

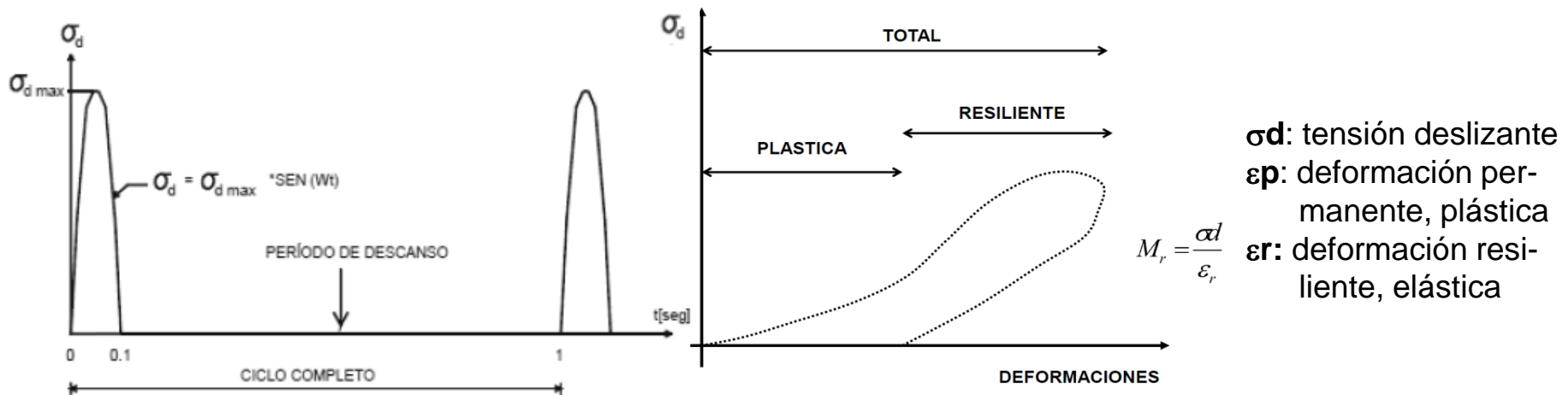
METODOLOGÍA AASHTO '93

METODOLOGÍA AASHTO '93

CAMBIOS RESPECTO DEL MÉTODO AASHTO '72

Los cambios respecto del método AASHTO '72 son:

1. El valor soporte de la subrasante (CBR de SR), es reemplazado por el MR (módulo resiliente). Este se obtiene de ensayos. Se usa una probeta igual a la del ensayo triaxial de resistencia al corte, confinada lateralmente para simular las condiciones en el terreno. Se aplica una carga de compresión dinámica de función sinusoidal aplicando pulsos de carga y descarga, graficando los resultados.



METODOLOGÍA AASHTO '93

CAMBIOS RESPECTO DEL MÉTODO AASHTO '72

Durante pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga, el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del suelo puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama **módulo de resiliencia**. Este concepto aplica tanto para suelos finos como para materiales granulares. Así entonces, el concepto de módulo de resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida.

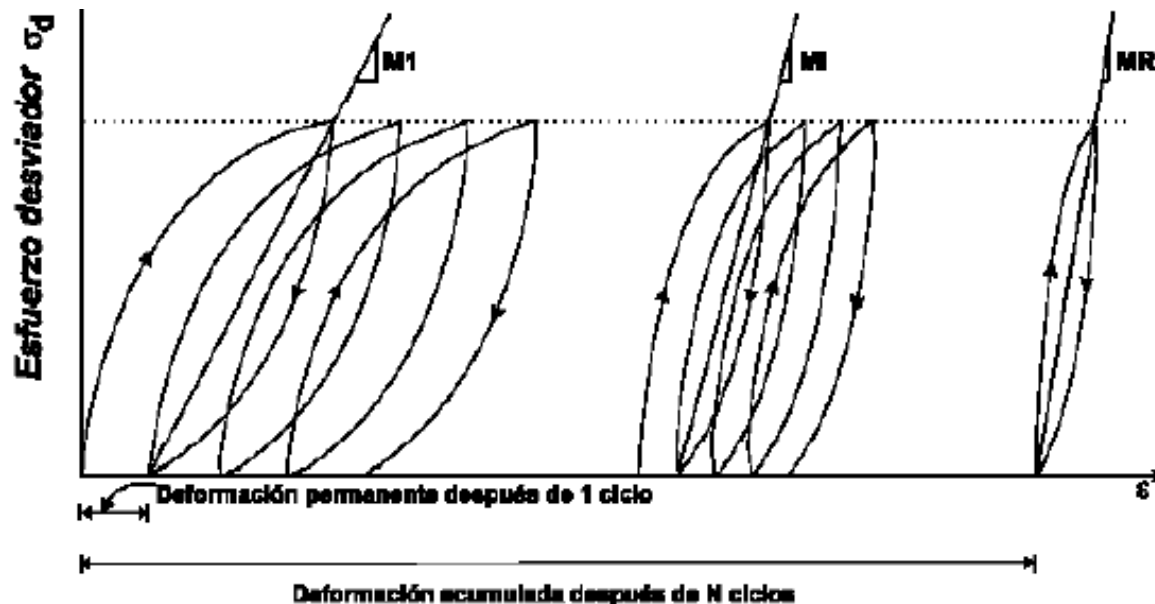


Figura 2. Mecanismo de deformación permanente en los firmes

METODOLOGÍA AASHTO '93

CAMBIOS RESPECTO DEL MÉTODO AASHTO '72



METODOLOGÍA AASHTO '93

CAMBIOS RESPECTO DEL MÉTODO AASHO '72

Este ensayo se realiza para las distintas **condiciones de humedad** que tiene el suelo en el año, **y se pondera** → MR.

Si no se puede hacer este ensayo debido a su alto costo, **existen curvas que relacionan un CBR con el MR** (para CBR < 10% → MR = 105 CBR).

El MR tiene en cuenta las **modificaciones que se producen en el suelo de fundación con el tiempo, debido principalmente a los cambio de humedad.**

2. Se introduce en la fórmula del número estructural, **SN**, un **coeficiente de drenaje (m_i)**. Estos se obtienen de una tabla en función de las características de drenaje de cada capa. **Cuanto mejor es el drenaje, mayor es m_i y menores los espesores D_i .**

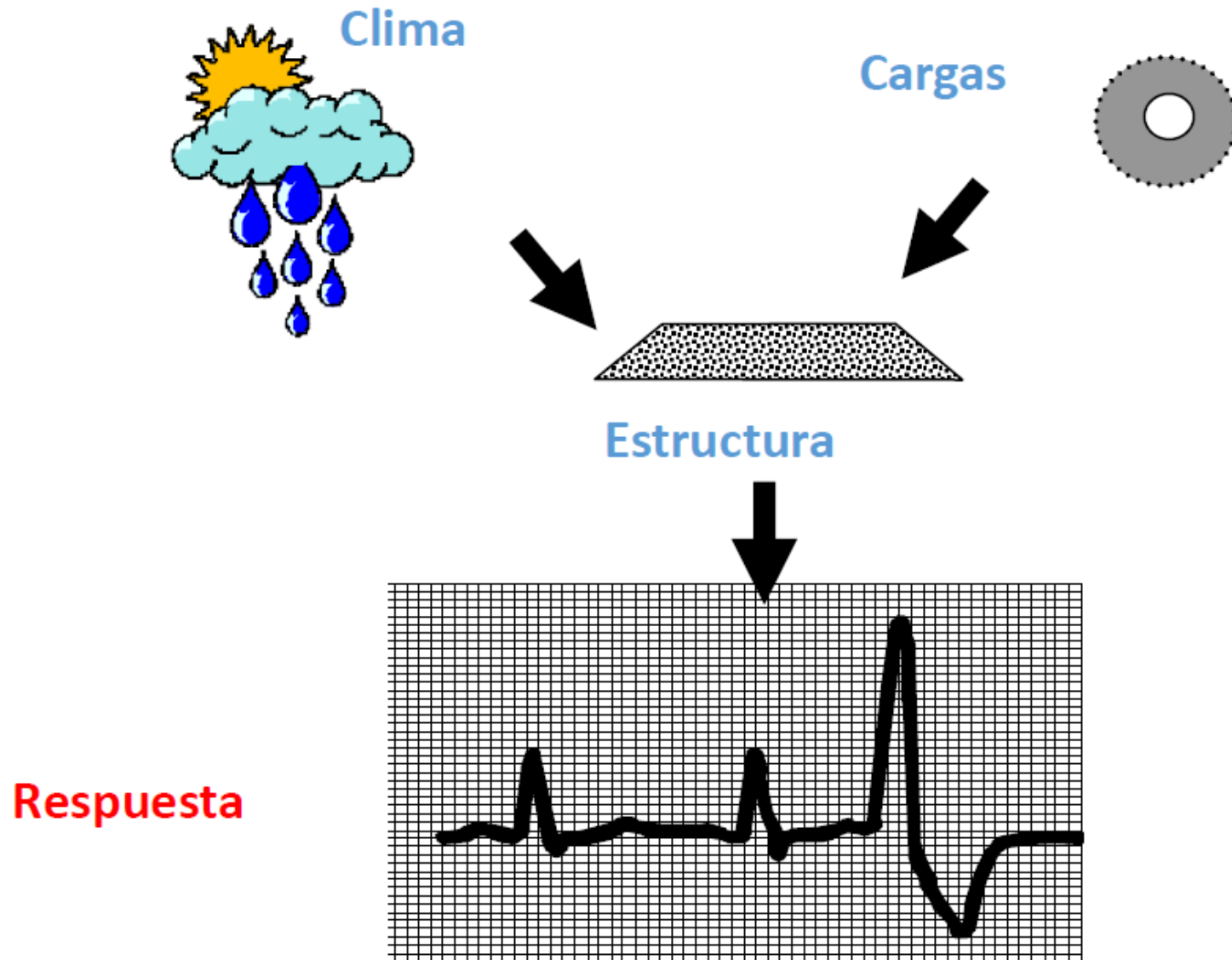
$$SN_c^3 = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

METODOLOGÍA AASHTO '93

CAMBIOS RESPECTO DEL MÉTODO AASHTO '72

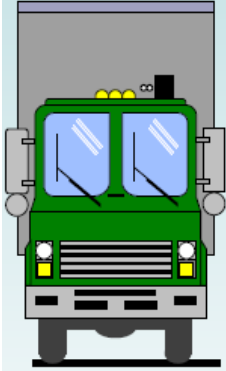
3. Se deja sin efecto el **FR (factor regional de clima)**. En realidad la **influencia del clima se tiene en cuenta al obtener el MR ponderado de todo el año y al considerar las condiciones de drenaje con los m_i .**
4. Se considera la **pérdida de serviciabilidad** en función de los **efectos ambientales** (hinchamientos o la acción de las heladas) y de los **efectos del tránsito**.
5. Se introduce el concepto de **CONFIABILIDAD (R)**. En el método **AASHTO '72** los resultados correspondían a condiciones medias de la experiencia y por lo tanto se podría **suponer una confiabilidad del orden del 50%**.
Con este método se puede trabajar con mayores grados de confiabilidad (90% - 95%), es decir que solo el 10% o el 5% del pavimento tendrán un IS inferior al admisible al fin de la vida útil.

METODOLOGÍA AASHTO '93



METODOLOGÍA AASHTO '93

EXPERIENCIA

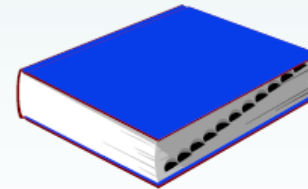


Comportamiento



Regresiones

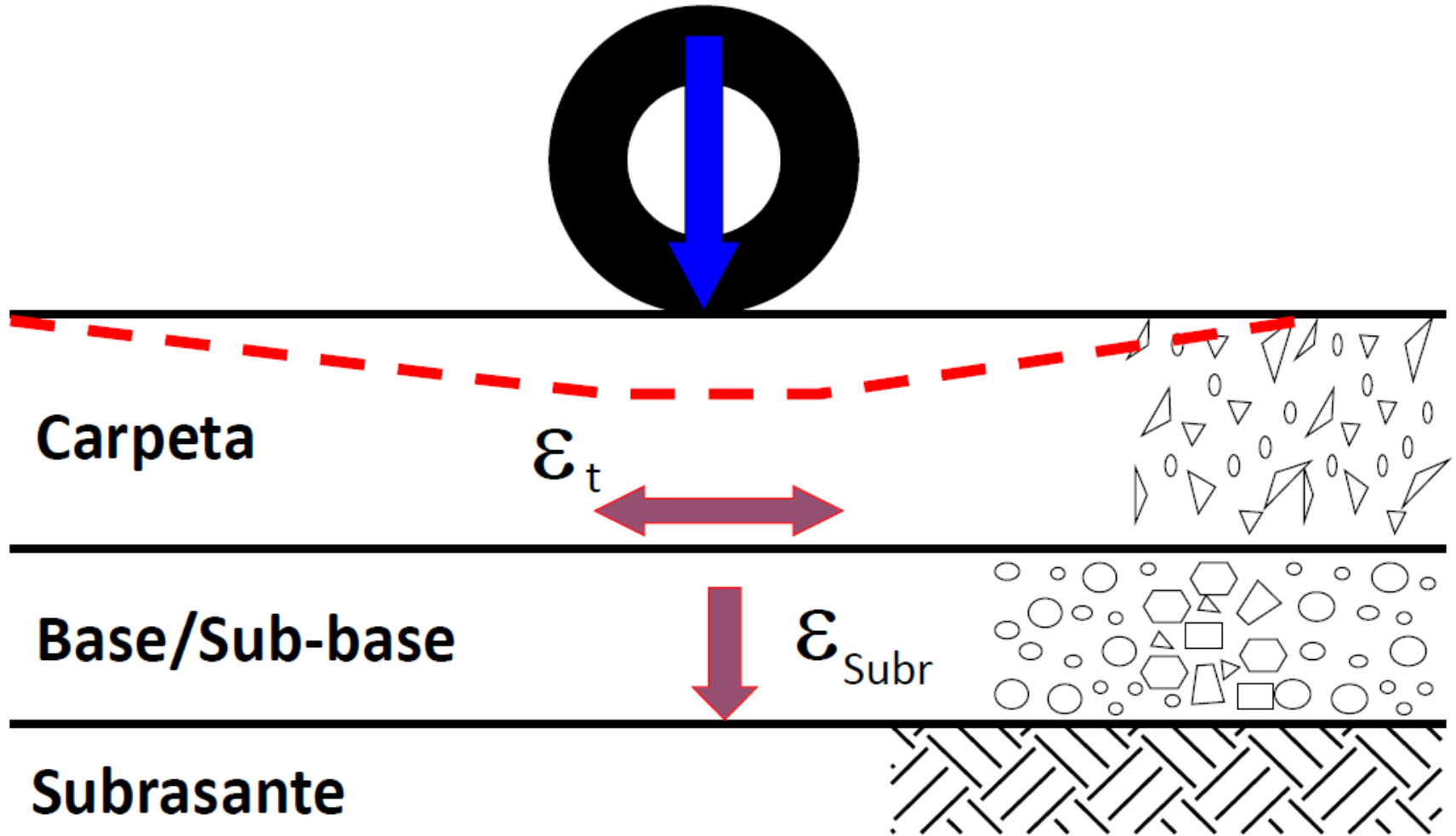
Caracterización
Tránsito, Estructura,
Subrasante, Clima



METODO DE DISEÑO

METODOLOGÍA AASHTO '93

RESPUESTA BAJO CARGAS



METODOLOGÍA AASHTO '93

RESPUESTA BAJO CARGAS

- Tensión

- Fuerza por unidad de superficie (MPa, psi)
- Flexión, corte, axial

$$\sigma = \frac{P}{S}$$

- Deformación Unitaria

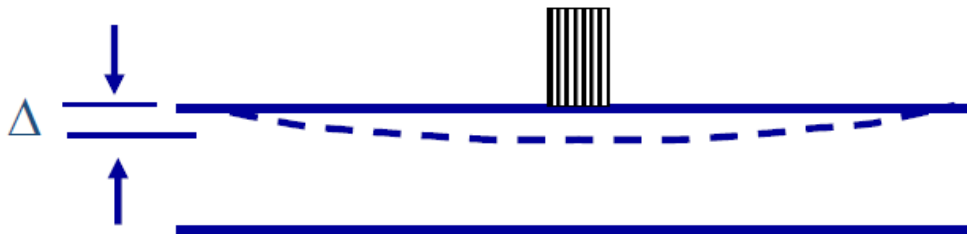
- Deformación respecto a la longitud original (adimensional)
- En el rango elástico de deformaciones:

$$\sigma = E \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

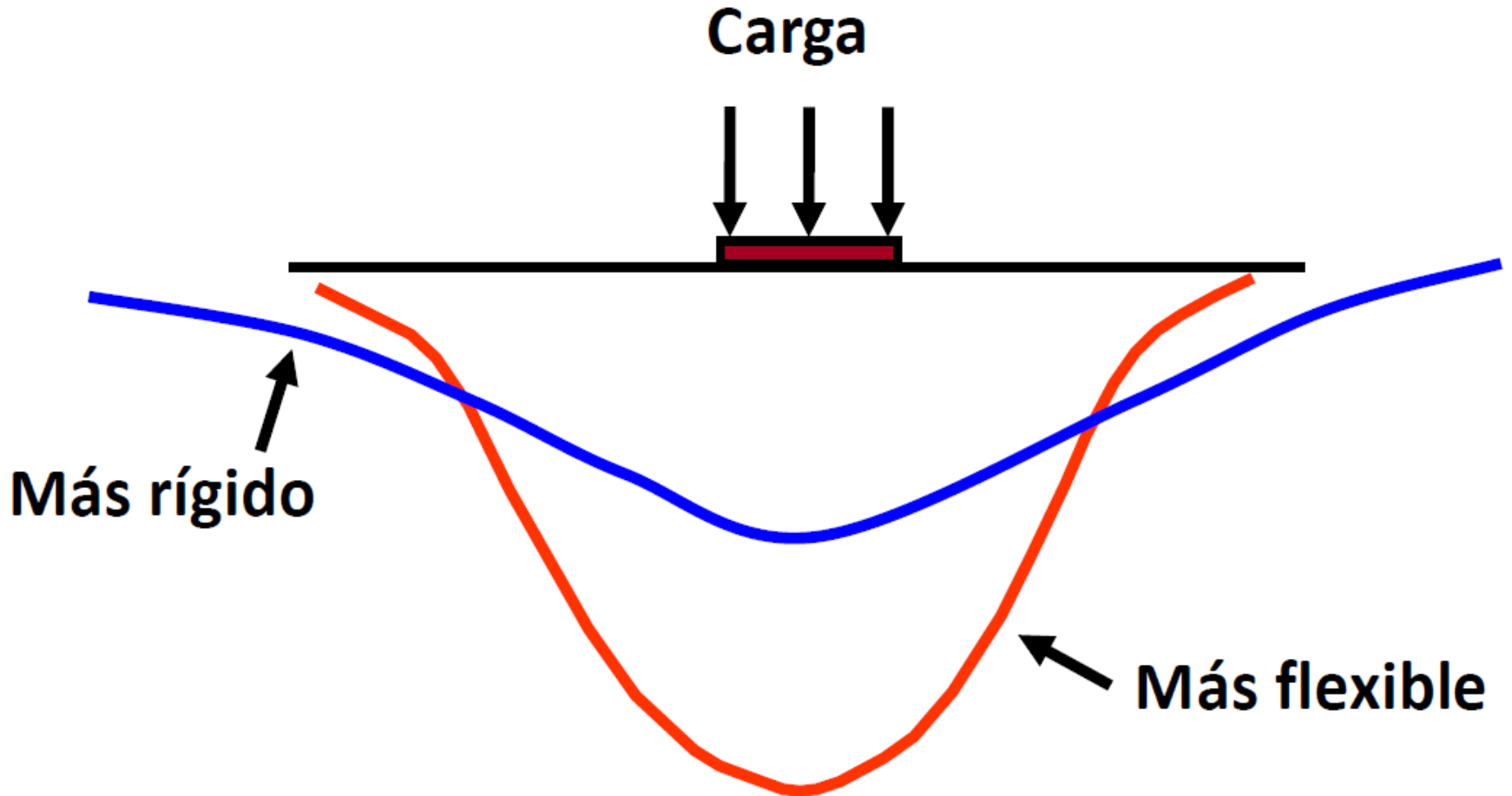
- Deflexión

- Cambio en la longitud, deformación (mm, micrones, mils)



