

2.4 METODO DE DISEÑO AASHTO

“El método de diseño AASHTO es uno de métodos más utilizados a nivel internacional para el diseño de pavimentos de concreto hidráulico.”

a).- ANTECEDENTES – PRUEBA AASHO

La prueba de pavimentación que en su momento se conoció como AASHO, por sus siglas en inglés y debido a que en aquel entonces no estaba integrado el departamento del transporte de EU a esta organización. Fue concebida y promovida gracias a la organización que ahora conocemos como AASHTO (*“American Association of State Highway and Transportation Officials”*) para estudiar el comportamiento de estructuras de pavimento de espesores conocidos, bajo cargas móviles de magnitudes y frecuencias conocidas y bajo el efecto del medio ambiente. Fue formulada por el consejo de investigación de carreteras de la academia nacional de ciencias – consejo nacional para la investigación, la planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto comenzó en 1956 muy cerca de Ottawa, Illinois. EL tráfico controlado de la prueba se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960, o sea, durante más de dos años.

El objetivo principal de las pruebas consistía en determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas, o bien para determinar las relaciones significativas entre un número de repeticiones de ejes con cargas, de diferente magnitud y disposición, y el comportamiento de diferente espesores de pavimentos, conformados con bases y sub-bases, colocados en suelos de características conocidas.

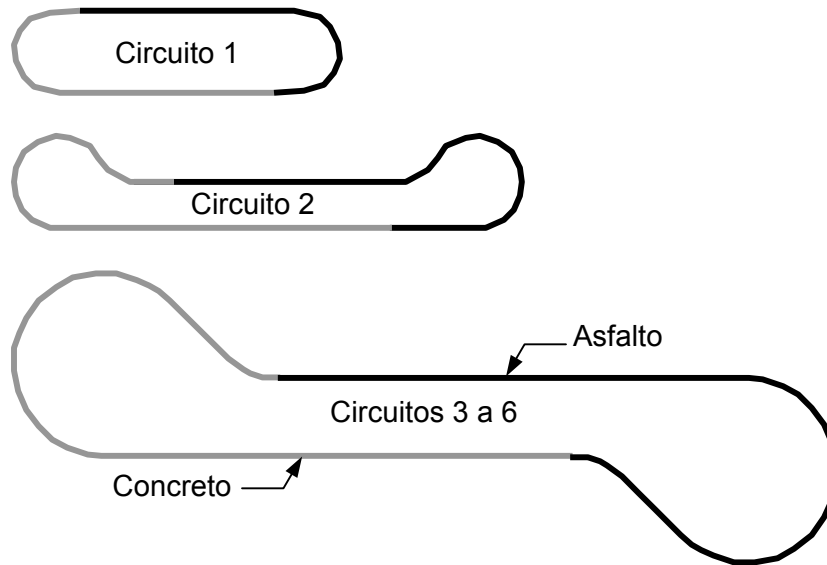
El sitio cerca de Ottawa, seleccionado para la prueba, tiene condiciones climáticas y de suelo típicas de algunas áreas de Estados Unidos y Canadá. Esto hace que la aplicabilidad del método deba utilizarse con criterio para otras partes del mundo.

Los pavimentos se construyeron en circuitos a lo largo de una sección de 8 millas de una futura autopista interestatal.

Se realizaron 6 circuitos de prueba, todos eran tramos de dos carriles y tenían la mitad del tramo en pavimento de concreto y la otra en pavimento flexible. El Circuito 1 se dejó sin cargas para evaluar el impacto del Medio Ambiente en los pavimentos. El Circuito 2 se utilizó con aplicaciones de cargas de camiones ligero. En los Circuitos de 3 al 6 se realizaron aplicaciones de carga con camiones pesados. Los circuitos 5 y 6 tuvieron idénticas configuraciones y combinaciones de carga.

Cada circuito consistía de dos largas carreteras paralelas conectadas en los extremos por retornos, las secciones de prueba de los pavimentos estaban localizadas en las rectas o tangentes de cada circuito.

Geometría de los Circuitos



La sección estructural de prueba tenía una longitud de 30 m en pavimentos flexibles, 36 m en pavimentos de concreto simple y 80 m en pavimentos continuamente reforzados. Las secciones de prueba tanto de flexible como de pavimento rígido fueron construidas sobre idénticos terraplenes. También se examinaron bajo las mismas condiciones climáticas, por el mismo número de cargas aplicadas, el mismo tráfico y velocidades de operación.

En total se examinaron 368 secciones de pavimento rígido y 468 secciones de pavimento flexible.

El tráfico que se utilizó en la prueba, estaba perfectamente controlado, se iniciaron las repeticiones de carga en noviembre de 1958, de la siguiente manera:

En los circuitos de camiones pesados, Circuitos 3-6:

- inicialmente 6 vehículos por carril
- posteriormente se aumento a 10 vehículos por carril (en enero 1960)

El tiempo de Operación de los vehículos fue de:

- 18 horas 40 minutos
- 6 días de la semana

En Total se aplicaron:

- 1,114,000 Repeticiones de Carga Normal
- Corresponiendo aproximadamente a 6.2 millones de ESAL's

b).- CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LA PRUEBA

Los principales experimentos sobre pavimentos fueron diseñados de modo que los resultados de las pruebas fueran estadísticamente significativas. Las secciones de prueba de los pavimentos de varios espesores fueron sometidas a tráfico controlado. Las secciones examinadas representaban todas las combinaciones de los factores de diseño para concreto y asfalto. Cada circuito de tráfico contenía algunas secciones que no formaban parte de los principales experimentos sobre pavimentos. Estas secciones se incluyeron para estudios especiales tales como los efectos de acotamientos pavimentados y bases estabilizadas en el comportamiento del pavimento.

Dos de las técnicas aleatorias y de réplica estadísticas que se emplearon al diseñar los experimentos principales fueron la aplicación aleatoria que garantizó que un diseño dado tuviera la misma oportunidad de estar localizado en un lugar en un tramo recto de prueba, que una sección de cualquiera de los diseños. Las posiciones de los cuatro circuitos de prueba más importantes se localizaron al azar. La réplica garantizó que varios de los diseños aparecieran en dos secciones en el mismo para verificar la Confiabilidad.

Las mediciones del comportamiento de un pavimento en términos de su capacidad para soportar el tráfico con seguridad y comodidad en la esencia del concepto de capacidad de servicio. Su desarrollo para convertirlo en un procedimiento trabajable por parte del personal de la Prueba de Carreteras constituyó una aportación muy importante a la ingeniería de carreteras. El nivel requerido de servicio de un pavimento depende de la función que requiera dársele al pavimento.

Los factores que tuvieron mayor peso en la determinación de la capacidad de servicio fueron:

- Variaciones en el perfil longitudinal
- Mediciones de la aspereza del pavimento en la dirección del movimiento.
- Profundidad promedio de las roderas medida con regla de 1.20 m
- Medidas de Agrietamientos severos
- Medidas de Baches

Las mediciones físicas de las secciones de prueba se transfirieron a fórmulas que podían dar nuevamente valores numéricos de capacidad de servicio. Estos valores graficados contra las aplicaciones de carga forman una historia de comportamiento para cada sección de prueba que permiten la evaluación de cada uno de los diversos diseños.

