla 3.19. Tipos de juntas y sus funciones

TIPO DE JUNTA	FUNCIÓN
Juntas transversales de contracción	Son las que se construyen ortogonalmente al eje del trazo del pavimento. Su espaciamiento es para evitar agrietamiento provocado por los esfuerzos debidos a cambios de temperatura, humedad y secado.
Juntas transversales de construcción	Son las ejecutadas al final de cada día de labores o aquéllas realizadas por necesidades de proyecto en instalaciones o estructuras existentes. Ejemplo: cambios de pendiente como los accesos de puentes. Normalmente se planean con oportunidad desde la etapa de planeación. Ver Figura 3.8.
Juntas transversales de expansión/aislantes	Son aquéllas que permiten el movimiento horizontal o los desplazamientos del pavimento respecto a las estructuras existentes como puentes, alcantarillas, en el cruce o unión de dos calles. Estas se colocan para controlar las dilataciones del concreto.
Juntas longitudinales de contracción	Son aquéllas que dividen a los carriles en la dirección longitudinal, o las ejecutadas en donde se construyen dos o más anchos de carriles al mismo tiempo. Influyen en el buen comportamiento de los pavimentos rígidos. Es muy importante el refuerzo ya que reduce el espesor de la losa y aumenta la vida útil del pavimento, así como el espaciamiento de las juntas. El refuerzo es mediante pasajuntas de acero lisas y engrasadas para que no se adhieran al concreto y estén protegidas contra la corrosión y así mismo puedan transmitir contante a losas vecinas.
Juntas longitudinales de construcción	Son aquéllas juntas existentes entre dos carriles contruidos en diferentes etapas. Como su nombre lo dice, se utilizan para controlar las grietas longitudinales de contracción, así mismo para determinar el ancho del carril. Pueden realizarse al colocar las franjas longitudinales del pavimento. Llevan barras de sujeción, colocadas a la mitad del espesor para evitar deslizamientos laterales de las losas. Ver Figura 3.9.