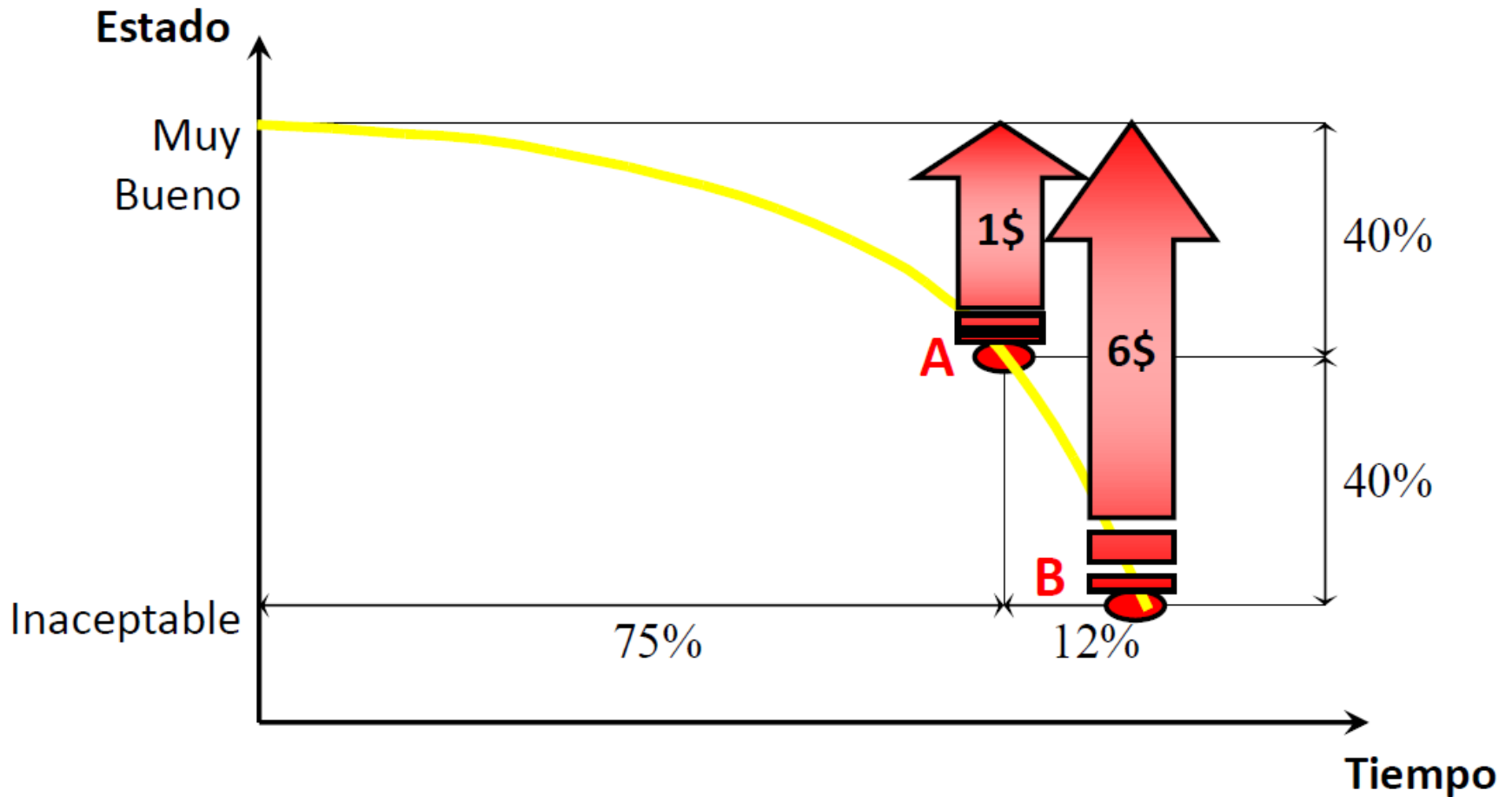
METODOLOGÍA AASHTO '93

RESPUESTA BAJO CARGAS



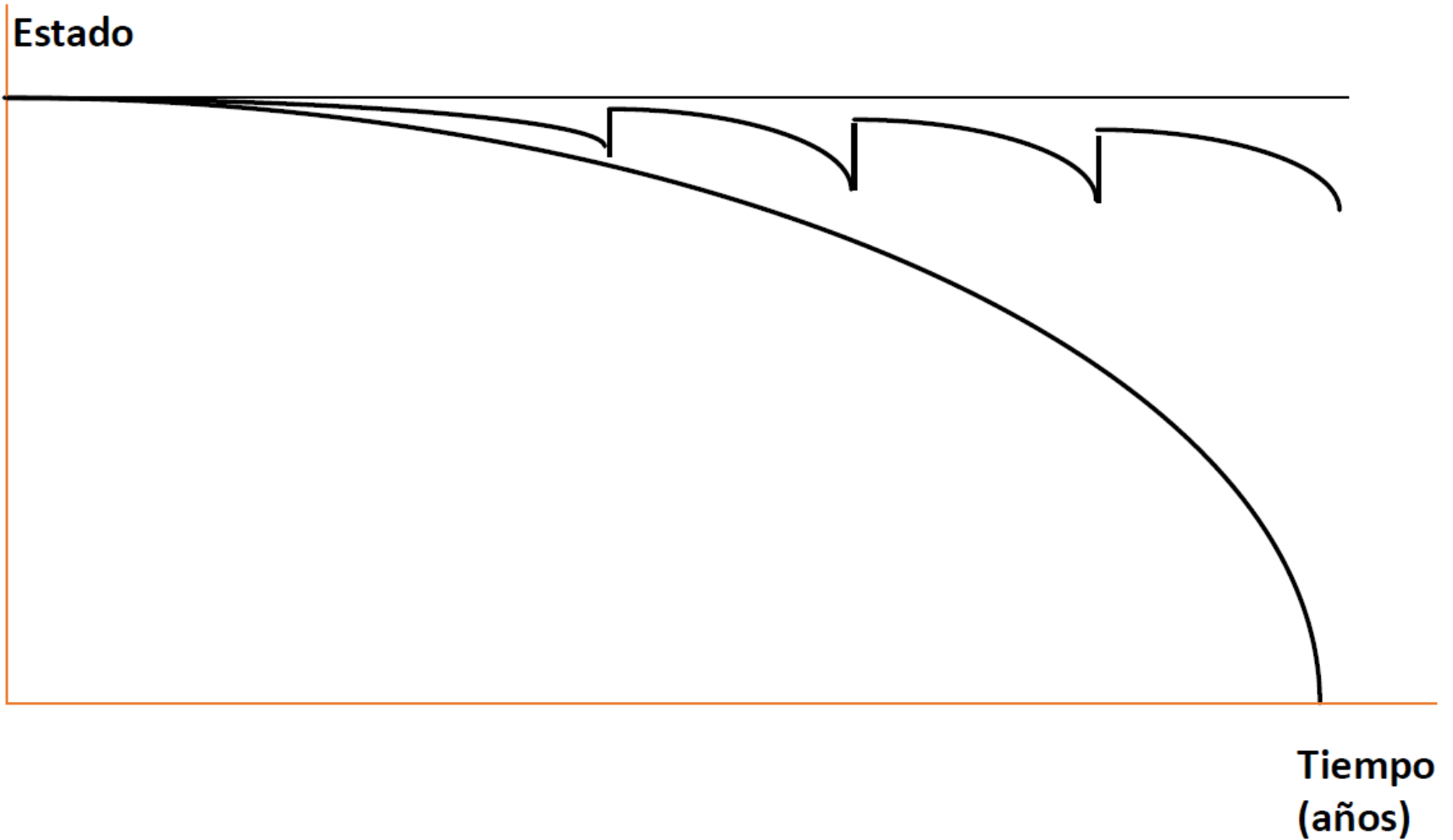
METODOLOGÍA AASHTO '93

ESTADO VS VIDA ÚTIL



METODOLOGÍA AASHTO '93

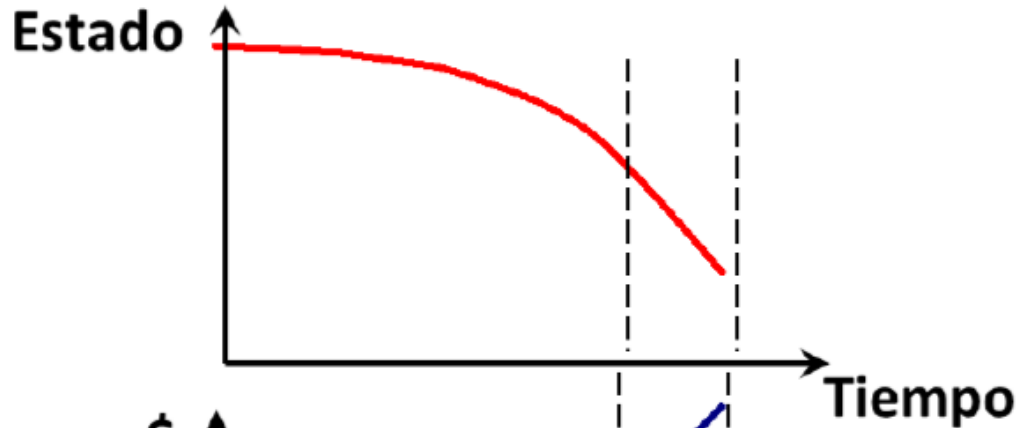
ESTADO VS VIDA ÚTIL



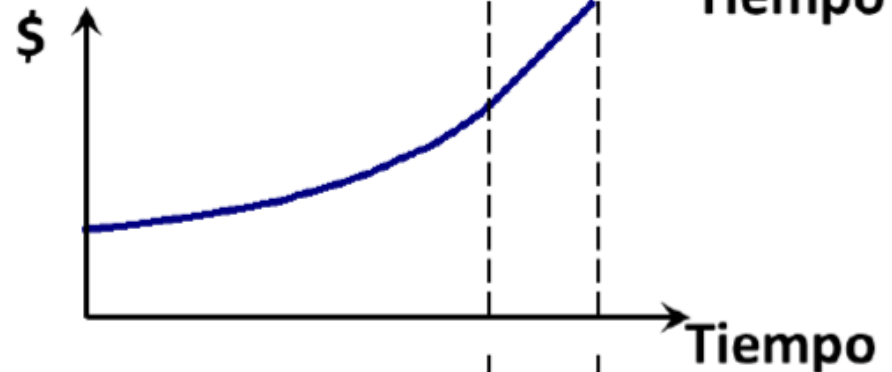
METODOLOGÍA AASHTO '93

ESTADO VS VIDA ÚTIL

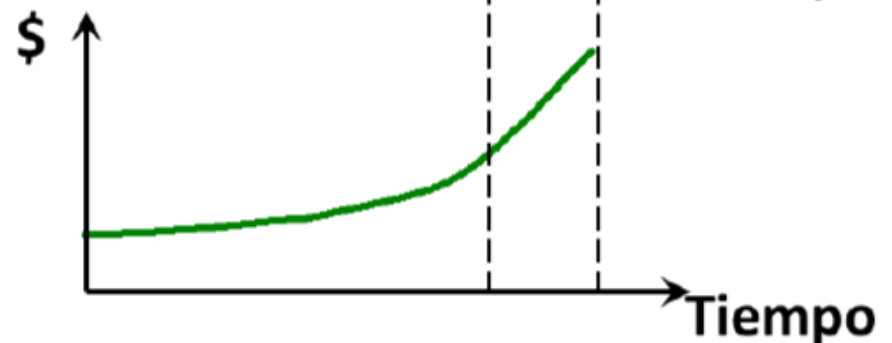
Condición



Costo Mantenimiento



Costo Usuario



METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

- El diseño de pavimentos ha evolucionado en forma gradual, desde **ARTE** hacia **CIENCIA**. Sin embargo, el **EMPIRISMO** aún continúa jugando un rol muy importante.

- **Métodos de diseño**

- Empírico

- Solo experiencia: sin ensayos de capacidad portante de subrasante

- Con ensayos de capacidad portante de subrasante

- Ecuaciones de regresión (basadas en comportamiento de pavimentos en servicio o pistas de ensayo)

- Con criterio de falla por corte

- Con criterio de falla por deflexión

- Racional

- Racional – Empírico (M-E: Mechanistic – Empirical)

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO



1885 Primer vehículo a combustión interna

Métodos Empíricos

1938 CBR (1938 - 1975)
Deflexión

Métodos Racionales

1882 Boussinesq
1943 D. Burmister



1959 Ensayo AASHTO

1961 AASHTO.

1955 Ábacos tricapa

1963 SHELL
1978 SHELL
1980 Programas PC



1980 Aspectos estadísticos

1986 AASHTO.
1993 AASHTO.

1985 agenda SHELL
Diversos programas

Métodos Empírico mecanicistas

2007 1.0 MEPDG NCHRP 1-40D

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

- **Método CBR (empírico)**

- **1950**

California Highway Department (Porter), introducen el ensayo de capacidad portante de la subrasante (CBR).

Uso extensivo del método por el U.S. Corps of Engineers durante la 2da. Guerra Mundial.

**Se transforma en un método popular luego de la Guerra.
Aplicable solo bajo determinadas condiciones de entorno
(ambiente-clima, materiales, condiciones de carga)**

- **Con criterio de falla por corte**

Con el aumento de velocidades y volúmenes de tránsito, los pavimentos comienzan a diseñarse más por comportamiento, en lugar de solo para prevenir la falla por corte.

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

- **Con criterio de falla por deflexión**

El espesor debe ser tal que no exceda una cierta **deflexión admisible**.

- 1947

Kansas State Highway Commission modifica la ecuación de Boussinesq (1885) y limita la deflexión a 0,1" (2,54 mm).

- 1953

U.S. Navy aplica la teoría bicapa de Burmister (1943) y limita la deflexión en superficie a 0,25" (6,35 mm).

Presenta la ventaja de poder medir – de manera relativamente sencilla – la deflexión in situ. (La viga Benkelman)

Sin embargo, la falla de los pavimentos se debe a tensiones y deformaciones excesivas (depende de los estados de tensiones y deformaciones), y no al nivel de deflexiones.

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

- **Basados en el comportamiento (performance)**

Se trata de metodologías empíricas basadas en ecuaciones de regresión, obtenidas a partir de la observación del comportamiento de pavimentos.

- **AASHTO**

Es uno de los principales. Basado en pistas de ensayo. En este caso con ecuaciones basadas en la observación de pavimentos en servicio.

Desventaja: las ecuaciones de regresión resultan válidas dentro del ámbito de las condiciones para las que fueron desarrolladas. Para otras condiciones, es necesario modificar las mismas, a partir de principios teóricos o experiencias específicas.

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

- **Basados en el comportamiento (performance)**

Se trata de metodologías empíricas basadas ecuaciones de regresión, obtenidas a partir de la observación del comportamiento de pavimentos.

- **AASHTO (Caso de refuerzo de pavimentos)**

En el caso del estudio de pavimentos en servicio, los materiales y metodologías constructivas pueden no haber sido controlados adecuadamente, por lo que resultan esperables mayores dispersiones y errores asociados. Si bien estas ecuaciones permiten explicar la relaciones **causa-efecto** de ciertos comportamientos, su nivel de incertidumbre limita la utilización con fines de diseño.

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

- **Método Racional**

Está basado en principios de la mecánica de calzadas. Relaciona ciertas sollicitaciones del sistema (ej.: carga por rueda) con las correspondientes respuestas en el pavimento (ej.: tensiones y deformaciones específicas).

- 1963

Dormon y Metcalf presentan los conceptos anteriores, como criterios de falla para el diseño de pavimentos flexibles. Método Shell '63

- 1978

Claussen adoptan esos dos criterios para el método de diseño de la Shell Petroleum International. Método Shell '78

- 1980

Shook adoptan esos dos criterios para el método de diseño del Asphalt Institute.

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO

La teoría de mecánica de calzadas, por sí sola, no resulta suficiente para diseñar pavimentos de manera confiable (discrepancias entre modelos teóricos y la realidad).

Estos métodos **mejoran la confiabilidad del diseño**, brindando la posibilidad de **extrapolar resultados** a partir de un **número limitado** de **observaciones** de campo y **ensayos** de laboratorio.

- **Método Racional–Empírico (M-E Mechanistic – Empirical)**

Está basado en principios de la mecánica de calzadas. Relaciona ciertas sollicitaciones del sistema (ej.: carga por rueda) con las correspondientes respuestas en el pavimento (ej: tensiones y deformaciones específicas).