Tres comparaciones que pueden usarse para evaluar el comportamiento de las secciones de prueba son:


- El número de aplicaciones de carga sobre un eje
- El índice de capacidad de servicio de la sección en un momento determinado
- La tendencia hacia la capacidad de servicio vs la capacidad de servicio

Los resultados que se obtuvieron en los circuitos se muestran a continuación:

Circuito 2 – Tráfico Ligero

2.4 METODO DE DISEÑO AASHTO

		SUB-BASE		0"		3"		6"	
				SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO
 Carril 1 → Carril 2 →	2.5" 2.5"	ESPESOR DE CONCRETO		4.3	4.2	4.4	4.2	4.4	4.4
				555	469	2.2	840	3.1	3.8
3.5" 3.5"			4.2	4.4	4.0	4.1	4.2	4.5	
			3.7	4.1	4.0	4.1	4.0	4.6	
5" 5"			4.1	4.3	3.9	4.6	4.1	4.3	
			4.1	4.5	4.1	4.6	4.0	4.3	

		BASE		0"		3"		6"	
				0"	4"	0"	4"	0"	4"
 Carril 1 → Carril 2 →	1" 1"	ESPESOR DE ASFALTO		52	80	552	2.5	2.8	3.2
				2	2	70	73	106	570
2" 2"			645	1.7	3.8	3.5	3.4	3.6	
			74	87	250	582	3.5	3.2	
3" 3"			3.0	3.3	3.8	3.8	3.6	3.9	
			104	106	710	2.7	3.1	3.6	

Se muestran las diferentes secciones probadas tanto de concreto como de asfalto con las diferentes combinaciones de sub-base, base y carpeta.

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

Secciones que permanecieron en buenas condiciones, el número interior corresponde al índice de servicio al final de la prueba.

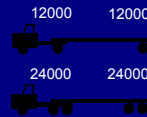

Secciones que permanecieron en regulares condiciones, el número interior corresponde al índice de servicio al final de la prueba.

Secciones que llegaron a la falla, el número interior corresponde al numero de aplicaciones de carga con el que llegaron a la falla.

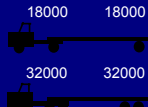
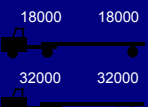
Las secciones de la parte superior corresponden al concreto y las de la parte inferior corresponden al asfalto.

A continuación se muestran los resultados de los otros circuitos:

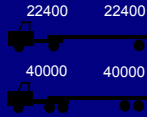
Circuito 3 – Cargas Pesadas


		SUB-BASE		3"		6"		9"		
		SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	
 Carril 1 → Carril 2 →	3.5"	315	278	289	273	289	324			
	5"	3.7	2.8	3.5	725	3.7	3.3			
ESPESOR DE CONCRETO	6.5"	4.4	4.2	4.1	4.3	4.2	4.4			
	8"	4.4	4.3	4.3	4.2	4.0	4.1			
		BASE		0"		3"		6"		
		0"	4"	8"	0"	4"	8"	0"	4"	8"
 Carril 1 → Carril 2 →	2"	64	4	73	65	73	88	77	90	722
	3"	77	87	100	72	87	561	87	589	1.6
ESPESOR DE ASFALTO	4"	78	78	109	80	109	611	178	2.3	3.6
		64	3	74	70	76	80	72	81	555
		72	80	91	75	86	111	80	102	614
		72	80	88	88	100	588	175	627	3.3

Circuito 4 – Cargas Pesadas

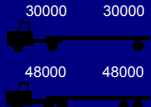
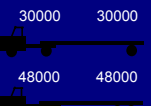
		SUB-BASE	3"		6"		9"				
			SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO			
	Carril 1	→	716	415	353	325	291	592			
	Carril 2	→	343	304	328	175	289	408			
ESPESOR DE CONCRETO	5"										
	6.5"		3.8	3.8	4.4	3.4	3.0	1.8			
			687	2.6	3.4	796	722	1036			
	8"		4.4	3.9	4.4	4.4	4.3	4.3			
			4.1	4.0	4.2	4.4	4.1	4.2			
	9.5"		4.2	4.0	4.5	4.5	4.1	4.8			
		4.0	4.0	4.2	4.3	4.2	4.2				
Circuito 4 CONCRETO											
		BASE	0"			3"			6"		
			4"	8"	12"	4"	8"	12"	4"	8"	12"
	Carril 1	→	2	72	82	74	82	583	80	92	1.6
	Carril 2	→	12	74	106	76	86	601	80	570	618
ESPESOR DE ASFALTO	3"										
	4"		78	107	426	87	100	1110	90	1.9	1.9
			83	102	576	93	151	796	120	2.0	3.1
	5"		88	119	676	125	589	592	641	3.6	3.3
			102	126	850	151	752	2.2	734	2.7	2.7

Circuito 5 – Cargas Pesadas

		SUB-BASE		3"		6"		9"	
		SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO
 Carril 1 Carril 2	6.5"	760	898	898	369	705	708		
		335	705	369	305	698	618		
ESPESOR DE CONCRETO	8"	4.2	1104	4.2	4.0	1111	4.6		
		4.2	915	3.7	901	898	3.2		
	9.5"	4.4	4.3	3.7	4.5	4.5	4.4		
		4.3	4.1	4.0	4.3	3.8	4.6		
	11"	4.1	4.1	4.5	4.4	4.5	4.4		
		4.3	4.3	4.5	4.3	4.4	4.4		

		BASE			3"			6"			9"		
		4"	8"	12"	4"	8"	12"	4"	8"	12"	4"	8"	12"
 Carril 1 Carril 2	3"	70	72	87	72	76	408	81	87	2.9			
		4	74	114	75	77	555	82	106	655			
ESPESOR DE ASFALTO	4"	71	82	104	80	109	605	102	490	2.4			
		66	82	102	82	330	549	111	401	3.0			
	5"	78	103	756	101	652	2.0	624	2.7	3.5			
		90	129	1.9	113	1.9	2.4	627	2.6	3.2			