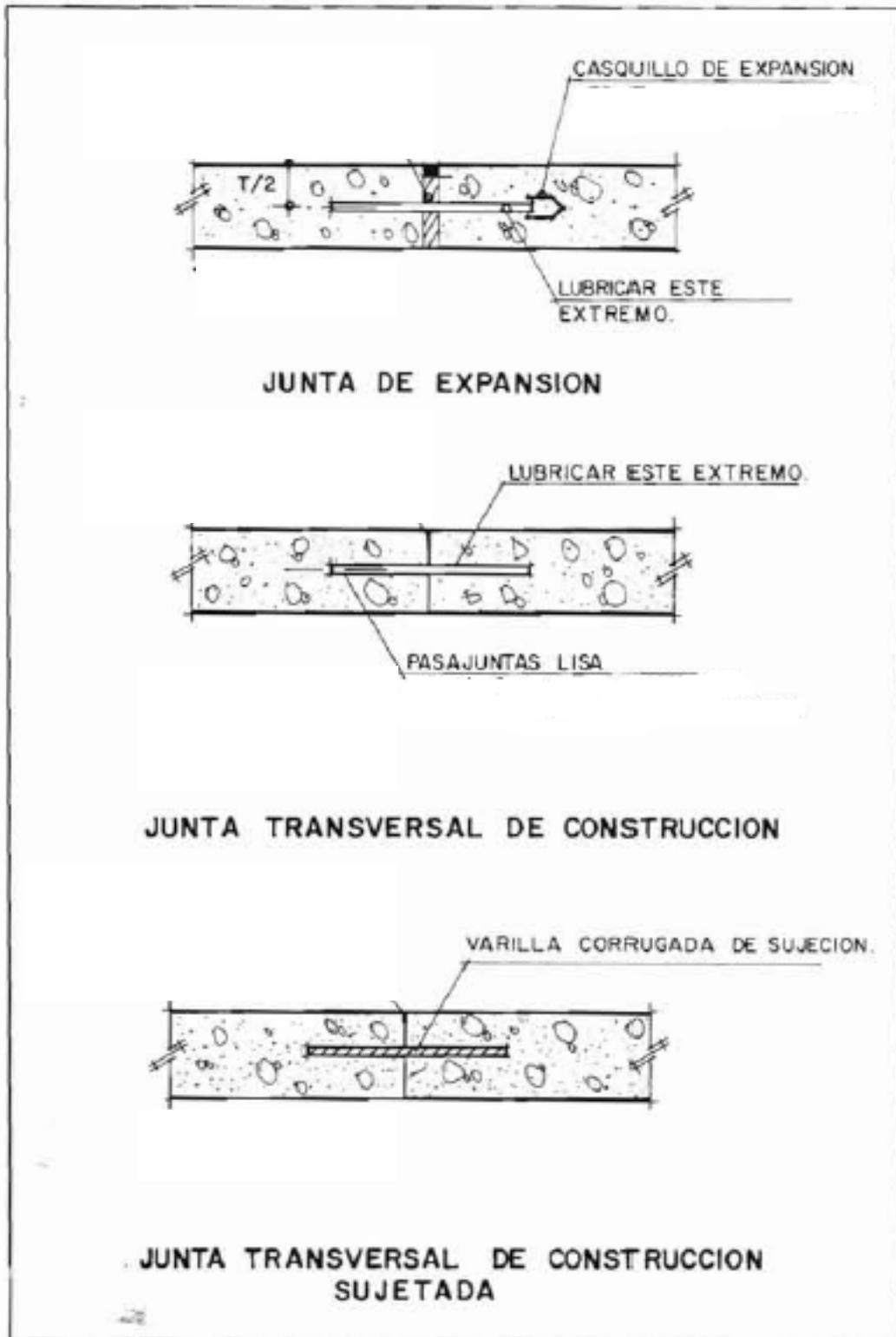


Figura 3.8 Junta transversal de construcción.

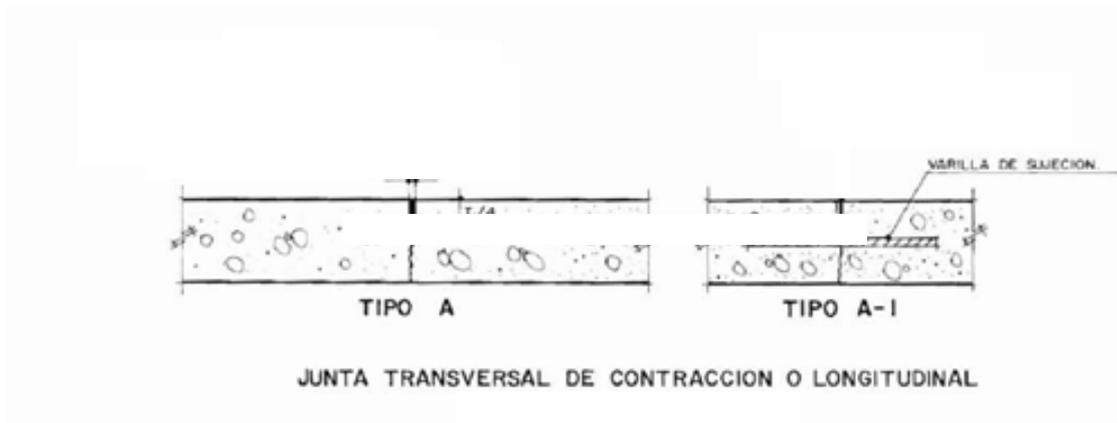


Figura 3.9. Junta longitudinal de contracción.

Un pavimento podrá diseñarse con o sin juntas, ello estará en función del tipo de estructura deseada, el tipo de tránsito y de las condiciones ambientales. En general se recomienda el empleo de pasajuntas para tránsitos intensos y pesados.

El factor J representa la cantidad de transferencia de carga que se espera a lo largo de la junta para un periodo de diseño particular del pavimento dicho concepto que se explicó con más detalle en el tema III.1 Diseño de Pavimentos.

Las juntas son muy importantes en la duración de la estructura, siendo una de las pautas para calificar la bondad de un pavimento. En consecuencia la conservación y oportuna reparación de las fallas en las juntas son decisivas para la vida de servicio de un pavimento.

III.3 Diseño de pasajuntas

Las pasajuntas son barras de acero liso y redondo colocadas transversalmente a las juntas para transferir las cargas del tráfico sin restringir los movimientos horizontales de las juntas. Además mantienen a las losas alineadas horizontal y verticalmente.