Los valores de esas respuestas se utilizan luego para predecir deterioros, a partir de ensayos de laboratorio y datos de campo sobre comportamiento de pavimentos.

METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS

- **Factores que afectan el diseño**
 - **Tránsito**
 - Carga total y presión de inflado
 - Repetición de cargas
 - Radio de la carga
 - Velocidad de aplicación
 - Ejes y configuración
 - Distribución transversal de las cargas
 - **Clima**
 - Régimen de lluvias
 - Congelamiento
 - Deshielo
 - Contracción e hinchamiento de los suelos
 - Temperatura

METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS

- **Factores que afectan el diseño**
 - **Perfil transversal y posición**
 - Sección en desmonte o terraplén
 - Profundidad de la napa freática
 - Deslizamientos o asentamientos
 - **Construcción y mantenimiento**
 - Compactación de subbase y bases
 - Deformación de subrasantes, subbases y bases

METODOLOGÍA AASHTO '93

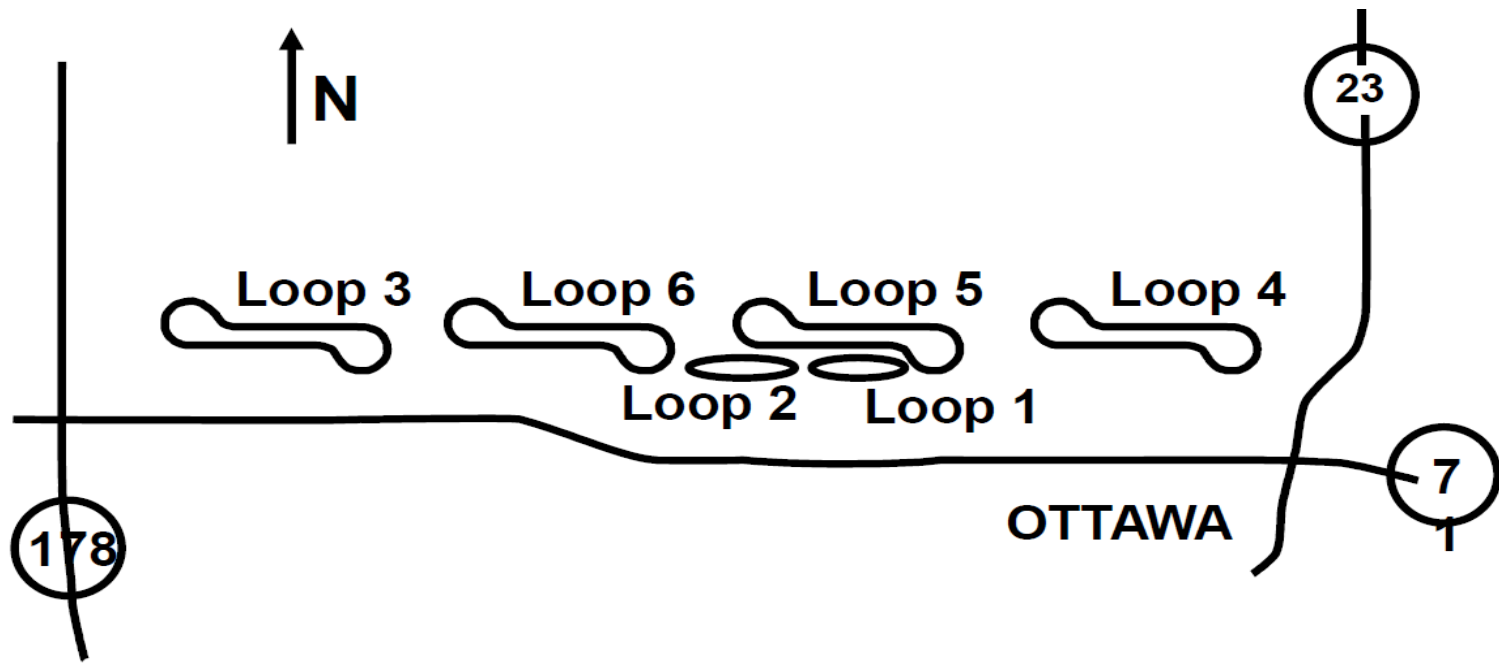
DISEÑO DE PAVIMENTOS

- Camino Experimental AASHO ejecutado en Ottawa, Illinois Años 1958-1959-1960.
- 6 Circuitos, 1 sin tránsito y 5 con tránsito con distintas cargas por eje que no se mezclaban.
- Diferentes niveles de diseños (desde insuficientes hasta sobredimensionados)
- 468 combinaciones de pavimento flexible.
- 368 combinaciones de pavimento rígido.
- Factorial 3x3x3, 3 espesores de Subbase, 3 de Base y 3 de Capa Asfáltica.
- Cerca de Otawa (Illinois - 128 Km al SO de Chicago)
- **Objetivo: determinar relaciones significativas entre el número de repeticiones de una carga por eje específica (diferentes magnitudes y configuraciones), y el comportamiento de diferentes espesores de pavimentos (HRB, 1962).**

METODOLOGÍA AASHTO '93

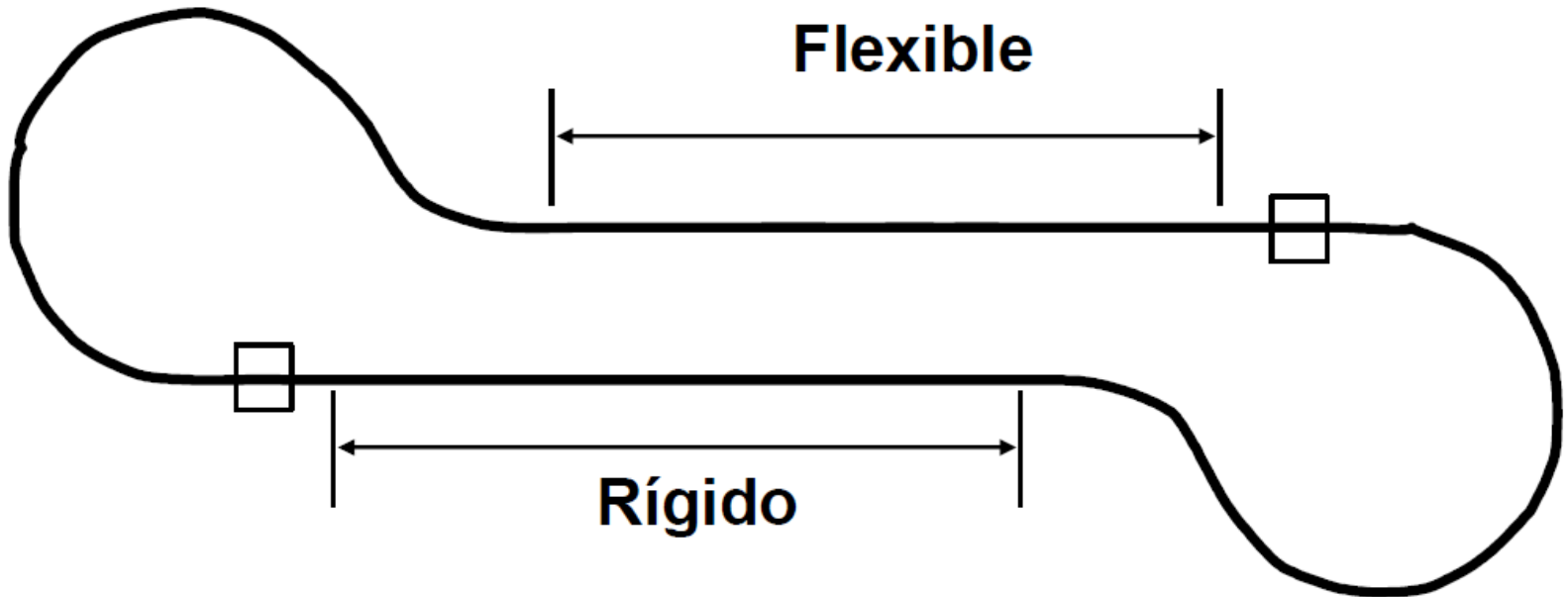
DISEÑO DE PAVIMENTOS

- 4 grandes loops (# 4, 5, 6) y 2 más pequeños (# 1, 2)
- Cada loop: 2 tangentes (610m a 2070m cada una, según el loop). Una de las tangentes (Norte): pavimento flexible (sucesión de diferentes secciones estructurales; corta longitud cada una).
- Inicio de la construcción 1956; inauguración 15 de Octubre de 1958; operación hasta 30 de Noviembre de 1960 (1.114.000 ejes aplicados; US\$ 27.000.000)



METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS



Loop 5

METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS

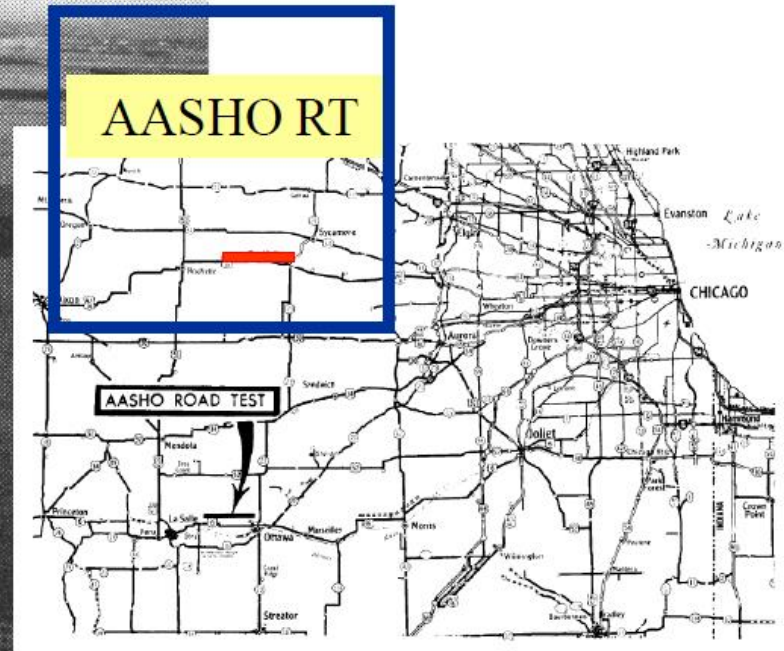
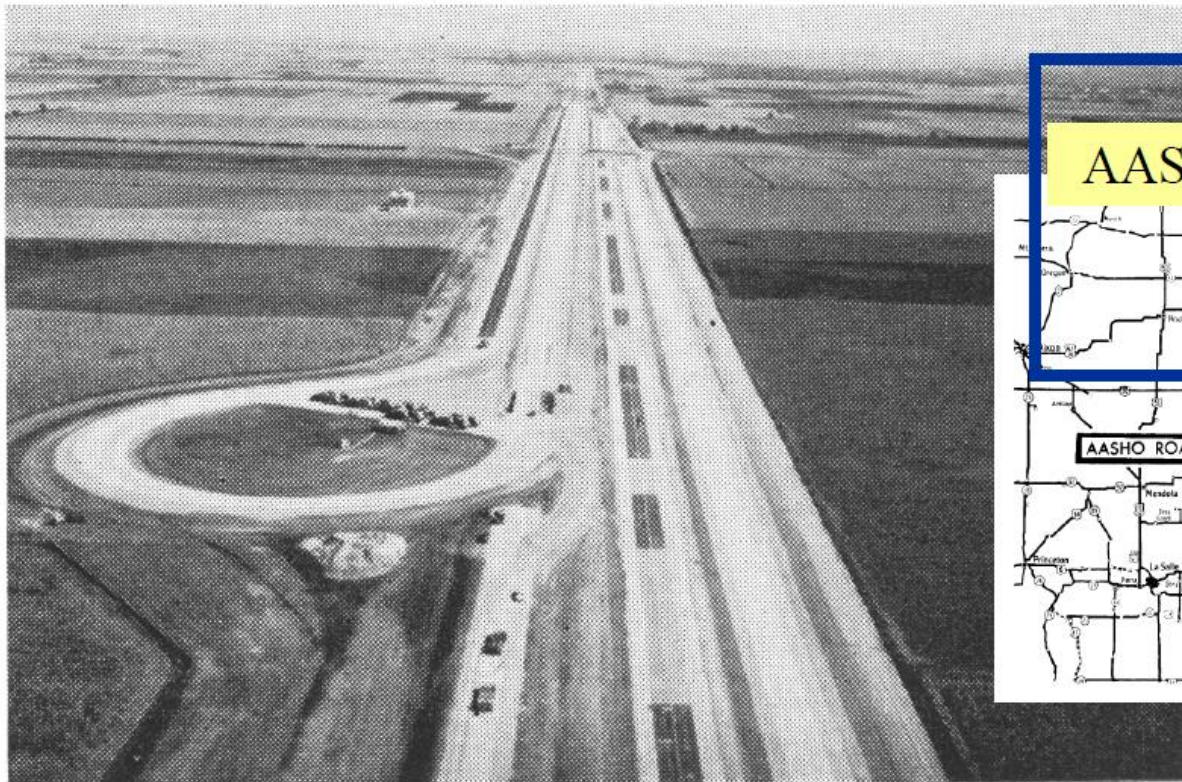
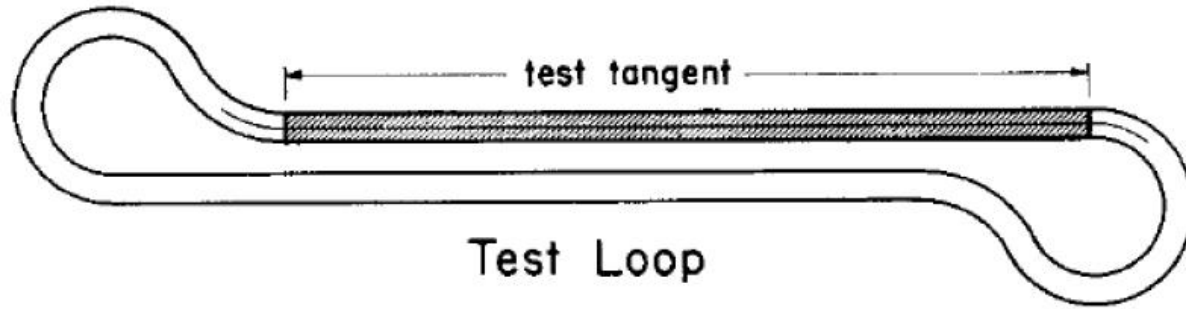
AASHTO Road Test (1958-1960)

- Tercer ensayo a gran escala en pavimentos.
- Se evaluaron secciones de pavimento rígido y flexible.
- Se evaluaron distintas configuraciones de carga, espesores de calzada y subbase.
- Se estudiaron secciones de pavimentos de hormigón simple y reforzado.
- Objetivo central: desarrollar relaciones entre cargas de tránsito pesado aplicadas, estructura del pavimento y pérdida de Serviciabilidad.



METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS



(AASHO, 1961)

METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS

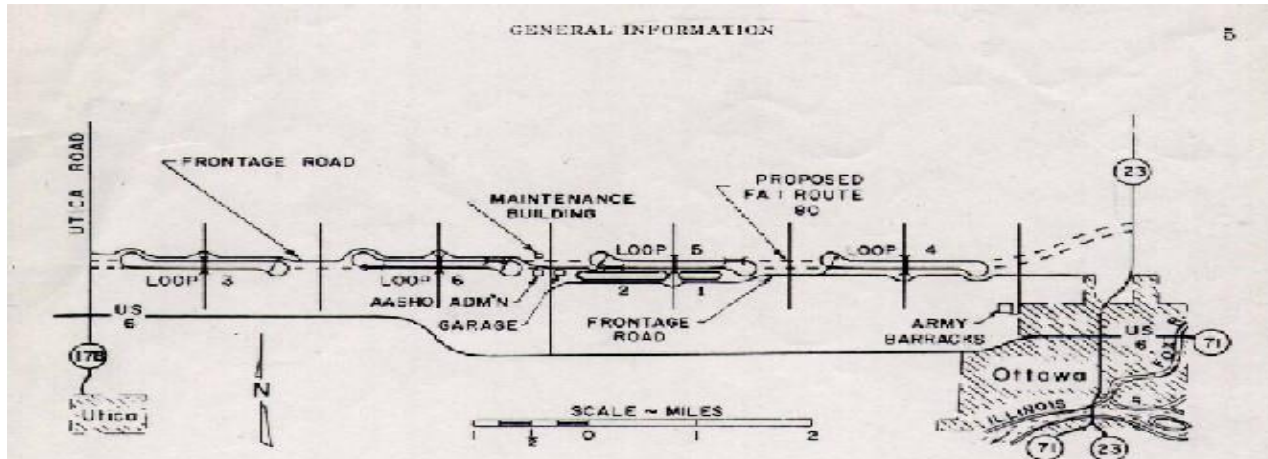


Figure 2. Layout of AASHTO Road Test.

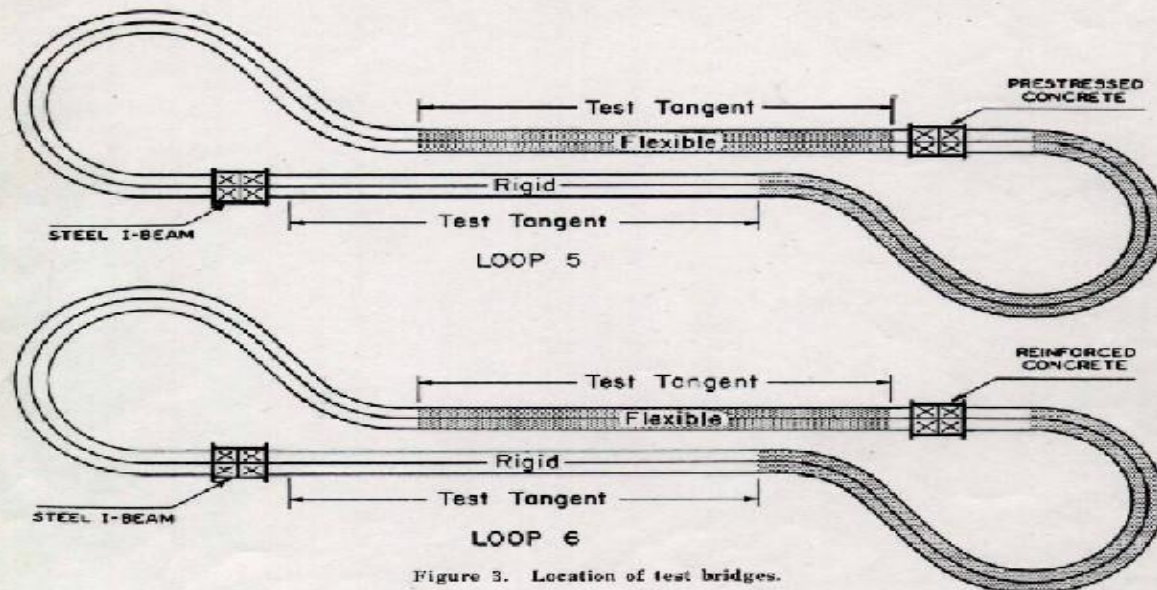


Figure 3. Location of test bridges.

METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS

Loop 1				Loop 2				Loop 3				Loop 4				Loop 5				Loop 6								
Axle Load				Axle Load				Axle Load				Axle Load				Axle Load				Axle Load								
Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2						
None		None		2,000-S		6,000-S		12,000-S		24,000-T		18,000-S		32,000-T		22,400-S		40,000-T		30,000-S		48,000-T						
Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1								
Surface Thickness	Base Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.		Surface Thickness	Base Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.		Surface Thickness	Base Thickness	Subbase Thickness	Factorial Block	Test Section No.		Surface Thickness	Base Thickness	Subbase Thickness	Factorial Block	Test Section No.		Surface Thickness	Base Thickness	Subbase Thickness	Factorial Block	Test Section No.		
			Lane 1	Lane 2				Lane 1	Lane 2					Lane 1	Lane 2					Lane 1	Lane 2					Lane 1	Lane 2	Lane 1
1	0	0	857	858	0	4	721	722	0	1	165	166	0	1	633	634	0	1	485	486	0	1	269	270	0	1	299	300
		8	867	868	0	4	727	728	4	3	125	126	8	2	607	608	8	2	451	452	12	2	299	300	12	2	317	318
		16	833	834	0	4	743	744	8	2	143	144	12	3	571	572	12	3	415	416	16	1	317	318	16	1	329	330
	0	827	828	0	4	717	718	0	3	113	114	4	2	599	600	4	2	449	450	8	2	303	304	8	2	323	324	
	8	847	848	0	4	719	720	0	3	135	136	8	3	573	574	8	3	419	420	12	1	487	488	12	1	323	324	
	16	839	840	0	4	771	772	0	3	159	160	8	3	585	586	12	1	487	488	16	3	253	254	16	3	321	322	
3	0	0	859	860	0	4	729	730	0	2	127	128	0	2	623	624	0	1	471	472	0	1	267	268	0	1	297	298
		8	869	870	0	4	731	732	8	3	111	112	8	2	601	602	8	2	441	442	12	2	309	310	12	2	327	328
		16	829	830	0	4	741	742	0	2	137	138	12	2	623	624	12	2	441	442	16	2	267	268	16	2	297	298
	0	827	828	0	4	709	710	0	4	163	164	4	3	583	584	4	3	411	412	8	1	319	320	8	1	319	320	
	8	837	838	0	4	739	740	0	3	109	110	8	1	619	620	8	1	481	482	12	3	261	262	12	3	251	252	
	16	825	826	0	4	759	760	0	3	147	148	12	2	603	604	12	2	443	444	16	2	315	316	16	2	259	260	
5	0	0	851	852	0	4	775	776	0	1	147	148	0	1	627	628	0	1	455	456	0	1	305	306	0	1	307	308
		8	875	876	0	4	737	738	8	3	107	108	8	2	589	590	8	2	455	456	12	2	307	308	12	2	321	322
		16	819	820	0	4	711	712	8	3	115	116	12	2	575	576	12	2	425	426	16	1	327	328	16	1	321	322
	0	821	822	0	4	769	770	0	2	129	130	4	3	595	596	4	2	437	438	8	2	313	314	8	2	313	314	
	8	823	824	0	4	749	750	0	3	117	118	8	3	577	578	8	3	417	418	12	1	477	478	12	1	331	332	
	16	865	866	0	4	773	774	0	2	131	132	12	1	625	626	12	1	477	478	16	3	265	266	16	3	295	296	
3	0	0	871	872	0	4	745	746	0	3	119	120	0	3	587	588	0	3	421	422	0	3	335	336	0	3	335	336
		8	849	850	0	4	749	750	0	2	141	142	8	1	621	622	8	1	479	480	12	3	257	258	12	3	257	258
		16	879	880	0	4	763	764	0	1	153	154	12	3	579	580	12	3	423	424	16	2	301	302	16	2	301	302
	0	823	824	0	4	739	740	0	1	161	162	4	3	591	592	4	1	475	476	8	3	271	272	8	3	271	272	
	8	865	866	0	4	745	746	0	3	123	124	8	2	591	592	8	2	447	448	12	2	311	312	12	2	311	312	
	16	877	878	0	4	773	774	0	2	139	140	12	3	581	582	12	3	427	428	16	1	333	334	16	1	333	334	
5	0	0	861	862	0	4	751	752	0	3	121	122	0	1	615	616	0	1	483	484	0	1	263	264	0	1	277	278
		8	831	832	0	4	755	756	0	3	121	122	8	2	609	610	8	2	407	408	12	3	293	294	12	3	273	274
		16	853	854	0	4	767	768	0	1	149	150	12	2	639	640	12	2	433	434	16	2	295	296	16	2	295	296
	0	817	818	0	4	765	766	0	1	161	162	4	3	613	614	4	1	475	476	8	3	263	264	8	3	271	272	
	8	855	856	0	4	715	716	0	3	121	122	8	3	577	578	8	3	417	418	12	1	477	478	12	1	331	332	
	16	845	846	0	4	747	748	0	2	141	142	12	2	593	594	12	2	445	446	16	2	301	302	16	2	301	302	
3	0	0	855	856	0	4	765	766	0	1	161	162	0	1	615	616	0	1	483	484	0	1	263	264	0	1	277	278
		8	845	846	0	4	747	748	0	3	123	124	8	2	591	592	8	2	447	448	12	2	311	312	12	2	311	312
		16	835	836	0	4	713	714	0	2	139	140	12	3	581	582	12	3	427	428	16	1	333	334	16	1	333	334
	0	861	862	0	4	755	756	0	3	121	122	8	2	609	610	8	2	407	408	12	3	293	294	12	3	273	274	
	8	831	832	0	4	755	756	0	3	123	124	8	2	609	610	8	2	407	408	12	3	293	294	12	3	273	274	
	16	853	854	0	4	767	768	0	1	149	150	12	2	639	640	12	2	433	434	16	2	295	296	16	2	295	296	
3	0	0	855	856	0	4	765	766	0	1	161	162	0	1	615	616	0	1	483	484	0	1	263	264	0	1	277	278
		8	845	846	0	4	747	748	0	3	123	124	8	2	591	592	8	2	447	448	12	2	311	312	12	2	311	312
		16	835	836	0	4	713	714	0	2	139	140	12	3	581	582	12	3	427	428	16	1	333	334	16	1	333	334
	0	855	856	0	4	765	766	0	1	161	162	4	3	591	592	4	1	475	476	8	3	263	264	8	3	271	272	
	8	845	846	0	4	747	748	0	3	123	124	8	2	591	592	8	2	447	448	12	2	311	312	12	2	311	312	
	16	835	836	0	4	713	714	0	2	139	140	12	3	581	582	12	3	427	428	16	1	333	334	16	1	333	334	
3	0	0	861	862	0	4	751	752	0	3	121	122	0	1	615	616	0	1	483	484	0	1	263	264	0	1	277	278
		8	831	832	0	4	755	756	0	3	121	122	8	2	609	610	8	2	407	408	12	3	293	294	12	3	273	274
		16	853	854	0	4	767	768	0	1	149	150	12	2	639	640	12	2	433	434	16	2	295	296	16	2	295	296
	0	817	818	0	4	765	766	0	1	161	162	4	3	591	592	4	1	475	476	8	3	263	264	8	3	271	272	
	8	855	856	0	4	715	716	0	3	121	122	8	3	577	578	8	3	417	418	12	1	477	478	12	1	331	332	
	16	845	846	0	4	747	748	0	2	141	142	12	2	593	594	12	2	445	446	16	2	301	302	16	2	301	302	
3	0	0	855	856	0	4	765	766	0	1	161	162	0	1	615	616</												

METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS

Loop 1				Loop 2				Loop 3				Loop 4				Loop 5				Loop 6						
Axle Load				Axle Load				Axle Load				Axle Load				Axle Load				Axle Load						
Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2		Lane 1		Lane 2				
None		None		2,000-5		6,000-5		12,000-5		24,000-T		18,000-S		32,000-T		22,400-S		40,000-T		30,000-S		48,000-T				
Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1				Main Factorial Design Design 1						
Slab Type	Slab Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.	Slab Type	Slab Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.	Slab Type	Slab Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.	Slab Type	Slab Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.	Slab Type	Slab Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.	Slab Type	Slab Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.			
																								Lane 1	Lane 2	Lane 1
Nonreinforced	N	0	335	336	2 1/2	3	605	606	3 1/2	3	195	196	5	6	229	230	6 1/2	3	643	644	8 1/2	5	513	514		
			333	334			791	792			6	647			648	6			517	518						
		6	803	804	5	6	785	786		4	9	213	214	3	6	497		498	11	6	505	506	10 1/2	8	353	354
			823	824			813	814				3	449			450		3			547	548			3	351
		6	925	926	4	3	811	812		6	6	245	246	11	6	539		540	12 1/2	8	539	540	10 1/2	6	367	368
			891	892			787	788				6	221			222		6			533	534			6	389
	6	919	920	3	6	801	802	5	9	219	220	11	6	507	508	12 1/2	8	511	512	10 1/2	6	375	376			
		845	846			797	798			3	673			674	3			541	542			3	377	378		
	6	909	910	3	6	781	782	6	6	249	250	11	6	541	542	12 1/2	8	525	526	10 1/2	6	397	398			
		913	914			777	778			3	687			688	3			541	542			3	363	364		
	6	895	896	3	6	709	710	5	9	207	208	11	6	525	526	12 1/2	8	535	536	10 1/2	6	365	366			
		897	898			803	804			3	675			676	3			529	530			3	395	396		
6	931	932	3	6	723	724	6	6	185	186	11	6	523	524	12 1/2	8	497	498	10 1/2	6	343	344				
	909	910			779	780			3	681			682	3			509	510			3	379	380			
6	905	906	3	6	783	784	5	9	201	202	11	6	519	520	12 1/2	8	521	522	10 1/2	6	381	382				
	927	928			807	808			3	705			706	3			521	522			3	371	372			
6	907	908	3	6	807	808	6	6	191	192	11	6	501	502	12 1/2	8	501	502	10 1/2	6	403	404				
	915	916			809	810			3	695			696	3			531	532			3	339	340			
6	847	848	3	6	795	796	5	9	233	234	11	6	553	554	12 1/2	8	553	554	10 1/2	6	391	392				
	893	894			783	784			3	669			670	3			563	564			3	357	358			
6	893	894	3	6	807	808	6	6	189	190	11	6	505	506	12 1/2	8	499	500	10 1/2	6	345	346				
	905	906			807	808			3	707			708	3			505	506			3	357	358			
6	911	912	3	6	795	796	5	9	247	248	11	6	515	516	12 1/2	8	515	516	10 1/2	6	359	360				
	907	908			809	810			3	667			668	3			499	500			3	345	346			

Subsurface Studies Design 5				
Slab Type	Slab Thickness	Subbase Thickness	Test Section No.	
				Lane 1
Non-Reinforced	5	0	303	304
			323	324
			329	330
			305	306

Shoulder Paving-No Subbase Design 3					
Slab Type	Shoulder Paving	Slab Thickness	Subbase Thickness		
				Lane 1	Lane 2
Nonreinforced	With	3 1/2	0	189	190
				235	236
		6	0	229	230
				244	245
		6	0	223	224
				243	244
	6	0	227	228	
			241	242	
	Without	3 1/2	0	189	190
				235	236
		6	0	229	230
				244	245
6		0	223	224	
			243	244	
6	0	227	228		
		241	242		

Shoulder Paving-No Subbase Design 3					
Slab Type	Shoulder Paving	Slab Thickness	Subbase Thickness		
				Lane 1	Lane 2
Nonreinforced	With	5	0	659	660
				647	648
		6	0	663	664
				603	604
		6	0	668	669
				679	680
	6	0	699	700	
			697	698	
	Without	5	0	659	660
				647	648
		6	0	663	664
				603	604
6		0	668	669	
			679	680	
6	0	699	700		
		697	698		

Shoulder Paving-No Subbase Design 3					
Slab Type	Shoulder Paving	Slab Thickness	Subbase Thickness		
				Lane 1	Lane 2
Nonreinforced	With	5	0	537	538
				517	518
		6	0	493	494
				521	522
		6	0	555	556
				489	490
	6	0	551	552	
			627	628	
	Without	5	0	537	538
				517	518
		6	0	493	494
				521	522
6		0	555	556	
			489	490	
6	0	551	552		
		627	628		

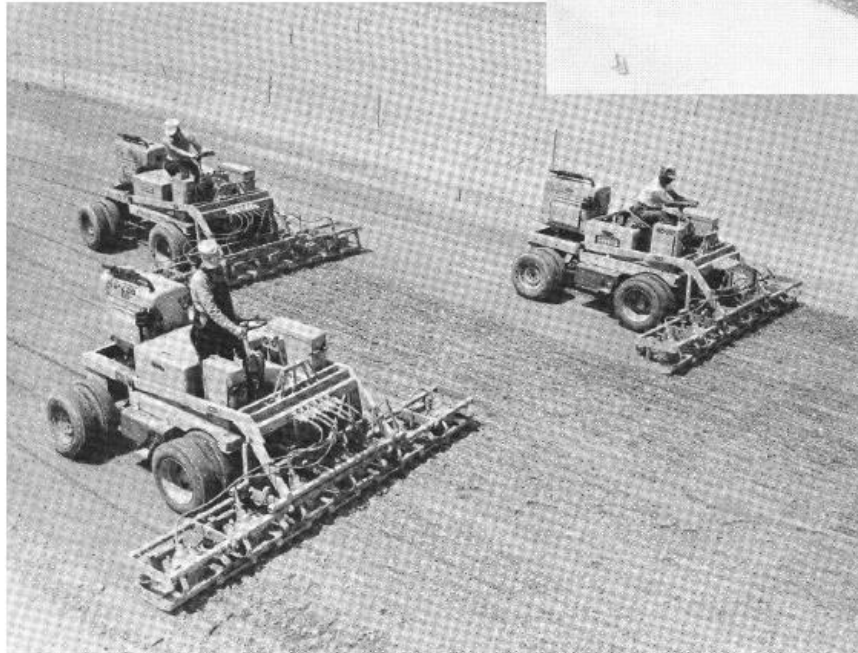
Shoulder Paving-No Subbase Design 3					
Slab Type	Shoulder Paving	Slab Thickness	Subbase Thickness		
				Lane 1	Lane 2
Nonreinforced	With	5	0	373	374
				375	376
		6	0	353	354
				391	392
		6	0	351	352
				401	402
	6	0	399	400	
			387	388	
	Without	5	0	373	374
				375	376
		6	0	353	354
				391	392
6		0	351	352	
			401	402	
6	0	399	400		
		387	388		

Table 36 Designs for Rigid Pavement Experiments

Note
Shaded sections are replicate sections.
Cross hatched sections are those borrowed from Design 1.

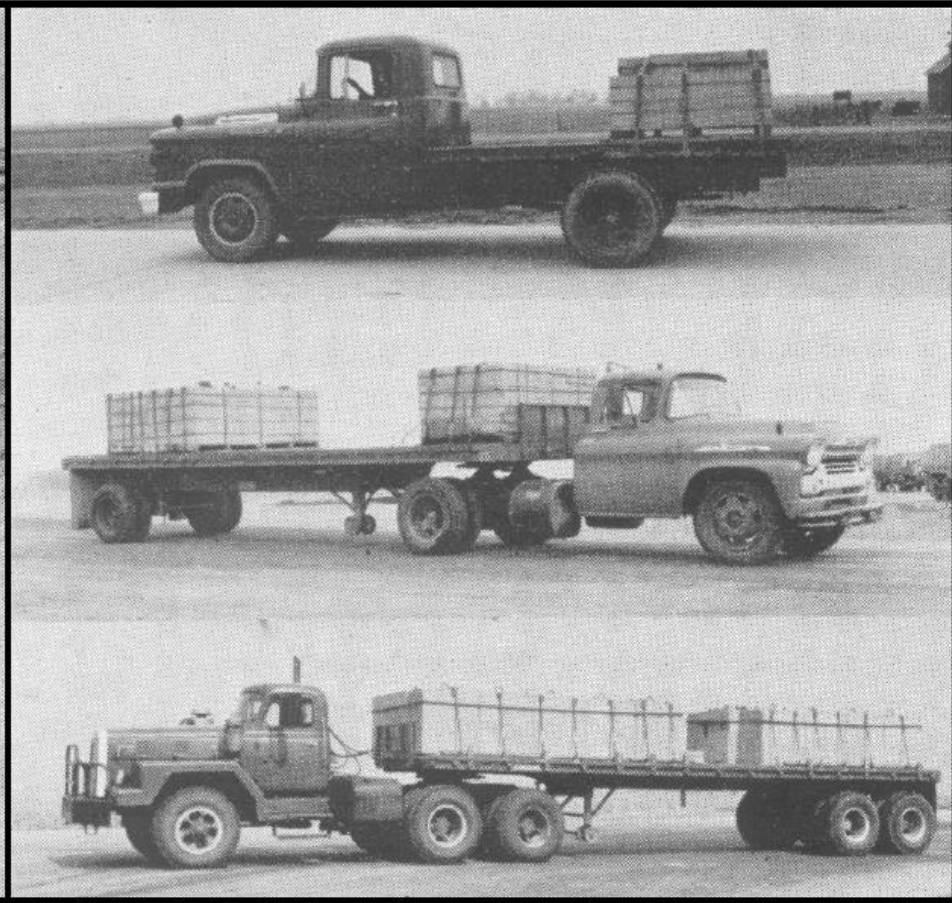
METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS



METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS



METODOLOGÍA AASHTO '93

DISEÑO DE PAVIMENTOS

Loop #	1		2		3		4		5		6	
Carril #	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Carga por eje (Lb)	-	-	2000 Simple	6000 Simple	12000 Simple	24000 Tandem	18000 Simple	32000 Tandem	22400 Simple	40000 Tandem	30000 Simple	48000 Tandem

METODOLOGÍA AASHTO '93

CONCLUSIONES

- Orden de superioridad según tipo de base:
 - Bituminosa (bituminous treated)
 - Tratada con cemento (cement treated)
 - Piedra triturada (crushed stone)
 - Piedra redondeada (gravel) (la mayoría de las secciones con este tipo de base fallaron tempranamente)
- La estructura necesaria para mantener cierta serviciabilidad después de un cierto número de repeticiones de ejes sería de espesores menores en la huella interna que en la externa.
- El ahuellamiento se debió fundamentalmente a la disminución del espesor de capas componentes del pavimento (91%), distribuido de la siguiente manera:
 - 32% en la capa superficial
 - 14% en la base
 - 45% en la subbase
 - 9% en la subrasante
 - En general, la disminución del espesor de las capas componentes del pavimento no se debió a aumentos de densidad, sino a desplazamientos laterales de los materiales.