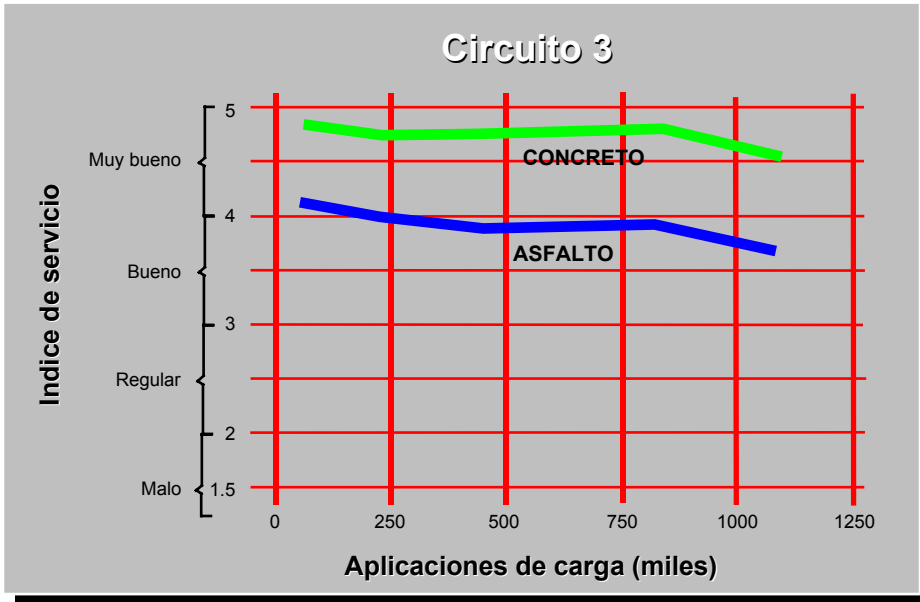
Circuito 6 – Cargas Pesadas

		SUB-BASE		3"		6"		9"				
				SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO	SIMPLE	REFORZADO			
	Carril 1	→		878	782	3.9	974	3.4	768			
	Carril 2	→		1.8	618	4.1	415	1114	624			
Circuito 6 CONCRETO	ESPESOR DE CONCRETO	8"		3.6	4.5	4.3	4.0	4.2	2.2			
		9.5"		3.1	4.4	4.3	4.0	4.3	912			
		11"		4.2	4.4	4.2	4.0	4.3	4.2			
		11"		4.3	4.4	4.3	4.1	4.3	4.1			
		12.5"		4.2	4.4	4.0	4.2	4.2	4.5			
		12.5"		4.3	4.3	4.2	4.4	4.4	4.2			
		12.5"		4.3	4.3	4.2	4.4	4.4	4.2			
		12.5"		4.3	4.3	4.2	4.4	4.4	4.2			
		BASE		3"		6"		9"				
		SUB-BASE		8"	12"	16"	8"	12"	16"			
	Carril 1	→		72	373	134	82	83	552	82	353	2.0
	Carril 2	→		80	573	621	373	100	621	242	737	3.2
ASFALTO	ESPESOR DE ASFALTO	4"		78	101	573	100	634	1.8	595	719	3.3
		5"		103	419	652	105	595	809	624	722	3.5
		6"		141	113	627	106	1.6	3.2	624	2.8	2.7
		6"		579	485	2.4	250	3.0	3.9	2.6	2.6	3.6
		6"		579	485	2.4	250	3.0	3.9	2.6	2.6	3.6
		6"		579	485	2.4	250	3.0	3.9	2.6	2.6	3.6

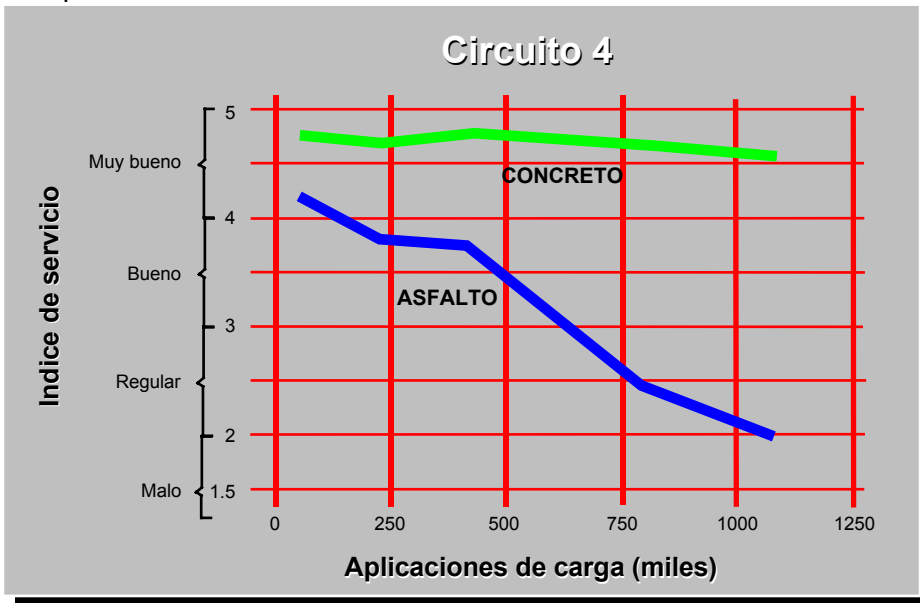
En general se puede observar que el comportamiento que mostraron los pavimentos de concreto fue sustancialmente mejor que el de los pavimentos flexibles.

El índice de servicio general que tuvieron los principales tramos de prueba y su comportamiento fue como se muestra a continuación:

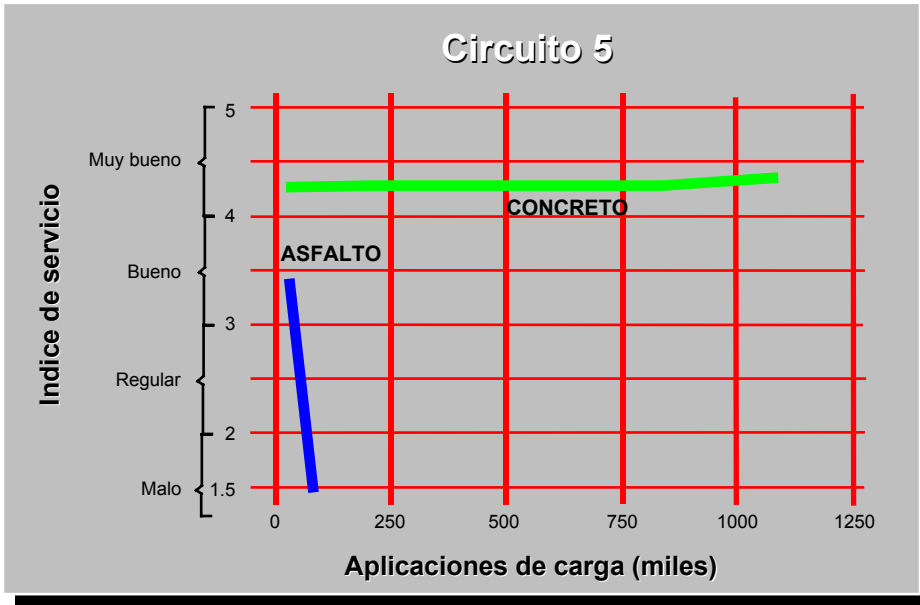
Comportamiento General del Circuito 3



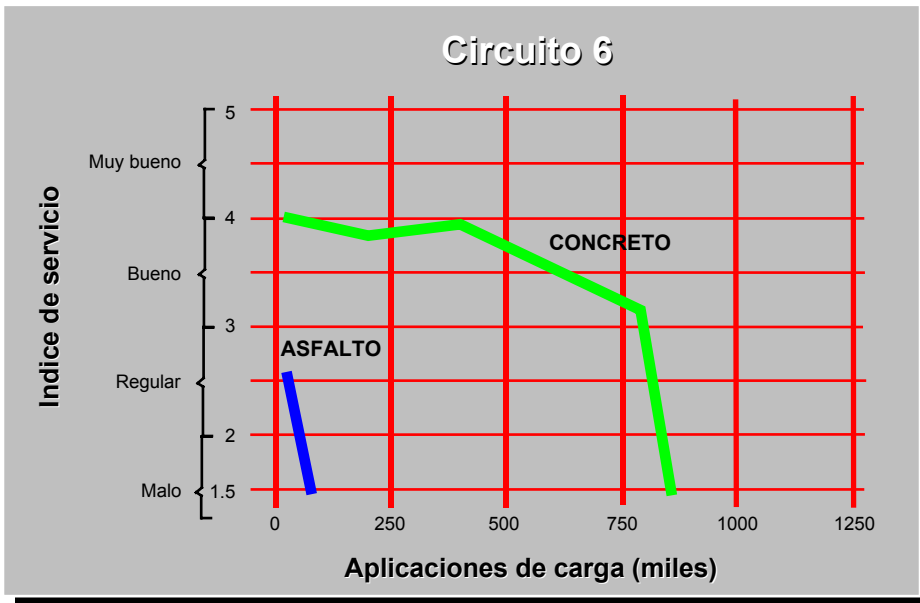
Comportamiento General del Circuito 4



Comportamiento General del Circuito 5



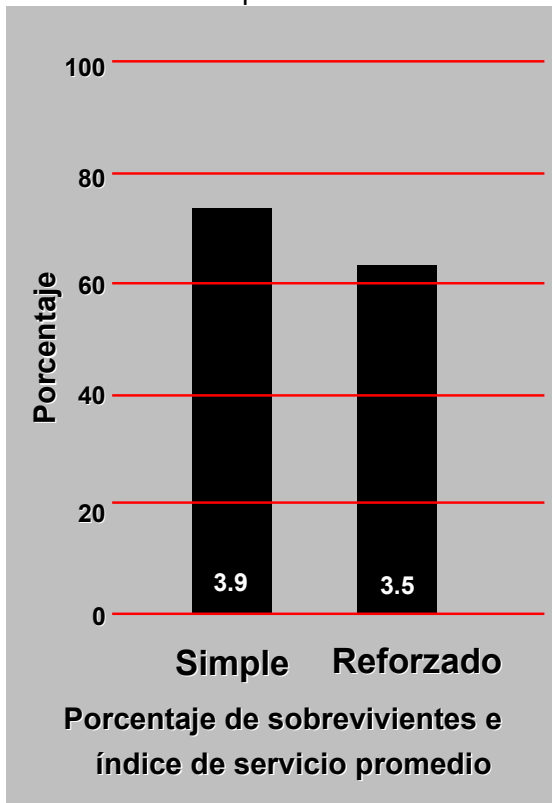
Comportamiento General del Circuito 6



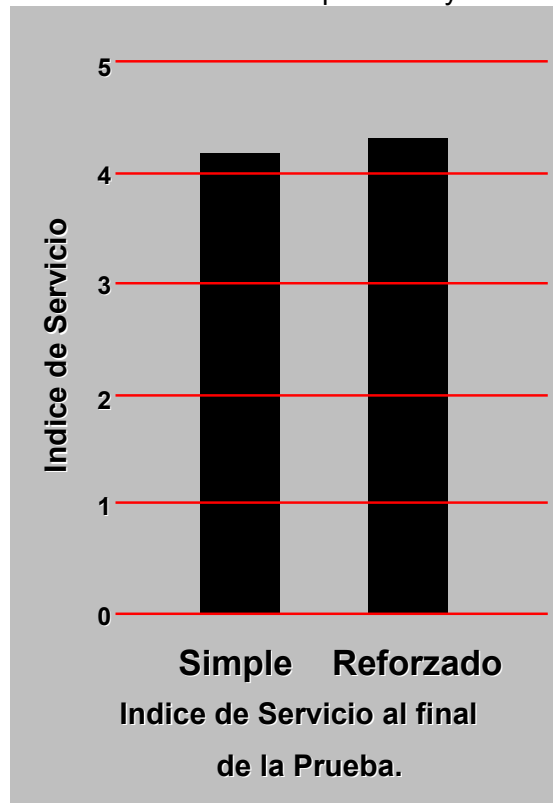
Otra de las conclusiones que se obtuvieron durante la prueba de pavimentos es con referencia a los pavimentos con acero de refuerzo.

Como se muestra a continuación, el acero de refuerzo en los pavimentos de concreto prácticamente no incrementa su capacidad portante, debido a que el pavimento se apoya en toda la superficie de la sub-base y por lo tanto no existen las deformaciones que harían que el acero de refuerzo trabajara para dar una contribución significativa.

Pavimentos de Espesor Intermedio



Pavimentos de Espesor Mayor



Por lo anterior no es recomendable la utilización de acero de refuerzo en los pavimentos de concreto hidráulico.

c).- EVOLUCION DE LA GUIA AASHTO

Aproximadamente después de un año de terminar la prueba AASHTO para 1961 salió publicada la primer "Guía AASHTO para Diseño de Pavimentos Rígidos y Flexibles". Posteriormente para 1972 se realizó una revisión y se publicó como la "Guía AASHTO para Diseño de Estructuras de Pavimento – 1972"; Para 1981 se hizo una Revisión al Capítulo III, correspondiente al Diseño de Pavimentos de Concreto con Cemento Portland;

Para 1986 se publicó una revisión de la “Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento”; En 1993 se realizó una Revisión del Diseño de Sobrecarpetas de pavimento; Para 1998 se publicó un método alternativo para diseño de pavimentos, que corresponde a un “Suplemento a la guía de diseño de estructuras de pavimento”.

d).- FORMULACION

La formula general a la que llegó al AASHTO para el diseño de pavimetos rígidos, basada en los resultados obtenidos de la prueba AASHTO es la siguiente:

1986-93 Ecuación de Diseño de Pavimentos Rígidos

$$\log_{10} (E18) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Desviación Estándar Normal} \\ \text{Error Estándar Combinado} \\ \text{Espesor} \end{array} \right. \left[Z_r \times S_o + 7.35 \times \log_{10} (D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.5-1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} \right] + \left(\begin{array}{l} \text{Serviciabilidad Final} \\ \text{Tráfico} \end{array} \right) \left[(4.22 - 0.32 \times pt) \times \log_{10} \left[\frac{S'c \times Cd \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{(Ec/k)^{0.25}} \right]} \right] \right]$$

Labels in the diagram:
 - Z_r : Desviación Estándar Normal
 - S_o : Error Estándar Combinado
 - D : Espesor
 - ΔPSI : Diferencia de Serviciabilidad
 - pt : Tráfico
 - $S'c$: Coeficiente de Drenaje
 - Cd : Coeficiente de Transferencia de Carga
 - J : Módulo de Ruptura
 - $D^{0.75}$: Módulo de Elasticidad
 - 18.42 : Módulo de Reacción
 - $(Ec/k)^{0.25}$: Módulo de Reacción

Las variables que intervienen en el diseño de los pavimentos constituyen en realidad la base del diseño del pavimento por lo que es importante conocer las consideraciones más importantes que tienen que ver con cada una de ellas para así poder realizar diseños confiables y óptimos al mismo tiempo.

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 el equilibrio en la ecuación el espesor supuesto es resultado del problema, en caso de no haber equilibrio en la ecuación se deberán seguir haciendo tanteos para tomando como valor semilla el resultado del tanteo anterior. La convergencia del método es muy rápida.

VARIABLES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

- Espesor
- Serviciabilidad
- Tráfico
- Transferencia de Carga
- Propiedades del Concreto
- Resistencia de la Subrasante
- Drenaje
- Confiabilidad

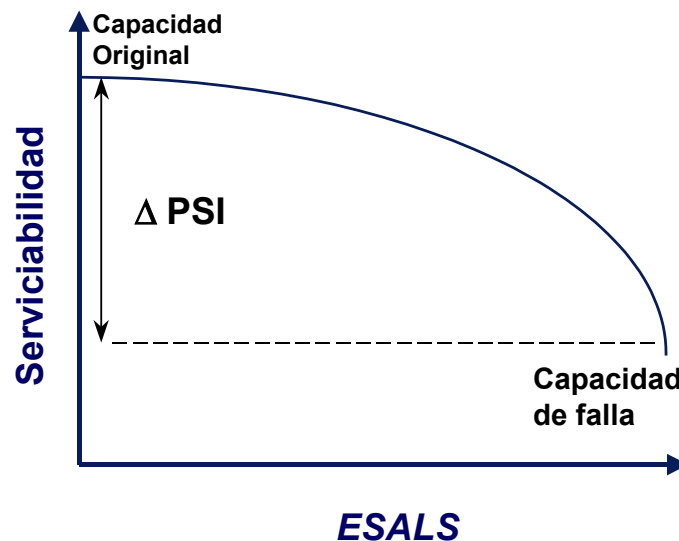
1. Espesor

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

Es importante especificar lo que se diseña, ya que a partir de espesores regulares una pequeña variación en el espesor puede significar una variación importante en la vida útil.