Las pasajuntas reducen las deflexiones y los esfuerzos en las losas de concreto, así como el potencial de diferencias de elevación en las juntas, bombeo (expulsión de finos a través de las juntas) y rupturas en las esquinas. Por lo que toda esta reducción de deflexiones y esfuerzos en las losas al transmitir efectivamente la carga a lo largo de las juntas se traduce en un incremento en la vida de servicio del pavimento.

Existen formas teóricas para estimar diámetros y longitudes de pasajuntas, sin embargo, es común emplear criterios prácticos para su diseño. La Tabla 3.20 muestra algunos valores recomendados a manera de guía.

Tabla 3.20. Diámetros y longitudes de las pasajuntas de acuerdo al espesor de la losa.

Espesor de la losa(cm)	Diámetro de pasajuntas (pulgadas)	Longitud de pasajunta (cm)
12.5	5/8	30
15	3/4	36
18	7/8	36
20	1	36
23	1 1/8	40
25	1 1/4	46
28	1 3/8	46
31	1 1/2	51

Sin embargo es recomendable emplear pasajuntas de diámetros de 1 1/4" para espesores de losa mayores de 25cm y de 1" para espesores iguales o menores a 25 cm.

Las pasajuntas se colocan para transmitir las cargas de una losa a otra. Dependiendo de las deflexiones que experimenten dos losas ligadas por pasajuntas, al ser solicitadas por el tránsito, se tendrá mayor o menor eficiencia. (ver Figura 3.3 y Figura 3.4 del tema III. Diseño de Pavimentos)

En la Figura 3.3 no se transmite carga de una losa hacia la otra, mientras que en la Figura 3.4 la acción de la pasajunta permite que la carga del vehículo, tanto cuando entra como cuando sale, la distribuya entre las dos losas. Es así que la transferencia de carga puede definirse como la capacidad que tiene dos secciones de losa para transmitir parte de la carga aplicada de una sección otra. Se mide, por lo que se le denomina "Factor de Eficiencia"

$$E = \frac{2(Def.)_{desc}}{(def.)_{cargada} + (def.)_{desc}} \quad Ec. 1$$

$(def.)_{cargada}$ y $(def.)_{desc}$ son las deflexiones de la losa del lado cargado y descargado, respectivamente.

La efectividad de las juntas puede evaluarse en campo, ya sea en términos de desplazamientos o en términos de esfuerzos.

$$J_{es} = \frac{\sigma_u}{\sigma_l} \quad Ec. 2$$

Donde:

J_{es} = eficiencia ante esfuerzos en la junta.

σ_u = esfuerzo en la losa sin carga.

σ_l = esfuerzo en la losa cargada en la zona de la junta .

El tamaño y espaciamiento de las pasajuntas viene regido por el esfuerzo permisible de la pasajunta ante cortante, así como la misma resistencia, pero ahora del concreto.

El esfuerzo portante permisible vendrá entonces definido en la forma:

$$fb = \left[\frac{4 - d}{3} \right] f'c \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

fb = esfuerzo máximo a que la pasajunta puede estar sujeta, en $\frac{kg}{cm^2}$

d = diámetro de la pasajunta.

$f'c$ = resistencia a la compresión del concreto

La máxima deflexión sería.

$$y_0 = \frac{Pt[2 + \beta Z]}{4\beta^3 E_d l_d} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

y_0 = deflexión de la pasajunta en la cara de la junta.

Pt = carga en una pasajunta.

Z = ancho de la junta.

E_d = módulo de elasticidad de la pasajunta.

l_d = momento de inercia de la pasajunta.

β = rigidez relativa de una pasajunta emportada en el concreto.

Si se sabe que:

$$l_d = (1/64) \Pi d^4 \qquad \beta = \frac{\sqrt{kd}}{4Edld} \qquad Ec. 5$$

Donde:

k = módulo de reacción del apoyo de la pasajunta la cual varía

entre $8000 \frac{kg}{cm^3}$ y $41520 \frac{kg}{cm^3}$

d = diámetro de la pasajunta.

La ecuación del esfuerzo queda en términos de la deflexión.

$$\sigma = kyo = \frac{kPt(2 + \beta z)}{4\beta^3 Edld} \qquad Ec. 6$$

Esta ecuación se deberá comprobar con el valor que proporciona la Ec. 3, o sea, el permisible. Si el esfuerzo debido a Pt es mayor que el calculado por esta última ecuación, entonces se deberá reducir el espaciamiento entre las pasajuntas, o incrementar el diámetro de ésta.