METODOLOGÍA AASHTO '93

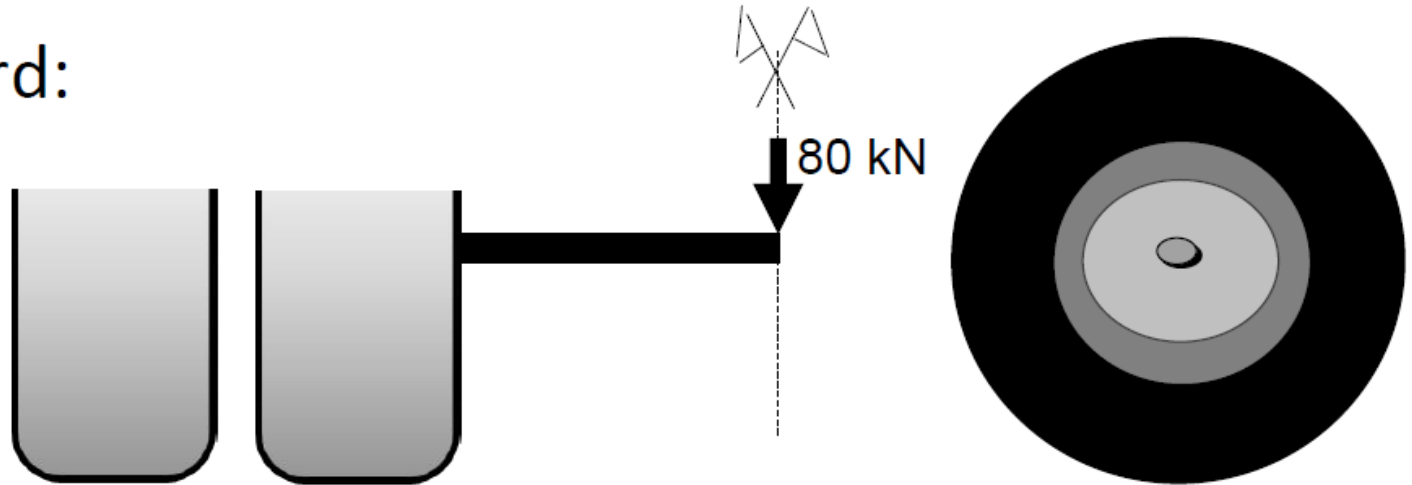
CONCLUSIONES

- Mayor ocurrencia de fisuración superficial durante períodos en los que el pavimento se encuentra en condiciones de clima frío.
- La deflexión dentro de la estructura del pavimento (superficie, base, subbase y superficie de la subrasante) fue mayor en la primavera (coincidente con mayores humedades en los materiales no ligados) que inmediatamente luego del verano.
- Elevada correlación entre la deflexión a nivel de la superficie de la subrasante y la deflexión total, así como entre deflexión y ahuellamiento.
- Importante reducción de deflexiones con el incremento de la velocidad de los vehículos (aumentar la velocidad de 3,2 a 56 km/h) redujo las deflexiones totales en 38% y las de la subrasante 35%.

METODOLOGÍA AASHTO '93

EJES SIMPLES EQUIVALENTES

- ESAL: Equivalent Standard Axle Load
- Eje Standard:



- Convertir tránsito mixto en ejes simples equivalentes de 80 kN (18 kip; 8.16 ton)
- Equivalencia de ejes basada en EFECTO DESTRUCTIVO (pérdida de serviciabilidad)
- Factores de equivalencia de carga (para la conversión)

METODOLOGÍA AASHTO '93

EJES SIMPLES EQUIVALENTES

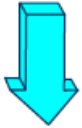
- Factor Equivalencia de Carga por Eje (FEC)
 - Número de repeticiones de una carga patrón (eje simple ruedas duales de 80 kN) que produce el mismo deterioro (pérdida de serviciabilidad) que un determinado eje con cierta carga específica.
 - FEC es función de:
 - Tipo de pavimento
 - Capacidad estructural del pavimento
 - Tipo de eje
 - Condición del pavimento

$$FEC = \frac{N^{\circ} \text{ ejes..patrón}}{N^{\circ} \text{ otros..ejes}}$$

Ambos grupos producen idéntico deterioro

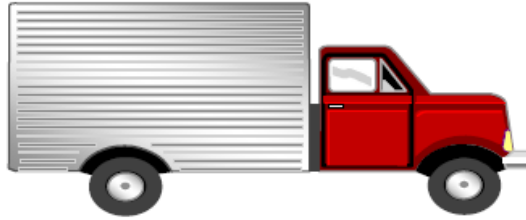
METODOLOGÍA AASHTO '93

EJES SIMPLES EQUIVALENTES



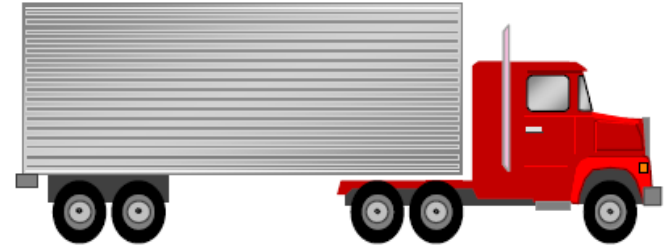
X

80 kN



Y

80 kN



Z

80 kN



METODOLOGÍA AASHTO '93

CRITERIO DE DISEÑO

Completando el antiguo criterio de que un material se comporta bien bajo una adecuado espesor de protección (Tapada), este método, plantea que la función de caída de la serviciabilidad con el número de reiteraciones de ejes de referencia, depende de una combinación entre espesores y calidades de los materiales que constituyen la estructura.

$$\text{Log } N = f (\Delta PSI, M_R, SN, Z_R, S_0)$$

ΔPSI Pérdida de serviciabilidad

M_R módulo subrasante (psi)

SN número estructural: $SN_i = a_i * h * m_i$

$$SN = \sum SN_i$$

a_i valor de aporte estructural 1/pulg

h espesor (pulg)

m_i factor de drenaje

Z_R función de la confiabilidad

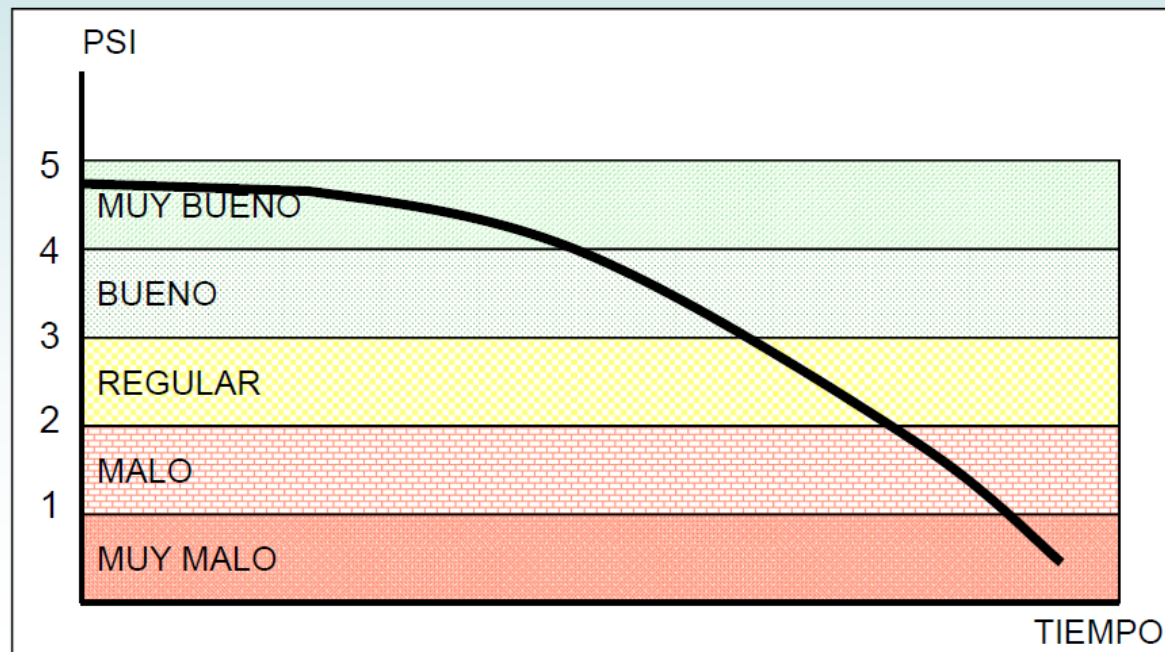
S_0 certeza de la información y calidades constructivas

METODOLOGÍA AASHTO '93

ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD

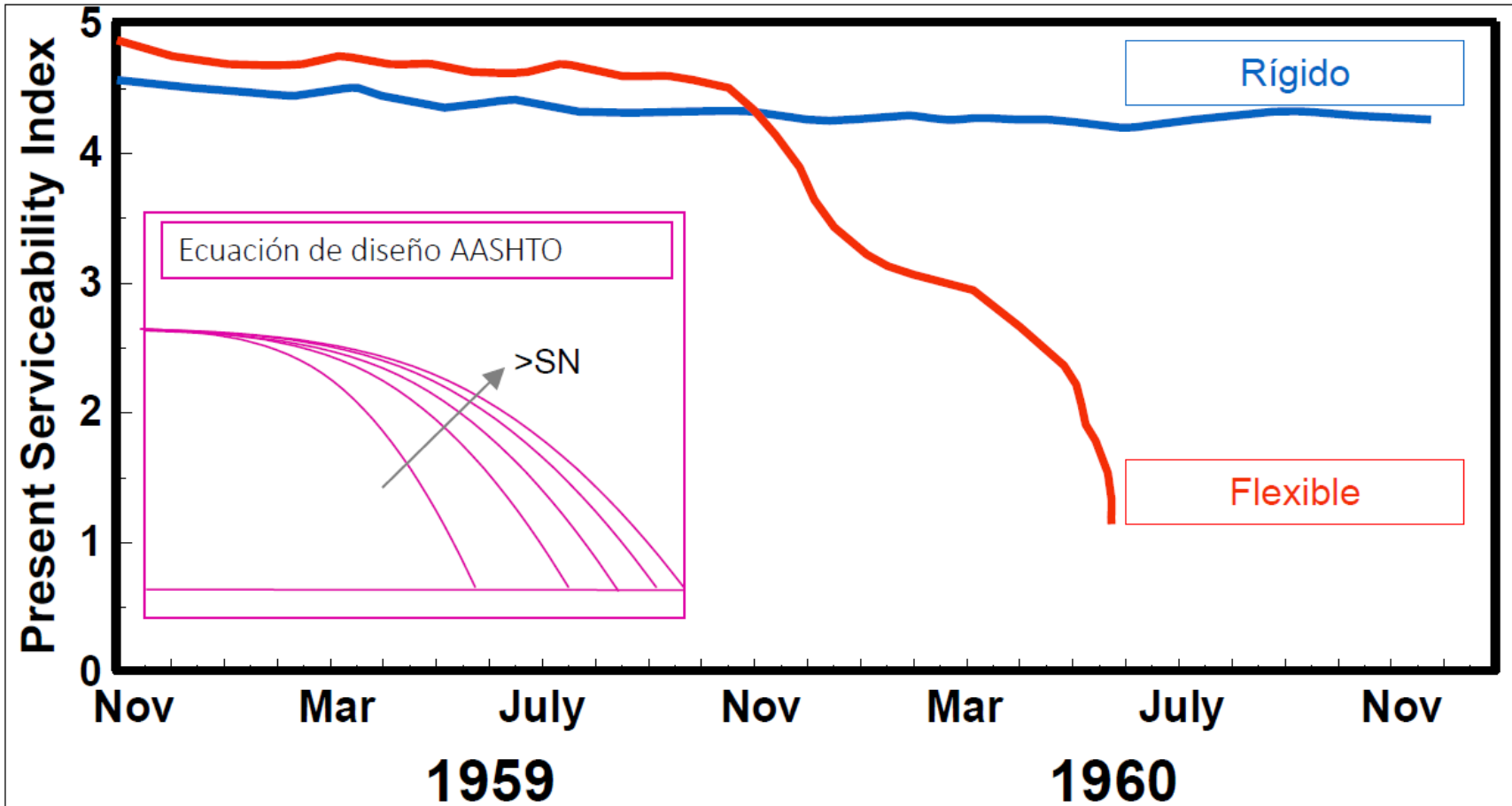
PRESENT SERVICIABILITY INDEX

- Para obtener el punto de vista de los usuarios un equipo de personas recorrió 138 secciones de camino
- rangos predefinidos para calificación:



METODOLOGÍA AASHTO '93

ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD



METODOLOGÍA AASHTO '93

ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD

Para pavimentos flexibles la expresión es:

$$PSI=5,03-1,91 \log(1+SV)-1,38(RD)^2-0,01(C+P)^{0,5} \quad (2.1)$$

donde:

SV=varianza del perfil sobre la sección en estudio, medida con el perfilómetro CHLOE, x10 (pulg/pie)²

RD=profundidad de ahuellamiento medio, pulg

C=piel de cocodrilo, clase 2 y clase 3 (pies²/1000pies²)

Clase 2 es cuando todas las fisuras se han unido para formar la piel de cocodrilo. Clase 3 es cuando algunos trozos del cuarteado resultante han desaparecido

P= parches (pies²/1000pies²)

Para pavimentos rígidos se tiene la ecuación:

$$PSI=5,41-1,78 \log(1+SV)-0,09(C+P)^{0,5} \quad (2.2)$$

C=fisuras clase 3 y 4, en pies²/1000pies²

Clase 3 es cuando se tiene una fisura abierta o descascarada en superficie hasta un ancho de 6,4 mm (0,25pulg) o más en una distancia de una vez y media la longitud de la fisura. Clase 4 es cuando se refiere a cada fisura sellada.

P=parches (pies²/1000pies²)

METODOLOGÍA AASHTO '93

ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD



METODOLOGÍA AASHTO '93

ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD

Serviciabilidad: capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro a los usuarios

PSI INICIAL	
Pavimentos flexibles	4.2
Pavimentos rígidos	4.5
PSI FINAL	
Caminos muy importantes	2.5 o más
Caminos de menor tránsito	2.0

METODOLOGÍA AASHTO '93

ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD

- PSI – Opinión de Usuarios (USA)

PSI_f	% que lo considera “Inaceptable”
3.0	12
2.5	55
2.0	85

METODOLOGÍA AASHTO '93

ESTADÍSTICA - CONFIABILIDAD

Las distintas variables involucradas en el proyecto:

- Método de Diseño/Prognosis
- Tránsito
- Materiales
- Ambientales
- Constructivas
- Conservación

presentan dispersiones que ocasionan incertidumbres en el comportamiento de la estructura diseñada y dan origen a los conceptos de riesgo estructural y a su complemento confiabilidad. Aspectos que conllevan fuertes implicancias económicas

METODOLOGÍA AASHTO '93

ESTADÍSTICA - CONFIABILIDAD

- Uso de **enfoque probabilístico**
 - Basado en el concepto de confiabilidad
 - Si se utiliza el PSI como criterio de falla, la **confiabilidad** del diseño (**probabilidad** de que el PSI sea mayor que el PSI_f adoptado) puede determinarse asumiendo que al PSI_f como una **distribución normal** (definida por su media y desvío estándar).
 - De manera inversa, dado un cierto nivel de confiabilidad y PSI requeridos, puede calcularse el nivel aceptable de PSI_f .
 - **Confiabilidad y desviación estándar.** Tiene el mismo significado para pavimentos flexibles, es decir que se refiere al grado de certidumbre de que un dado diseño puede llegar al fin de su período de análisis en buenas condiciones

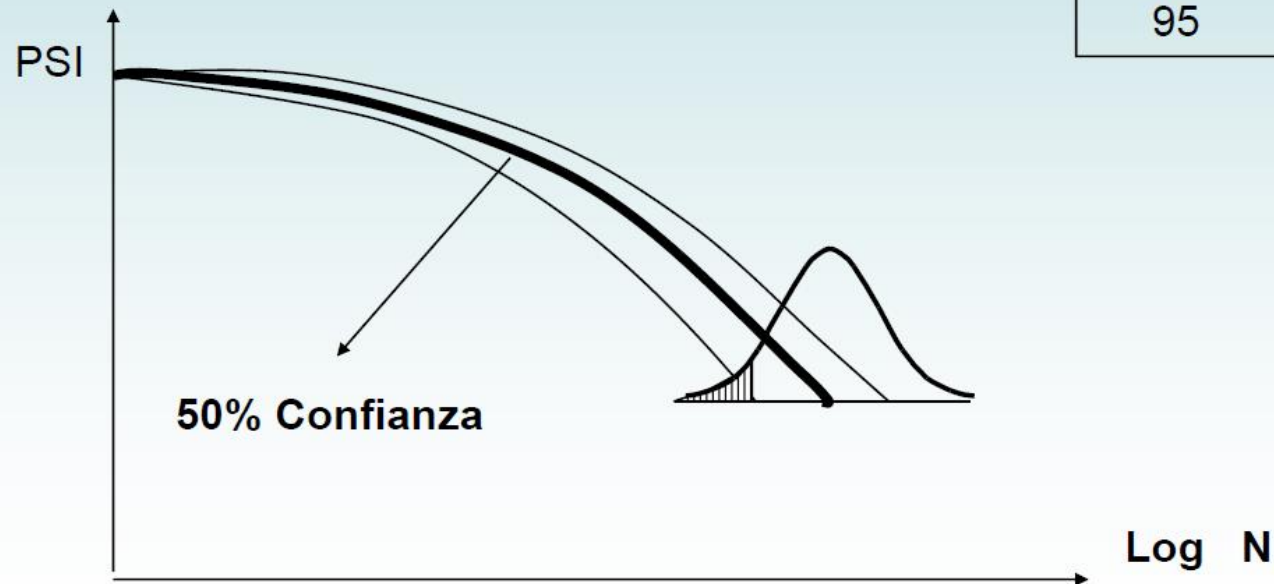
METODOLOGÍA AASHTO '93

ESTADÍSTICA - CONFIABILIDAD

Estadística en los Métodos de Diseño - AASHTO

Función	Confiabilidad	
	Urbano	Rural
Autopistas	85-99.9	80-99.9
Principal	80-99	75-95
Colectoras	80-95	75-95
Local	50-80	50-80