2. Serviciabilidad

El procedimiento de Diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (Δ PSI) para varios niveles de tráfico y cargas de ejes. Entre mayor sea el Δ PSI, mayor será la capacidad de carga del pavimento antes de fallar.



Indice de Servicio	Calificación
5	Excelente
4	Muy Bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
	Intransitable

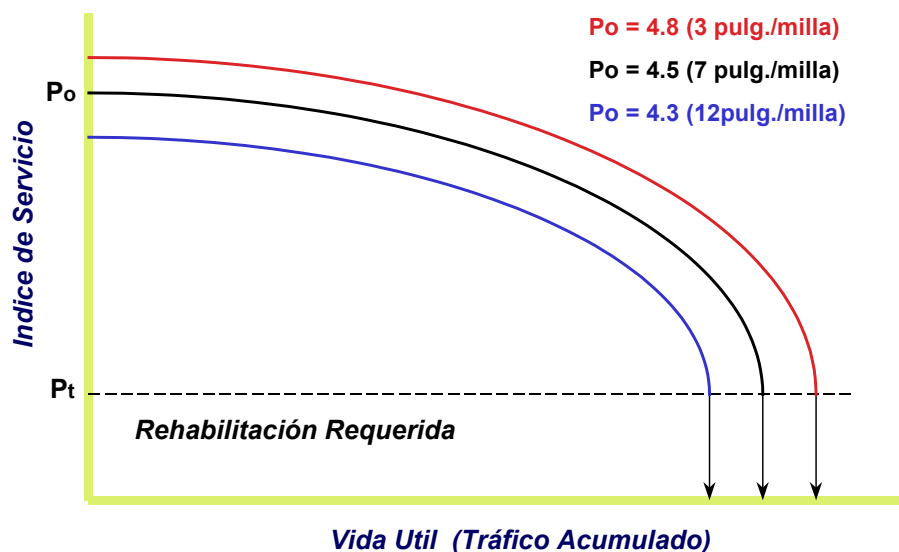
La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento de servir al tipo de tráfico (autos y camiones) que circulan en la vía, se mide en una escala del 0 al 5 en donde 0 (cero) significa una calificación para pavimento intransitable y 5 (cinco) para un pavimento excelente. La serviciabilidad es una medida subjetiva de la calificación del pavimento, sin embargo la tendencia es poder definirla con parámetros medibles como los son: el índice de perfil, índice de rugosidad internacional, coeficiente de fricción, distancias de frenado, visibilidad, etc.

Serviciabilidad Inicial (P_o). – Es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo. Los valores recomendados por AASHTO para este parámetro son:

- Para pavimento de Concreto = 4.5
- Para pavimento de Asfalto = 4.2

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

Mientras mejor se construya inicialmente un pavimento, o bien, mientras mejor índice de serviciabilidad inicial tenga mayor será su vida útil, esto es debido a que las curvas de deterioro se comportan de manera paralela o con el mismo gradiente para unas condiciones determinadas, como se muestra a continuación:



Serviciabilidad Final (Pt). - La serviciabilidad final tiene que ver con la calificación que esperamos tenga el pavimento al final de su vida útil.

Los valores recomendados de Serviciabilidad Final Pt para el caso de México, son:

- Para Autopistas 2.5
- Para Carreteras 2.0
- Para Zonas Industriales 1.8
- Pavimentos Urbanos Principales 1.8
- Pavimentos Urbanos Secundarios 1.5

3. Tráfico

El Tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos 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.

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada el número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final determinadas 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 circularán por el camino, en Ejes Sencillos Equivalentes de 18 kips (8.2 Ton) 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 circulará por el carril de diseño.

Los pavimentos de concreto el AASHTO los diseña por fatiga. La fatiga la podemos entender 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, en realidad lo que estamos haciendo es tratar de estimar, en un período 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. Adicionalmente se deberá contemplar el crecimiento del tráfico durante su vida útil, que depende en gran medida del desarrollo económico - social de la zona en cuestión, del mejoramiento de las características del pavimento se puede generar tráfico atraído e igualmente se debe considerar la capacidad de tráfico de la vía.

$$T_{vu} = T_{pa} \times FCT$$

donde: T_{vu} = Tráfico en la vida útil
 T_{pa} = Tráfico durante el primer año
 FCT = Factor de crecimiento del tráfico, que depende de la Tasa de Crecimiento Anual y de la Vida Util

Tasa de Crecimiento Anual

Dependiendo de muchos factores, tales como el desarrollo económico - social, la capacidad de la vía, etc. Es normal que el tráfico vehicular vaya aumentando con el paso del tiempo, hasta que llega a un punto tal de saturación en el que el tráfico se mantiene prácticamente sin crecer.

Es conveniente prever este crecimiento del tráfico, tomando en consideración una tasa de crecimiento anual con la que se calcula un factor de crecimiento del tráfico. La tasa de crecimiento pudiera variar de acuerdo a los tipos de vehículos, pueden crecer más unos tipos que otros.

A medida que un camino se va congestionando de tráfico su crecimiento se va haciendo mas lento, este efecto debemos considerarlo pudiendo estimar una Tasa de Crecimiento Equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil.

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

Valores comunes de tasas 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

Factor de Crecimiento del Tráfico.- 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 Util

Factor de Sentido.- Del total del tráfico que se estima para el diseño del pavimento deberá determinarse el correspondiente a cada sentido de circulación, esto se realiza mediante la introducción del Factor de Sentido, cuyos valores recomendados son:

- Un sentido de Circulación 1.0
- Doble sentido de Circulación 2.0

Factor de Carril. - El factor de Carril es un coeficiente que nos permite estimar que tanto del tráfico en el sentido de diseño circula por el carril de diseño. En una vía de un solo carril en el sentido de circulación de diseño, obviamente el 100% del tráfico circulará por ese carril que al mismo tiempo será nuestro carril de diseño. Una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de camino: carretero ó urbano, y de que tan saturada esté la vía, pueda ser que sobre el carril de diseño circule entre un 50% a un 80% del tráfico en ese sentido.

El AASHTO recomienda algunos valores, sin embargo no necesariamente deben utilizarse.

Número de Carriles	Factor de Carril
1	1.00
2	0.80 a 1.00
3	0.60 a 0.80
4	0.50 a 0.75

Nota: estos se asemejan más a los de carreteras

Factor de Equivalencia del Tráfico. - Las fórmulas que permiten convertir el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes dependen del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final que pretendemos para el pavimento. A continuación se muestran dichas fórmulas:

$$Fec = - \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

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

$$G_t = \text{Log} \frac{4.5 - Pt}{4.5 - 1.5} \quad \beta_x = 1 + \frac{3.63 (L_x + L_2)^{5.20}}{(D + 1)^{8.46} (L_2)^{3.52}}$$

En Donde:

W_{tx} = # Aplicaciones de carga definida al final del tiempo t

W_{t18} = # Aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t

L_x = Carga del eje en kips
 L_2 = Código de eje cargado:
 $L_2 = 1$ Para eje Sencillo
 $L_2 = 2$ Para eje Tandem
 $L_2 = 3$ Para eje Tridem

$G_t = f(P_t)$
 β_{18} = Valor de β_x cuando $L_x=18$ y $L_2 = 1$

Es importante hacer notar que los ejes equivalentes se calculan de manera diferente para un pavimento rígido que para un flexible. Cuando se multiplica el tráfico por las diferentes factores de equivalencias, se obtienen los ESAL's (Ejes Sencillos Equivalentes).

El tráfico pesado es el que mayor daño produce a los pavimentos por lo que deberá estimarse con la mayor precisión posible. Como ejemplo podemos mencionar que el daño que produce una sola aplicación de carga de un camión semi-remolque de 36 Ton. equivale al daño que producen 9,523 repeticiones de carga de un vehículo tipo automóvil.

Otro factor importante a considerar es la sobrecarga, debemos conocer con la mayor certeza posible los pesos de los ejes de los vehículos que estarán circulando sobre el pavimento que estamos diseñando, ya que las sobrecargas generan un daño muy importante al pavimento y su crecimiento es de orden exponencial.

4. Transferencia de Cargas

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objeto 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.

El método AASHTO considera la transferencia de cargas mediante el factor de transferencia de cargas J .

La efectividad de la Transferencia de Carga entre losas adyacentes depende de varios factores:

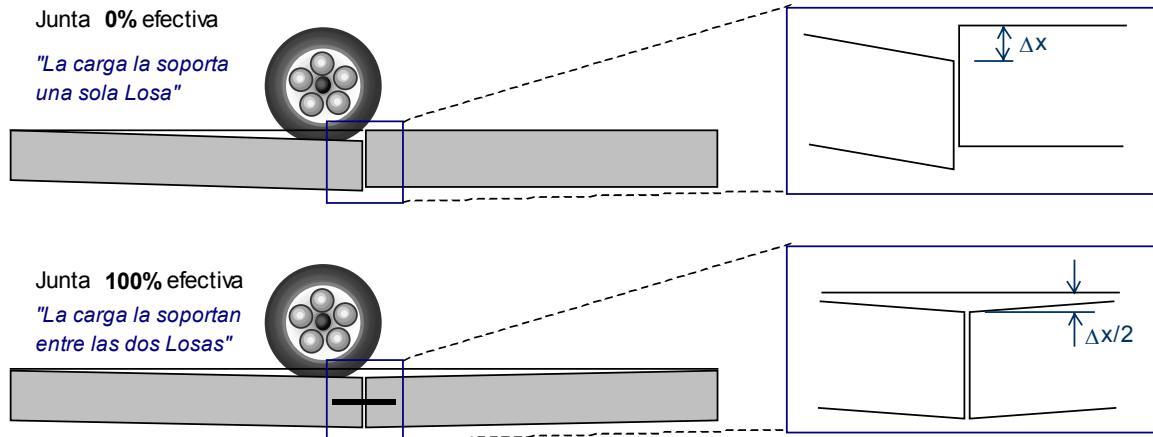
- Cantidad de Tráfico
- Utilización de Pasajuntas
- Soporte Lateral de las Losas

Una manera de transferir la carga de una losa a otra es mediante la trabazón de agregados que se genera en la grieta debajo del corte de la junta, sin embargo esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero.

La utilización de pasajuntas es la manera mas conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas. Utilizar pasajuntas cuando:

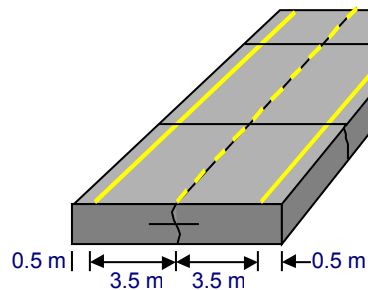
- a) El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total.
- b) El número de Ejes Equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones de Esal's.

El Coeficiente de Transferencia de Carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta.

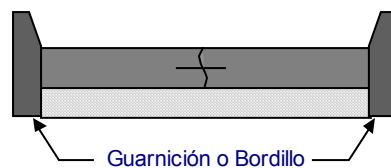


Soporte Lateral . - El confinamiento que produce el soporte lateral contribuye a reducir los esfuerzos máximos que se generan en el concreto por efecto de las cargas. Un pavimento de concreto puede considerarse lateralmente soportado cuando tenga algunas de las siguientes características en su sección:

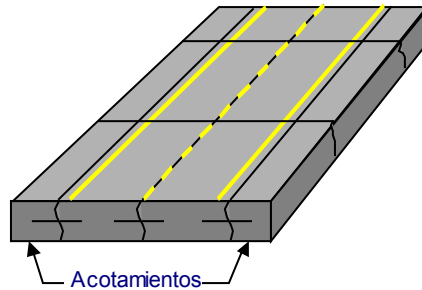
- Carril Ancho ≥ 4.0 m



- Confinamiento con Guarniciones o Banquetas



- Con Acotamientos Laterales



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

El diámetro, longitud y separación de las pasajuntas esta en función de el espesor de las losas principalmente. Algunas recomendaciones prácticas para la selección de la Barra son las siguientes:

Espesor de Losa		Barras Pasajuntas					
		Diámetro		Longitud		Separación	
cm	in	mm	in	cm	in	cm	in
13 a 15	5 a 6	19	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 1/4	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 1/2	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 3/4	56	22	46	18

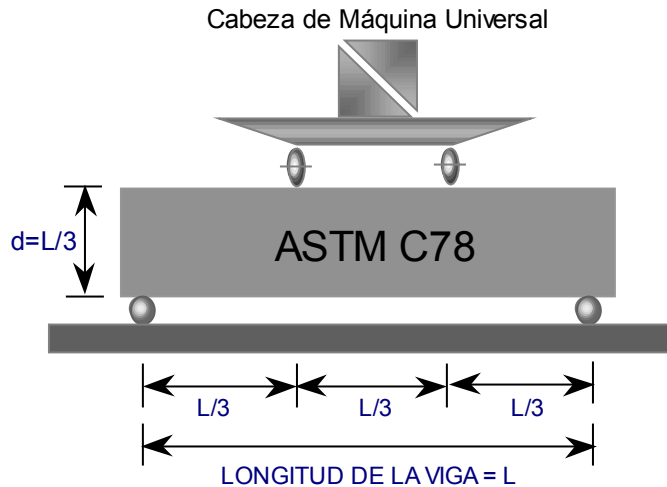
5. Propiedades del Concreto

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

- Resistencia a la tensión por flexión ($S'c$) ó Módulo de Ruptura (MR)
- Módulo de Elasticidad del Concreto (E_c)

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

El módulo de ruptura se mide mediante ensayos de vigas de concreto aplicándoles cargas en los tercios de su claro de apoyo. Esta prueba esta normalizada por la ASTM C78. Existe una prueba similar con la aplicación de la carga al centro del claro que genera resultados diferentes de resistencia a la flexión (aproximadamente 15% a 20% mayores) pero que no son los que considera AASHTO para el diseño.



Los valores recomendados para el Módulo de Ruptura varían desde los 41 kg/cm² (583 psi) hasta los 50 kg/cm² (711 psi) a 28 días dependiendo del uso que vayan a tener. En seguida se muestran valores recomendados, sin embargo el diseñador deberá elegir de acuerdo a un buen criterio.