% de Confianza	ZR
10	-1.28
20	-0.84
50	0
80	0.84
90	1.28
95	1.65



$$\text{Log } N = -Z_R S_0 + F(\text{SN}, \text{PSI}, E_s)$$

METODOLOGÍA AASHTO '93

ESTADÍSTICA – DESVIACIÓN ESTANDAR

S_0 DESVIACIÓN ESTANDAR

Representa la certeza de la información y la calidad constructiva

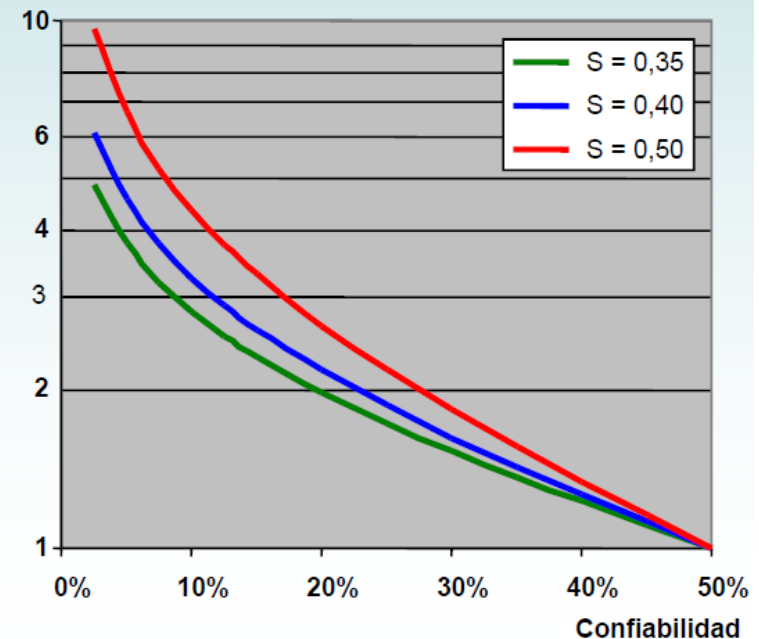
Valores recomendados según AASHTO:

Pavimentos flexibles entre
0.4 y 0.5

Para pavimentos rígidos entre
0.3 y 0.4

Según AASHTO
0.35 en el ensayo

Mayoración del Tránsito



METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

TRÁNSITO (8.16 t - 80 KN - 18 kips)

$$N_{(8,16t)} = \text{TMDA} \times F_d \times F_t \times F_a \times F_p \times \sum_i (\% \text{ vehículo } i \times C_{e(8,16t) i})$$

TMDA: Tránsito medio diario anual del año previo al período de inicio

F_d: Factor de direccionalidad

F_t: Factor de trocha

F_a: Factor para extender el valor “diario” (TMDA) a un determinado número de días (365)

F_p: Factor de acumulación de tránsito (para extender el valor “anual” a un determinado número de años.

$$F_p = \sum_{i=1}^{i=v} (1 + r)^i$$

r: Tasa anual de evolución del tránsito (%)

v: Período de diseño ó vida de diseño (años)

% vehículo _i: Participación porcentual, en el TMDA, de cada tipo de vehículo

C_{e(8,16t) i}: Coeficiente de equivalencia en efecto destructivo, de cada tipo de vehículo

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

Appendix D

D-3

Table D.1. Axle Load Equivalency Factors for Flexible Pavements, Single Axles and p_t of 2.0

Axle Load (kips)	Pavement Structural Number (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002	.0002
4	.002	.003	.002	.002	.002	.002
6	.009	.012	.011	.010	.009	.009
8	.030	.035	.036	.033	.031	.029
10	.075	.085	.090	.085	.079	.076
12	.165	.177	.189	.183	.174	.168
14	.325	.338	.354	.350	.338	.331
16	.589	.598	.613	.612	.603	.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.	108.	97.	86.	81.	82.

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

D-4

Design of Pavement Structures

Table D.2. Axle Load Equivalency Factors For Flexible Pavements, Tandem Axles and p_t of 2.0

Axle Load (kips)	Pavement Structural Number (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0000	0000	0000	0000	0000	0000
4	0003	0003	0003	0002	0002	0002
6	001	001	001	001	001	001
8	003	003	003	003	003	002
10	007	008	008	007	006	006
12	013	016	016	014	013	012
14	024	029	029	026	024	023
16	041	048	050	046	042	040
18	066	077	081	075	069	066
20	103	117	124	117	109	105
22	156	171	183	174	164	158
24	227	244	260	252	239	231
26	322	340	360	353	338	329
28	447	465	487	481	466	455
30	607	623	646	643	627	617

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

Axle Load	Traffic Equivalency Factor	Number of Axles	A18 Kip EAL's
Single Axles			
	P = 2.5, SN = 5		
Under 3,000	0.0002	X 0	= 0.000
3,000 - 6,999	0.0050	X 1	= 0.005
7,000 - 7,999	0.0320	X 6	= 0.192
8,000 - 11,999	0.0870	X 144	= 12.528
12,000 - 15,999	0.3600	X 16	= 5.760
26,000 - 29,999	5.3890	X 1	= 5.3890
Tandem Axle Groups			
Under 6,000	0.0100	X 0	= 0.000
6,000 - 11,993	0.0100	X 14	= 0.140
12,000 - 17,999	0.0440	X 21	= 0.924
18,000 - 23,999	0.1480	X 44	= 6.512
24,000 - 29,999	0.4260	X 42	= 17.892
30,000 - 32,000	0.7530	X 44	= 33.132
32,001 - 32,500	0.8850	X 21	= 18.585
32,501 - 33,999	1.0020	X 101	= 101.202
34,000 - 35,999	1.2300	X 43	= 52.890
18 Kip EAL's for all trucks weighed			= 255.151
$\text{Truck Load Factor} = \frac{\text{18 Kip EAL's for all trucks weighed}}{\text{Number of trucks weighed 165}} = \frac{255.151}{165} = 1.5464$			

Figure D.1. Computation of the Truck Load Factor for 5 Axle or Greater Trucks on Flexible Pavements with an SN = 5 and a Terminal Serviceability of 2.5

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

Table D.21. Worksheet for Calculating 18-kip Equivalent Single Axle Load (ESAL) Applications

Location _____ Example 1 _____		Analysis Period = <u>20</u> Years			
		Assumed SN or D = <u>9"</u>			
Vehicle Types	Current Traffic (A)	Growth Factors (B)	Design Traffic (C)	E.S.A.L. Factor (D)	Design E.S.A.L. (E)
Passenger Cars	5,925	2% 24 30	52,551,787	0008	42,041
Buses	35	24 30	310,433	6806	211,280
Panel and Pickup Trucks	1,135	24 30	10,066,882	0122	122,816
Other 2-Axle/4-Tire Trucks	3	24 30	26,609	0052	138
2-Axle/6-Tire Trucks	372	24 30	3,299,454	1890	623,597
3 or More Axle Trucks	34	24 30	301,563	1303	39,294
All Single Unit Trucks					
3 Axle Tractor Semi-Trailers	19	24 30	168,521	8646	145,703
4 Axle Tractor Semi-Trailers	49	24 30	434,606	6560	285,101
5+ Axle Tractor Semi-Trailers	1,880	24 30	16,674,660	2 3719	39,550,626
All Tractor Semi-Trailers					
5 Axle Double Trailers	103	24 30	913,559	2 3187	2,118,268
6+ Axle Double Trailers	0	24 30			
All Double Trailer Combos					
3 Axle Truck-Trailers	208	24 30	1,844,856	0152	28,042
4 Axle Truck-Trailers	305	24 30	2,705,198	0152	41,119
5+ Axle Truck-Trailers	125	24 30	1,108,688	5317	589,489
All Truck-Trailer Combos					
All Vehicles	10,193		90,406,816	Design E S A L	43,772,314

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

DNV – FEC (8.2 ton)

LIVIANOS	Auto / Camioneta	0,044
ÓMNIBUS	O 11	0,308
	O 12	0,462
CAMIÓN SIN ACOPLADO	C 11	2,640
	C 12	2,508
CAMIÓN CON ACOPLADO	C 11-11	5,280
	C 11-12	4,290
	C 12-11	5,170
	C 12-12	4,224
SEMI-REMOLQUE	C 111	3,564
	C 112	3,960
	C 113	4,510
	C 122	3,850
	C 123	4,092

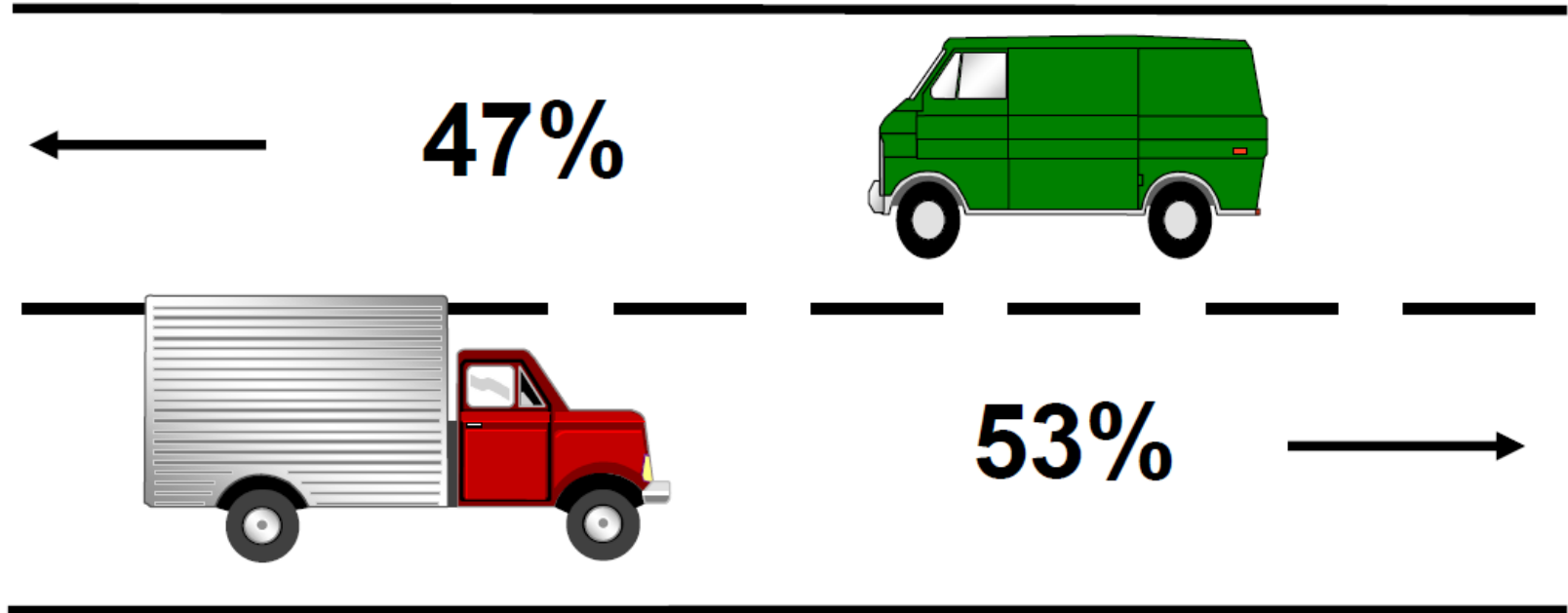
METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

<i>Tipo</i>	<i>Conf.</i>	<i>Ejes</i>	<i>DNV</i>	<i>Lilli y Lockhart RN 7</i>
Ómnibus	1 1	2	0,31	0,69
Ómnibus	1 2	3	0,46	0,60
Camiones sin acoplado	1 1	2	2,64	0,69
Camiones sin acoplado	1 2	3	2,51	0,60
Camiones con acoplado	1 1 1 1	4	5,28	2,72
Camiones con acoplado	1 1 1 2	5	4,29	4,60
Camiones con acoplado	1 2 1 1	5	5,17	3,73
Camiones con acoplado	1 2 1 2	6	4,22	3,85
Semirremolques	1 1 1	3	3,56	3,19
Semirremolques	1 1 2	4	3,96	1,64
Semirremolques	1 1 3	5	4,51	2,61
Semirremolques	1 2 2	5	3,85	1,96
Semirremolques	1 2 3	6	4,09	1,38

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO – SENTIDO



Distribución por Sentido

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO – DISTRIBUCIÓN

Distribución por Carril

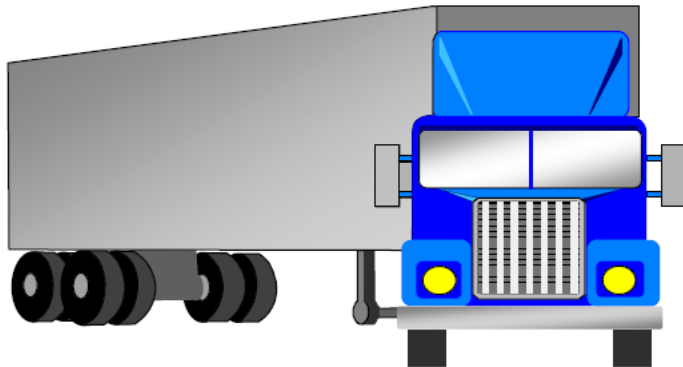
25% camiones

75% camiones

→ **8% camiones**

→ **39% camiones**

→ **53% camiones**



*Diseño para
la peor condición!!*

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO – DISTRIBUCIÓN

Distribución por carril (USA)

Número de carriles en cada dirección	% de tránsito en el carril de diseño (ESAL 18 Kip)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 o más	50 - 75

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO – FACTOR DE DISTRIBUCIÓN COMBINADO

TIPO DE VEHÍCULO	DISTRIBUCIÓN DE EJES	NÚMERO DE EJES (14)	% DE CADA TIPO DE VEHÍCULO (15)	FACTOR "C" (16)	Nº DE EJES (17)=(14)*(15)*(16)
Automóviles y camionetas	1,1	2	0,75	0,01	0,0150
Ómnibus	1,1	2	0,02	0,07	0,0028
Camiones	1,1	2	0,06	0,6	0,0720
Camiones	1,2	3	0,03	0,38	0,0342
Camiones	1,1-1,2	5	0,06	0,39	0,1170
Camiones	1,1 - 2	4	0,04	0,45	0,0720
Camiones	1,2 - 3	5	0,04	0,35	0,0700

Factor de contribución combinado (18) Ct=

0,3830

Ejes de 10 t / vehículo

METODOLOGÍA AASHTO '93

TRÁNSITO

- Aspectos relevantes para predicción de tránsito futuro
 - Crecimiento del número de ejes actuales
 - Cambios posibles en las siguientes distribuciones:
 - Espectro de cargas
 - Distribución por sentido
 - Distribución por carril
 - Distribución horaria, diaria, mensual, etc.
- Hipótesis comunes
 - Aumento constante en el volúmen de tránsito
 - Todas las demás distribuciones permanecen relativamente constantes durante el período de análisis
 - Tasa de crecimiento anual

METODOLOGÍA AASHTO '93

USO DE GRÁFICOS

NOMOGRAPH SOLVES:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10} (SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07$$

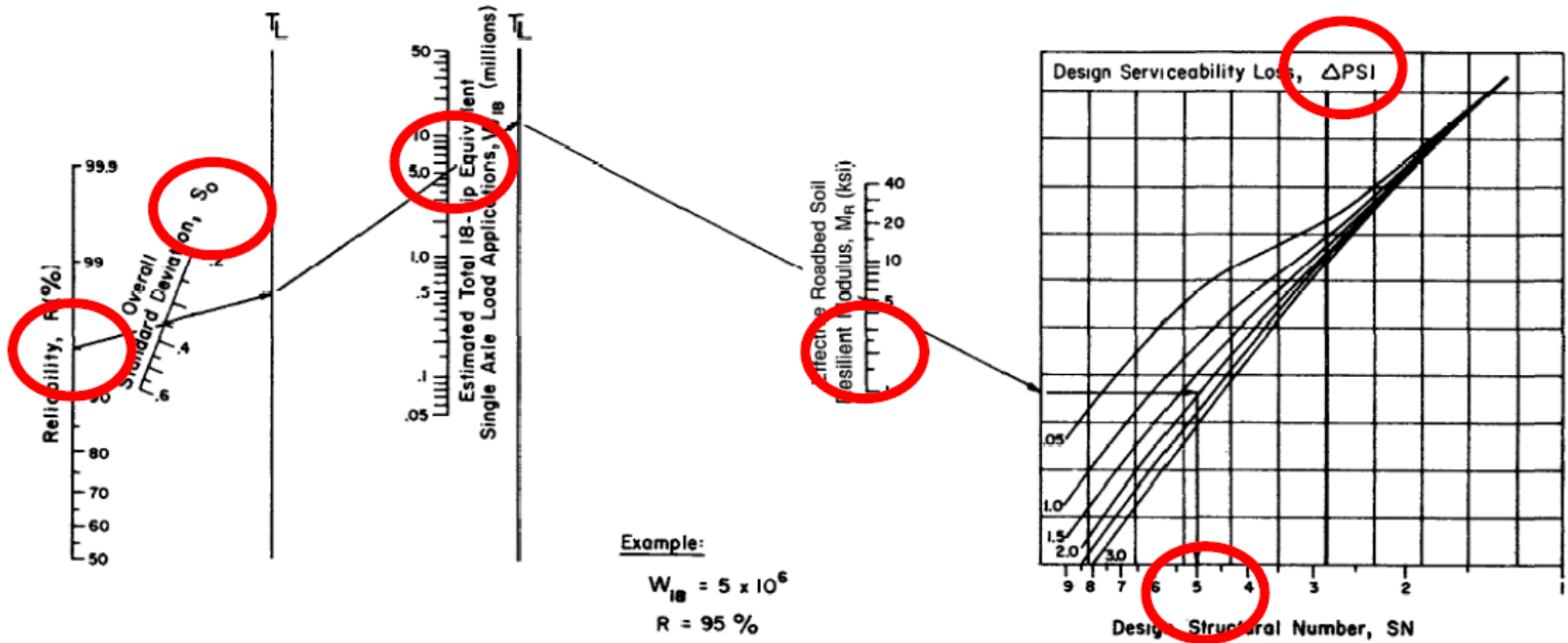


Figure 3.1. Design Chart for Flexible Pavements Based on Using Mean Values for Each Input