Módulo de Ruptura Recomendado

Tipo de Pavimento	MR recomendado	
	Kg/cm ²	psi
Autopistas	48.0	682.7
Carreteras	48.0	682.7
Zonas Industriales	45.0	640.1
Urbanas Principales	45.0	640.1
Urbanas Secundarias	42.0	597.4

Módulo de Ruptura Promedio

La metodología de diseño de 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. Estos resultados dependen de las condiciones de control y calidad que tenga el fabricante del concreto en sus procesos. En todos los casos se recomienda que sea Concreto Premezclado Profesionalmente.

$$MR \text{ promedio} = MR \text{ especificado} + Z_r \times (\text{Desviación Estándar}^* \text{ del MR})$$

* Valores típicos de la Desviación Estándar		Promedio
Concreto Premezclado	6% a 12%	9.0%
Mezclado Central	5% a 10%	7.5%

Módulo de Elasticidad. - El Módulo de Elasticidad del concreto esta íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Ruptura. Los dos más utilizados son:

$$- E_c = 6,750 * MR$$

$$- E_c = 26,454 * MR ^{0.77}$$

Estas formulas aplican con unidades inglesas.

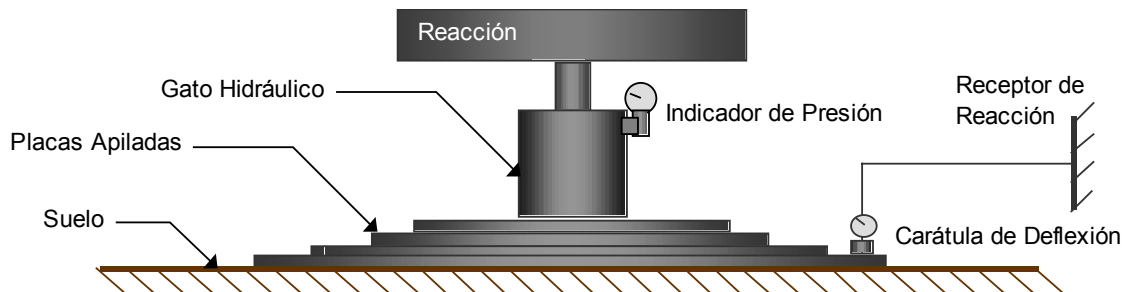
6. Resistencia de la Subrasante

La resistencia de la subrasante es considerada dentro del método por medio del Módulo de Reacción del Suelo K que se puede obtener directamente mediante la prueba de placa.

El módulo de reacción de 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 (K) se puede obtener directamente del terreno mediante la prueba de placa ASTM D1195 y D1196. El valor de K representa el soporte (terreno natural y terraplén si lo hay) y se puede incrementar al tomar la contribución de la sub-base.

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

Esquema de la prueba de placa

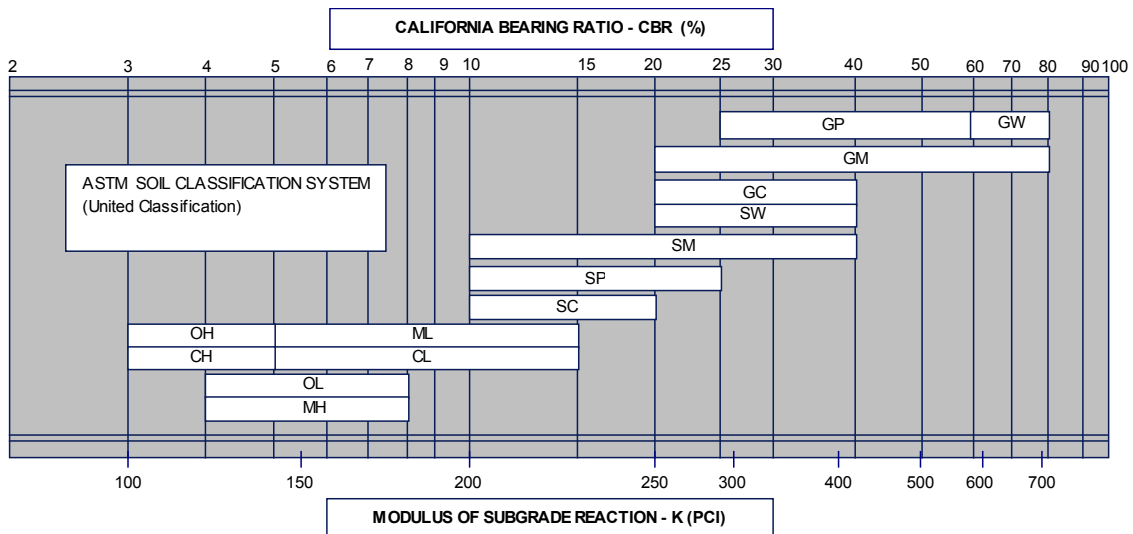


$$k \text{ (psi/in)} = \text{carga unitaria por placa} / \text{deflexión de la placa}$$

Estimaciones y Correlaciones de K

En base a una gran número de muestras y estudios se han podido desarrollar algunos valores estimativos del módulo de reacción del suelo en función a diferentes propiedades. Diferentes autores han publicado sus resultados y en general no difieren notablemente.

Correlación 1 con SUCS y VRS



Correlación 2 con SUCS y VRS

Tipo de Suelo	SUCS	Densidad Seca lb/ft ³	CRB %	K *
Suelos Granulares				
Grava	GW, GP	125 a 140	60 a 80	300 a 450
		120 a 130	35 a 60	300 a 400
Arena Gruesa	SW	110 a 130	20 a 40	200 a 400
Arena Fina	SP	105 a 120	15 a 25	150 a 300
Suelos de Material Granular con Alto Contenido de Finos				
Grava - Limosa Grava - Arena - Limosa	GM	130 a 145	40 a 80	300 a 500
Arena - Limosa Arena - Limo - Gravosa	SM	120 a 135	20 a 40	300 a 400
Grava - Arcillosa Grava - Arena - Arcillosa	GC	120 a 140	20 a 40	200 a 450
Arena - Arcillosa	SC	105 a 130	10 a 20	150 a 350
Suelos de Material Fino **				
Limo	ML, OL	90 a 105	4 a 8	25 a 165
Limo - Arenoso Limo - Gravoso		100 a 125	5 a 15	40 a 220
Limo Mal Graduado	MH	80 a 100	4 a 8	25 a 190
Arcilla Plástica	CL	100 a 125	5 a 15	25 a 255
Arcilla Medianamente Plástica	CL, OL	95 a 125	4 a 15	25 a 215
Arcilla Altamente Plástica	CH, OH	80 a 110	3 a 5	40 a 220

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

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

7. Drenaje

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

Aspectos que debemos de cuidar para evitar que el agua penetre en la estructura de soporte:

- Mantener perfectamente selladas las juntas del pavimento.
- Sellar las juntas entre pavimento y acotamiento o cuneta.
- Colocar barreras rompedoras de capilaridad (en donde se requiera)
- Utilizar cunetas, bordillos, lavaderos, contracunetas, subdrenajes, etc.

2.4 METODO DE DISEÑO AASHTO

- Construir o aprovechar los drenajes pluviales en las ciudades.

Tener agua atrapada en la estructura del Pavimento produce efectos nocivos en el mismo, como pueden ser:

- Reducción de la resistencia de materiales granulares no ligados.
- Reducción de la resistencia de la subrasante.
- Expulsión de finos
- Levantamientos diferenciales de suelos expansivos
- Expansión por congelamiento del suelo

Algunos de estos fenómenos se pueden minimizar cuando se utilizan bases estabilizadas con cemento o bases de relleno fluido.

Los valores recomendados para el coeficiente de drenaje deberán estar entre 1.0 y 1.10

8. Confiabilidad

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

- Confiabilidad R
- Desviación Estándar

Confiabilidad.- La confiabilidad esta definida como "la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación"

Otra manera de entender la confiabilidad, por ejemplo es: si se considera una confiabilidad "R" del 80% estaríamos permitiendo que el 20% de las losas del pavimento alcancen al final de su vida útil una serviciabilidad igual a la serviciabilidad final seleccionada en el diseño.

Confiabilidad recomendada por AASHTO *

Clasificación Funcional	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%

* Valida para Estados Unidos

También podemos entender a la confiabilidad como un Factor de Seguridad y ante esa situación debemos reflexionar en los valores de confiabilidad que debemos utilizar en México, con el mejor de los criterios, al hacer un diseño para un pavimento.

Confiabilidad Recomendada para México

Tipo de Pavimento	Confiabilidad R
Autopistas	95 %
Carreteras	80 %
Rurales	70 %
Zonas Industriales	65 %
Urbanas Principales	60 %
Urbanas Secundarias	50 %

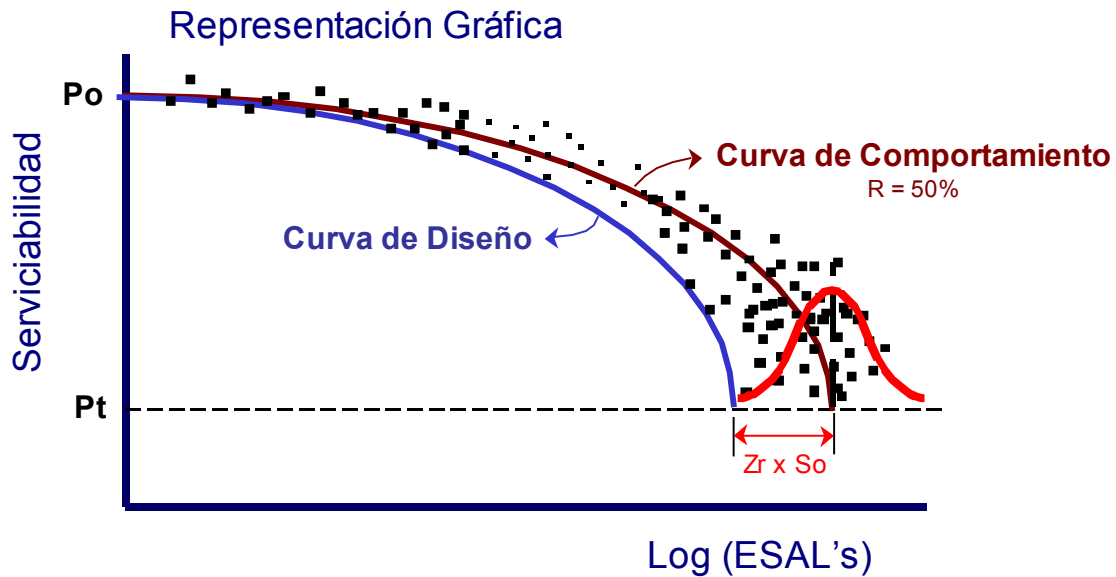
Como se menciona anteriormente la confiabilidad puede relacionarse con un Factor de Seguridad, a continuación se presentan los factores de seguridad aproximados a los que corresponde la confiabilidad. Estos factores de seguridad van asociados con la Desviación Estándar "So".

Factor de Seguridad AASHTO

Desviación Estándar So	Confiabilidad "R"					
	50%	60%	70%	80%	90%	95.00%
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

$$FS_{AASHTO} = 10^{(-Z_r \times S_o)}$$

donde: Z_r = desviación normal estandar para "R"
S_o = desviación estándar



d).- Ejemplo resuelto.

Diseñar el espesor de un pavimento de concreto para una vialidad urbana de doble sentido y con 2 carriles por sentido. Los datos y los principales parámetros de diseño se detallan a continuación:

Serviciabilidad:

Serviciabilidad Inicial: = 4.5
 Serviciabilidad Final = 1.8

Tráfico:

TPDA = 4,302 vehículos
 Factor de sentido = 0.5
 Factor de carril = 0.80
 Composición del tráfico:

TIPO DE VEHÍCULO	PESO (TON)		COMPOSICIÓN %	% CARGADOS VACIOS		TOTAL DIARIOS
	CARGADOS	VACIOS		CARGADOS	VACIOS	
A2	2.00	1.60	70.2%	100.0%	0%	3,018
B2	15.47	10.48	1.2%	75.0%	25%	51
B3	19.46	11.98	5.1%	75.0%	25%	218
C3	23.45	8.48	7.3%	75.0%	25%	312
C4	27.94	12.47	0.7%	75.0%	25%	30
T2-S2	33.43	11.48	1.1%	75.0%	25%	48
T3-S2	41.41	11.98	4.2%	75.0%	25%	180
T3-S3	45.90	12.97	3.1%	75.0%	25%	135
T3-S2-R2	61.37	15.97	4.6%	75.0%	25%	197
T3-S2-R3	69.36	16.96	2.6%	75.0%	25%	113
			100.0%			4,302

Período de diseño: = 20 años
 Crecimiento Anual: = 3.0 %

Transferencia de Carga:

Se emplean pasajuntas y se supone soporte lateral de las losas debido a guarniciones y banquetas a los costados de la vialidad. Por lo tanto el coeficiente de transferencia de carga es igual a 2.7.

Propiedades del Concreto:

Emplear un concreto con modulo de ruptura de 45 kg/cm² (640 psi)

Subrasante:

Se determinó mediante pruebas de placa realizadas sobre la base un módulo de reacción del suelo (k) igual a 300 pci

Condiciones de Drenaje:

Se suponen condiciones normales de drenaje en la vialidad, por lo que se emplea un coeficiente de drenaje igual a 1.0

Confiabilidad:

Por tratarse de una vialidad urbana de cierta importancia se considera usar un valor de confiabilidad del 60%

EJES EQUIVALENTES Y ESPESOR.

Sabemos que es necesario transformar los ejes de pesos normales de los vehículos que circularán sobre el camino, en ejes sencillo equivalentes de 18 kips (8.2 ton) para poder resolver la ecuación de diseño de espesores.

Para convertir a ejes equivalentes los ejes de pesos normales de los vehículos considerados se debe obtener en primera instancia el número de repeticiones en toda la vida útil de cada tipo de vehículo que va a circular sobre el pavimento (sencillo, tandem ó tridem) y dentro de cada tipo de eje, también se desgloza por peso del eje.

Con el Factor de equivalencia de carga calculado para cada tipo y peso de ejes se convierten el número de repeticiones esperadas de cada tipo de eje, en la vida útil del proyecto, en el número de repeticiones esperadas de ejes equivalente (ó ESAL's).

El número de repeticiones esperadas durante la vida útil y sus respectivos ESAL's en este ejemplo de diseño se presentan a continuación:

Tipo de Eje	Peso del Eje (kips)	Repeticiones al Año	Repeticiones en la vida útil	Ejes Equivalentes de 18 kips
2.4 Sencillo	2.00	881,256	23,679,679	6,367
Sencillo	4.84	7,191	193,225	837
Sencillo	5.00	11,315	304,038	1,562
Sencillo	7.70	3,614	97,110	2,652
Sencillo	8.80	43,910	1,179,878	55,842
Sencillo	9.90	1,095	29,423	2,276

Con los datos y parámetros de diseño establecidos se encontró un total de 24'860,542 Ejes Sencillos Equivalentes de 18 kips en el periodo de diseño y para ese número de ESAL'S, el espesor encontrado es de 8.52" (aproximadamente 22 centímetros).