METODOLOGÍA AASHTO '93

NÚMERO ESTRUCTURAL

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

a_1 a_2 a_3 coeficientes de capa (por pulgada o por cm de espesor)

m_2 m_3 coeficientes de drenaje de la capa

D_1 D_2 D_3 espesores de capa (en pulgadas o cm)

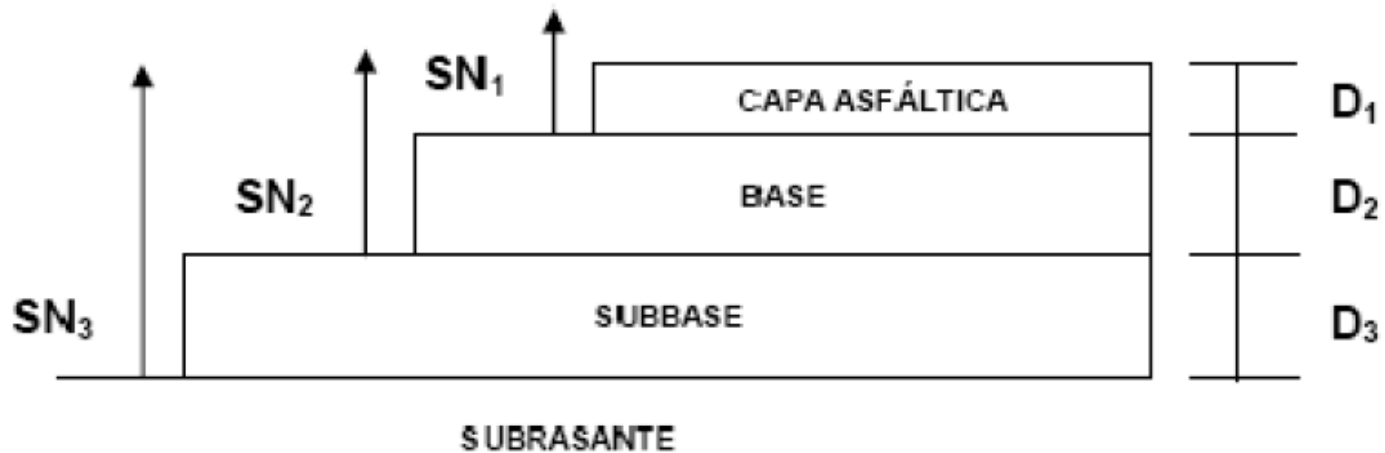
$a_1 > a_2 > a_3$ respetando el escalonamiento modular

METODOLOGÍA AASHTO '93

NÚMERO ESTRUCTURAL

PROCEDIMIENTO MÉTODO DE DISEÑO AASHTO

1961 1986 1993 [MPEDG2008](#)



$$D_1 \geq SN_1 / a_1$$

$$D_2 \geq (SN_2 - SN_1) / (a_2 m_2)$$

$$D_3 \geq (SN_3 - SN_2 - SN_1) / (a_3 m_3)$$

METODOLOGÍA AASHTO '93

NÚMERO ESTRUCTURAL

Los aportes estructurales a_i se obtienen según el tipo de capa
 E módulo [MPa] a_i [1/cm]

$$\text{Cementada } a_i = 0.0000038 * E ^ 1.157$$

$$\text{Asfáltica } a_i = -0.352 + 0.149 * \text{Log}_{10}(E) \quad E: \text{módulo a } 20^{\circ}\text{C}$$

Precaución para módulos $>+ 3100$ MPa por fisuración térmica y fatiga

$$\text{Base granular } a_i = (0.249 * \text{LOG}(E / 0.007) - 0.977) / 2.54$$

$$\text{Sub-base granular } a_i = (0.227 * \text{LOG}(E / 0.007) - 0.839) / 2.54$$

METODOLOGÍA AASHTO '93

MÓDULOS

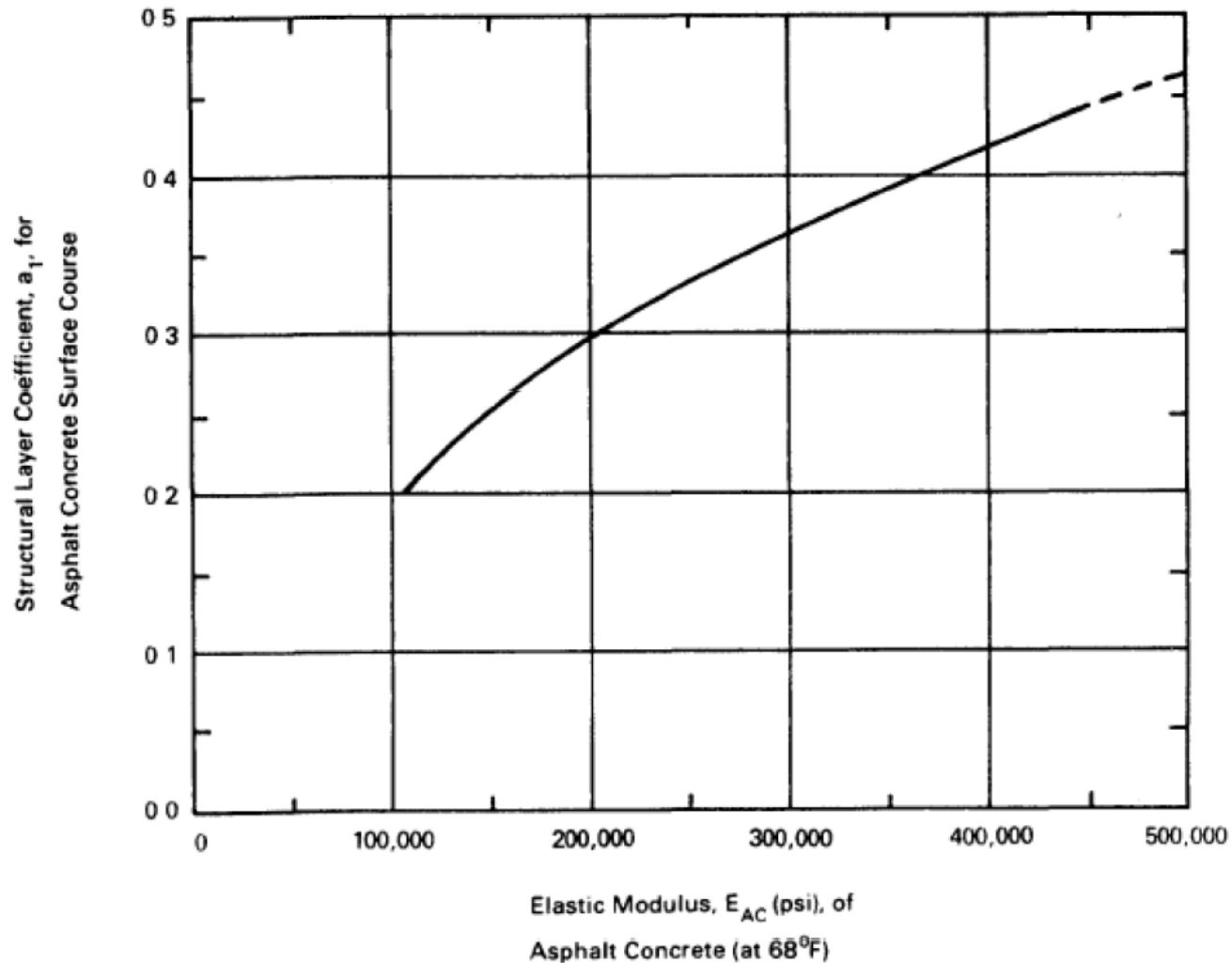
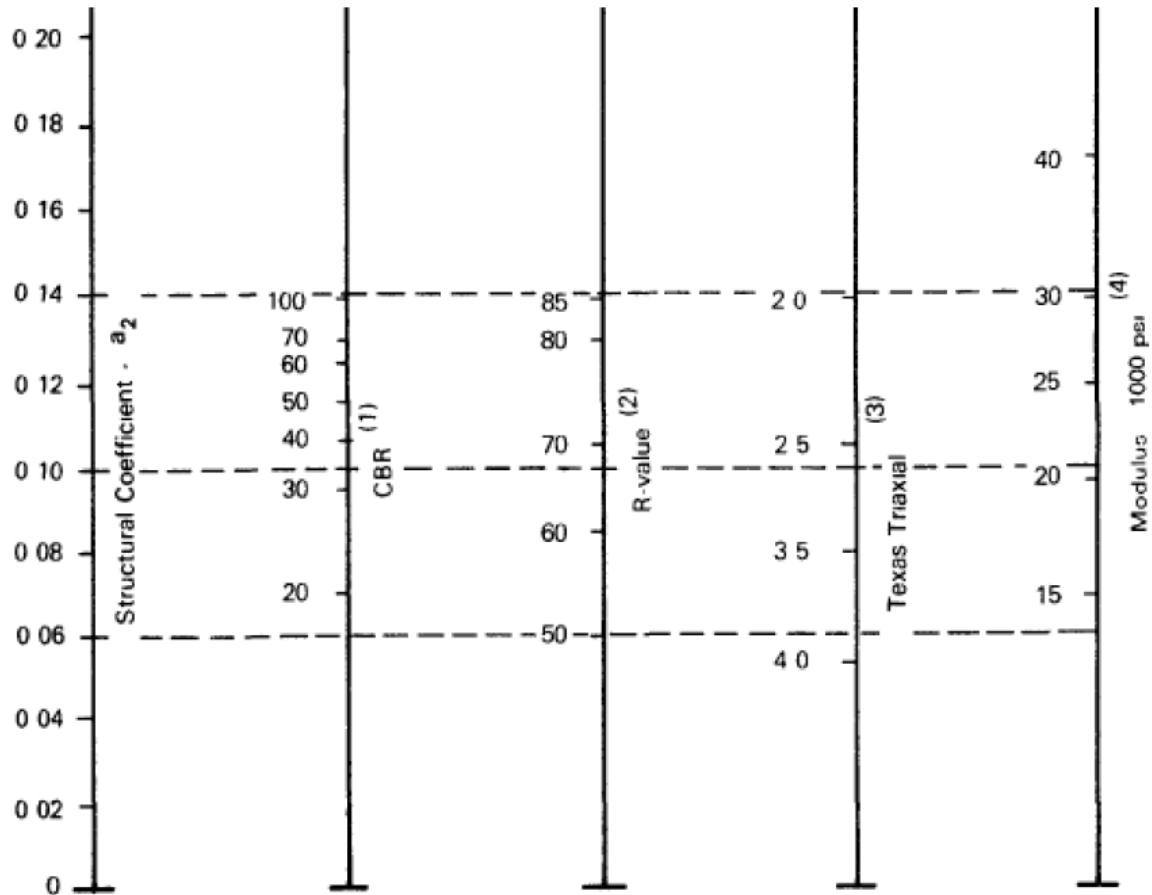


Figure 2.5. Chart for Estimating Structural Layer Coefficient of Dense-Graded Asphalt Concrete Based on the Elastic (Resilient) Modulus (3)

METODOLOGÍA AASHTO '93

CORRELACIONES DEL CBR – MÓDULO RESILIENTE

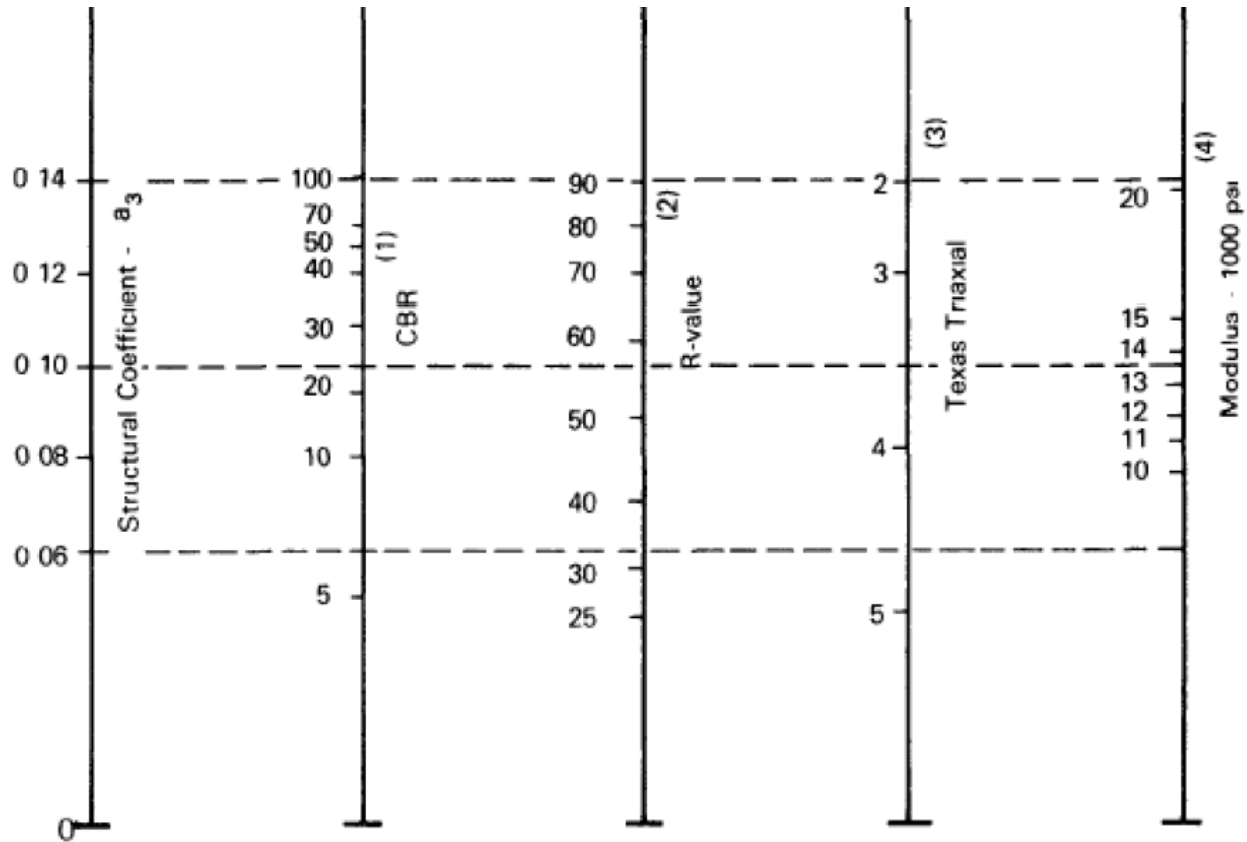


- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
- (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figure 2.6. Variation in Granular Base Layer Coefficient (a_2) with Various Base Strength Parameters (3)

METODOLOGÍA AASHTO '93

CORRELACIONES DEL CBR – MÓDULO RESILIENTE

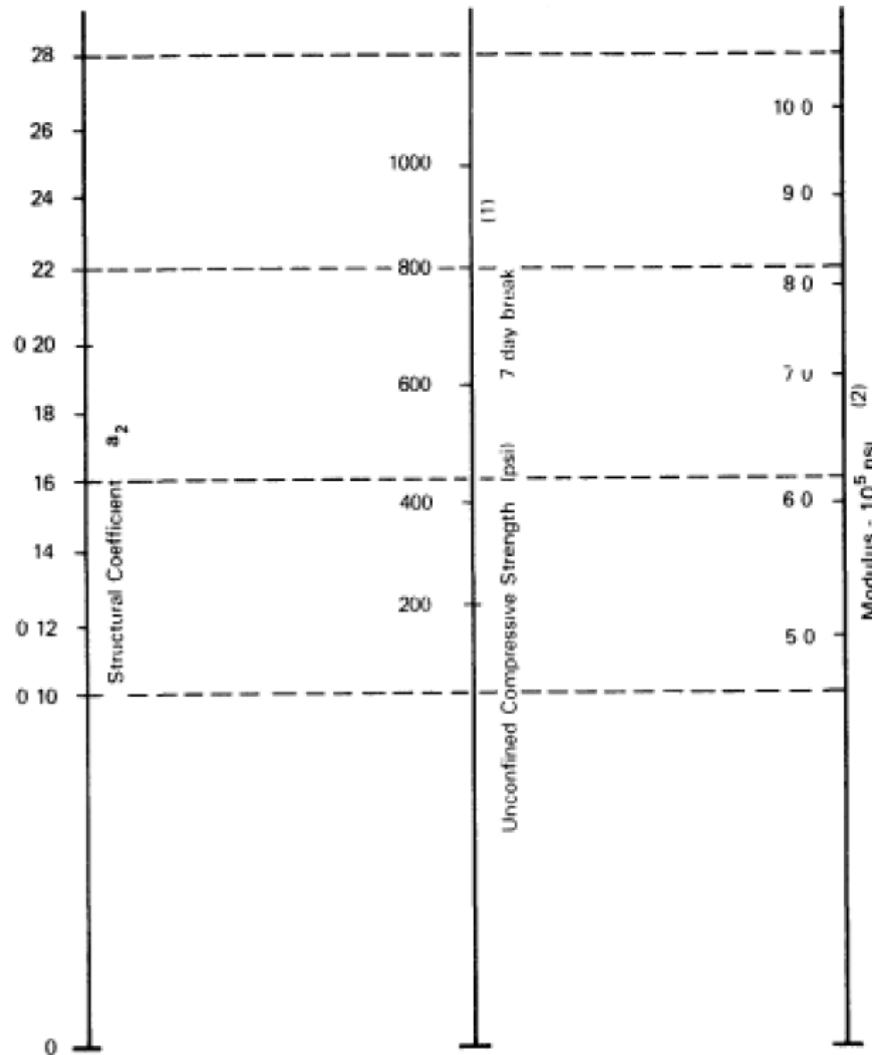


- (1) Scale derived from correlations from Illinois
- (2) Scale derived from correlations obtained from The Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived from correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figure 2.7. Variation in Granular Subbase Layer Coefficient (a_3) with Various Subbase Strength Parameters (3)

METODOLOGÍA AASHTO '93

CORRELACIONES DEL CBR – MÓDULO RESILIENTE



(1) Scale derived by averaging correlations from Illinois Louisiana and Texas

(2) Scale derived on NCHRP project (3)

Figure 2.8. Variation in a_2 for Cement-Treated Bases with Base Strength Parameter (3)

METODOLOGÍA AASHTO '93

COEFICIENTE DE DRENAJE

Calidad del Drenaje	tiempo de remoción	% del tiempo expuesto a humedades cercanas a saturación			
		<1%	1 a 5%	5 a 25%	>25%
Excelente	2 horas	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
Bueno	1 día	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Regular	1 semana	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0,80
Pobre	1 mes	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0,60
Muy pobre	no drena	1,05-0,95	0,95-0,75	0,75-0,40	0,40

METODOLOGÍA AASHTO '93

FORTALEZAS – DEBILIDADES - LIMITACIONES

- Método simple, paso por paso
- Basado en investigaciones y experiencia
- Guía para evaluación estructural y para caracterización de materiales
- Guía específica para cada tema clave
- Verificación parcial con datos de campo
- Basado en modelos de comportamiento empíricos
- Datos del **LTPP** (**L**ong **T**erm **P**avement **P**erformance) indican diferencias importantes en tránsitos muy elevados. Obtenidos a través de un espectro de carga, conociendo los datos de peso por eje en un sitio específico, este tipo de estudio se conoce por sus siglas en inglés como **WIM** (**W**eight **i**n **M**otion)
- Limitaciones asociadas con el procedimiento AASHTO

METODOLOGÍA AASHTO '93

REFUERZO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

METODOLOGÍA AASHTO '93

REFUERZO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

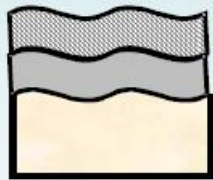
- 1 Tránsito futuro
Ábaco de diseño

$$\text{Log } N = -Z_R S_0 + F(\text{SN}, \Delta\text{PSI}, E_s)$$

SN requerido

2

Estructura a
reforzar



Subrasante E_s

SN existente Sn_{eff}

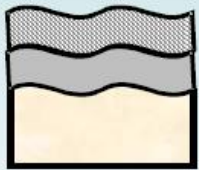
3

$$H_{ref} = \frac{(\text{SN requerido} - \text{SN existente})}{a_i \text{ ref}}$$

METODOLOGÍA AASHTO '93

REFUERZO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Estructura a reforzar



Subrasante E_s

(SN existente)
 SN_{eff}

Alternativa 1 caracterización de materiales



Alternativa 2 deflectométrica



Alternativa 3 vida remanente

METODOLOGÍA AASHTO '93

AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL - ESPESORES Y CALIDADES



Calado de Testigos

Calicatas



Deflectómetro Dinámico

Penetrómetro Dinámico de Cono



Radar de Penetración

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD (Falling Weight Deflectometer) SEGÚN AASHTO

Se valora:

- Deflexión en cada punto (*diferencia entre impactos 1, 2 o 3*)
- Temperatura de superficie con sensor infrarrojo, y mediante termómetro.
- Los resultados se corrigen por carga. (*aproximación lineal*) se corrigen por temperatura (*función del espesor asfáltico a una temperatura de referencia 20°C, gráfico del método o aproximación propia*)
- tramos homogéneos de antecedentes y la aplicación del método de diferencias acumuladas

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

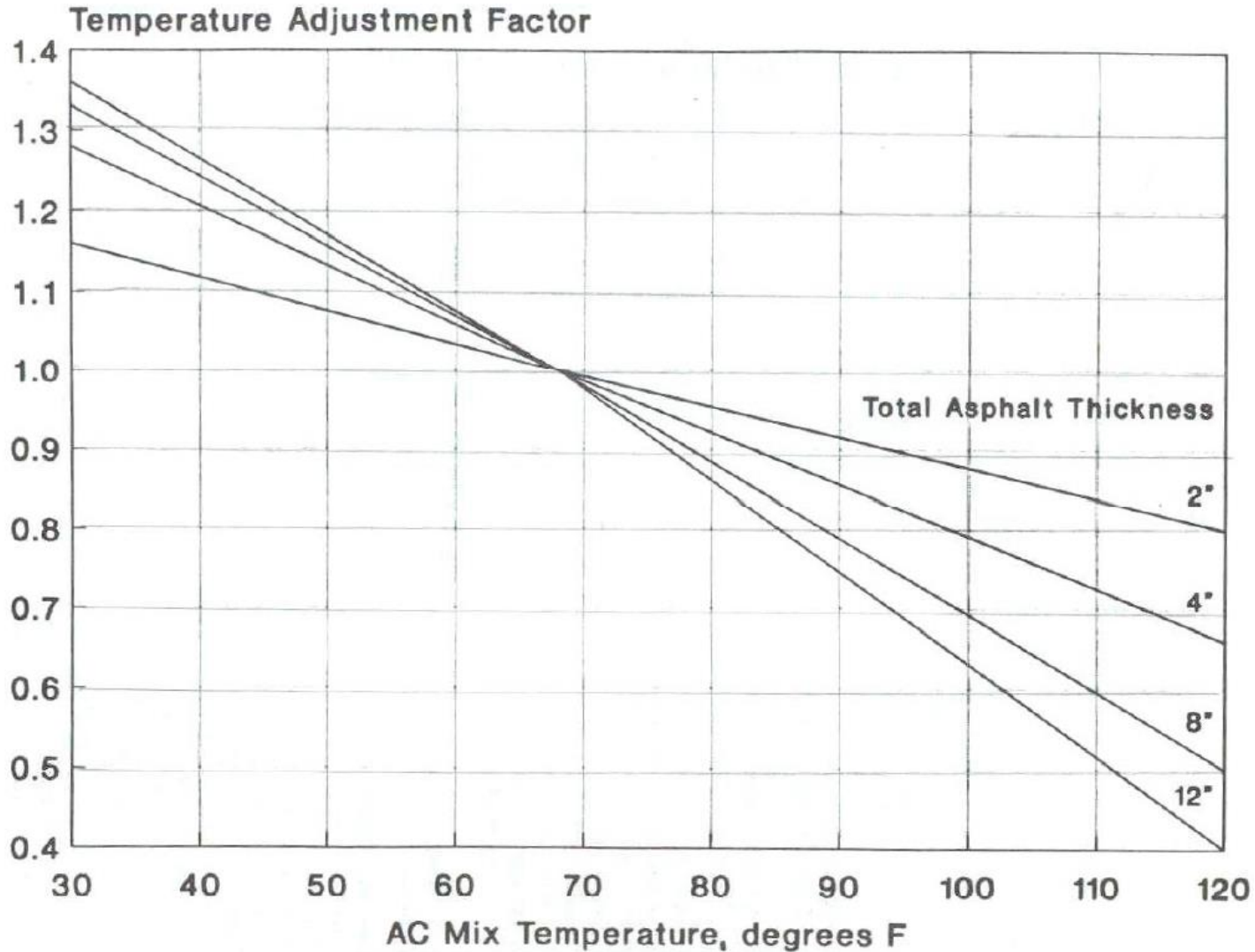


Figure 5.6. Adjustment to d_0 for AC Mix Temperature for Pavement with Granular or Asphalt-Treated Base

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

ALTERNATIVA 1 PARA DETERMINAR S_{Neff} (SN existente) a partir de los resultados de ensayos de laboratorio realizados sobre los materiales

A partir de las muestras de materiales de la estructura obtenidas en la toma de testigos y de las calicatas, se realizan ensayos de laboratorio que permiten valorar las características de los mismos.

Para los materiales **no ligados**: clasificación, densidad, contenido de humedad, CBR, módulo resiliente.

Para los materiales **asfálticos**: densidad, contenido de ligante, módulo, grado de deterioro.

En base a esos resultados y a las condiciones de deterioro en que esos materiales se encuentran, es que se le asigna un coeficiente de aporte estructural a cada uno de ellos utilizando los ábacos del Método AAASHTO. Luego, con esos coeficientes y los espesores de cada capa puede calcularse el SN de la estructura existente.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

Coeficientes de aporte estructural sugeridos para capas existentes de concreto asfáltico a_i (1/cm)

MATERIAL	CONDICIÓN SUPERFICIAL	COEFICIENTE [1/cm]
Carpeta de Concreto Aasfáltico	Sin o con pocas fisuras de fatiga y/o sólo con fisuras transversales de baja severidad	0,138 - 0,157
	< 10% fisuras de fatiga de baja severidad y/o < 5% fisuras transversales de media a alta severidad	0,098 - 0,138
	> 10% fisuras de fatiga de baja severidad y/o < 10% fisuras de fatiga de severidad media y/o > 5-10% fisuras transversales de media a alta severidad	0,078 - 0,118
	> 10% fisuras de fatiga de severidad media y/o < 10% fisuras de fatiga de alta severidad y/o > 10% fisuras transversales de media a alta severidad	0,055 - 0,078
	> 10% fisuras de fatiga de severidad alta y/o > 10% fisuras transversales de alta severidad	0,0315 - 0,06

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

Coeficientes de aporte estructural sugeridos para capas existentes de base estabilizada, y base o subbase granular a_i (1/cm)

Base estabilizada	Sin o con pocas fisuras de fatiga y/o sólo con fisuras transversales de baja severidad	0,078 - 0,138
	< 10% fisuras de fatiga de baja severidad y/o < 5% fisuras transversales de media a alta severidad	0,06 - 0,098
	> 10% fisuras de fatiga de baja severidad y/o < 10% fisuras de fatiga de severidad media y/o > 5-10% fisuras transversales de media a alta severidad	0,06 - 0,078
	> 10% fisuras de fatiga de severidad media y/o < 10% fisuras de fatiga de alta severidad y/o > 10% fisuras transversales de media a alta severidad	0,04 - 0,078
	> 10% fisuras de fatiga de severidad alta y/o > 10% fisuras transversales de alta severidad	0,031 - 0,06
Base o Subbase Granular	Sin evidencias de bombeo, degradación o contaminación con finos	0,04 - 0,06
	Algunas evidencias de bombeo, degradación o contaminación con finos	0,00 - 0,04

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

ALTERNATIVA 2 PARA DETERMINAR EL S_{Neff} (SN existente) CON FWD

1. Calcular el módulo resiliente de la subrasante por retrocálculo, a partir del valor de la deflexión distante y la magnitud de la carga aplicada por el equipo.

La distancia debe estar lo suficientemente alejada del centro de aplicación de la carga de manera independizarla del efecto de las capas superiores, pero lo suficientemente cerca como para que su valor no sea demasiado

Pequeño e implica calcular el módulo con precisión.

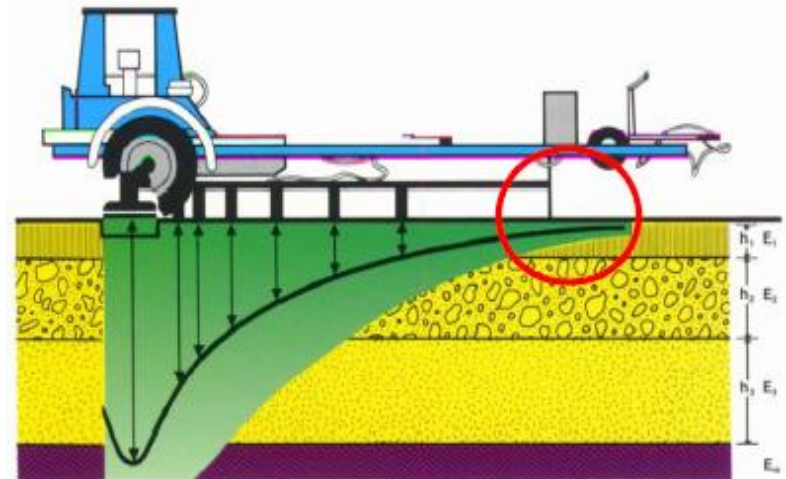
$$M_{rr} = (0,24 P) / (d_r r)$$

M_{rr} módulo resiliente retrocalculado, en **psi**

P magnitud de la carga aplicada, en libras

d_r deflexión distante medida, en pulgadas

r distancia desde el centro de aplicación de la carga a la deflexión distante, en pulgadas



METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

ALTERNATIVA 2 PARA DETERMINAR EL S_{Neff} (SN existente) CON FWD

2. Calcular el módulo resiliente de diseño.

El **M_{rr} retrocalculado** en el diseño del pavimento, debe ser ajustado para ser consistente con el valor medido en laboratorio usado por la ecuación **AASHTO** de pavimentos flexibles. El valor de **M_{rr} retrocalculado** debe ser multiplicado por un factor de corrección **C**, el cual varía en función del tipo de suelo de subrasante y la presencia de una capa rígida (bedrock), respondiendo a la siguiente expresión:

$$M_r = C \cdot M_{rr}$$

- | | |
|----------------------------|--|
| M_r | Módulo resiliente de la subrasante, en psi |
| M_{rr} | Módulo resiliente de la subrasante obtenida por retrocálculo, en psi |
| C | Factor de ajuste o corrección en función del tipo de suelo de subrasante. El mismo tiene un valor aproximado de 0.33 , según está indicado en la metodología AASHTO'93 . |

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

ALTERNATIVA 2 PARA DETERMINAR EL S_{Neff} (SN existente) CON FWD

3. Calcular el **E_p**, **Módulo efectivo de todo el pavimento sobre la subrasante** (unidades pulgadas³ psi)

$$d_0 = 1,5 \cdot p \cdot a \left\{ \frac{1}{M_R \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

E_p módulo efectivo de toda la estructura, en psi a radio de carga, en pulgadas

D espesor de la estructura, en pulgadas

d₀ deflexión medida en el centro de aplicación de la carga, ajustada a una temperatura estándar de 68 °F (20 °C), en pulgadas

p presión aplicada por el plato de carga, en psi

Mr módulo de la subrasante obtenido en el punto anterior, en psi

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

ALTERNATIVA 2 PARA DETERMINAR EL SN_{eff} (SN existente) CON FWD

4. Calcular el número estructural efectivo del pavimento existente SN_{eff} , que se obtiene como:

$$SN_{eff} = 0,0045D\sqrt[3]{E_p}$$

D es el espesor de las capas de pavimento, en pulgadas

EP es el módulo efectivo de toda la estructura retrocalculado, en psi

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

ALTERNATIVA 3 PARA DETERMINAR EL S_{Neff} (SN existente) por vida remanente

Esta alternativa utiliza el concepto de daño por fatiga, donde cada carga que pasa produce un daño en la estructura y reduce el número de cargas que le quedan por pasar hasta la falla de la estructura.

- Para la estructura en análisis debe determinarse la cantidad de tránsito para la que fue diseñada, calculado utilizando los ábacos con un PSI final de 1.5.
- determinar el número de ejes pasados desde su construcción
- calcular la vida remanente

$$RL = 100 \left[1 - \left(\frac{N_p}{N_{15}} \right) \right]$$

RL Vida útil remanente

N_p Tránsito total para 18 kip ESAL

N_{15} Transito total del pavimento “deteriorado” ($P_2=15$), 18 kip ESAL

METODOLOGÍA AASHTO '93

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CON FWD SEGÚN AASHTO

ALTERNATIVA 3 PARA DETERMINAR EL SN_{eff} (SN existente) por vida remanente

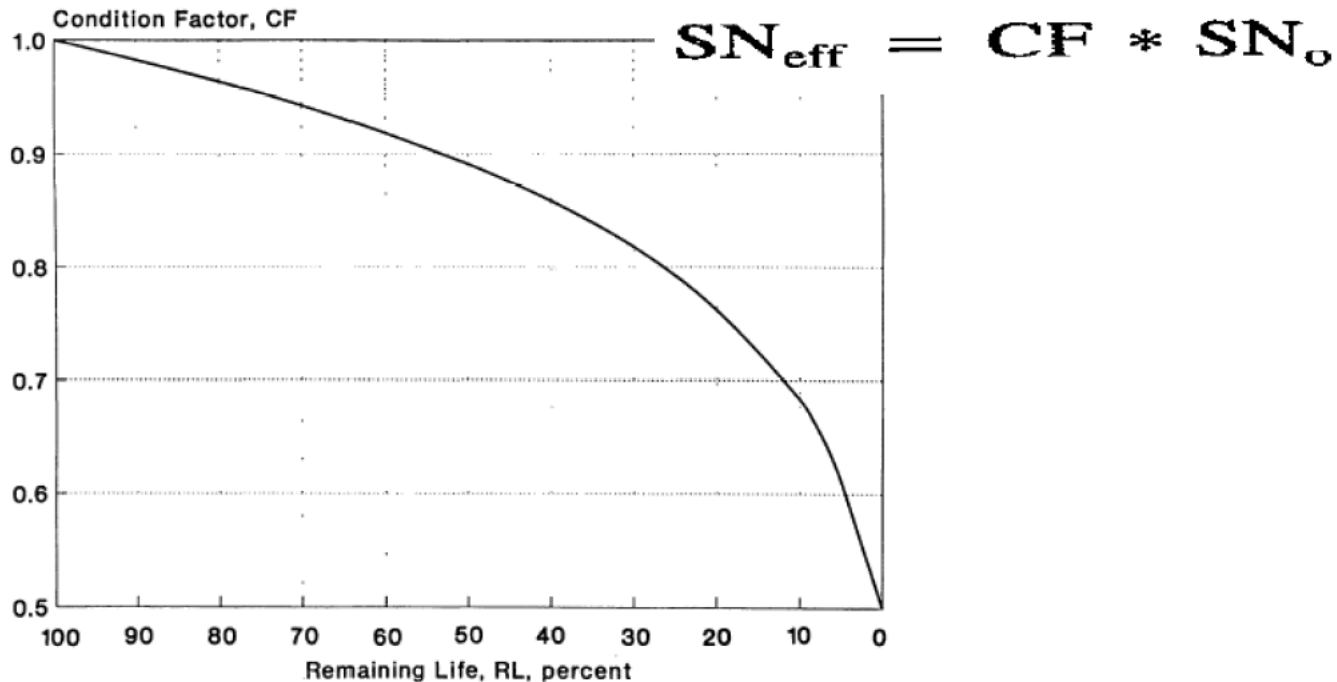


Figure 5.2. Relationship Between Condition Factor and Remaining Life

LOS RESULTADOS DE ESTE MÉTODO PUEDEN CAUSAR GRANDES ERRORES EN LA ESTIMACIÓN

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

Datos	Grupo N°1	Grupo N°2	Grupo N°3	Grupo N°4
T.M.D.A. (2014)	1830	1520	2080	1810
Año de Inauguración	2021	2021	2021	2021
Tasa de crecimiento anual %	2.0	2.5	2.0	2.5
Composición: %				
autos y camionetas	68	77	67	69
ómnibus	3	3	2	2
camiones 1.1	8	6	7	5
camiones 1.2	5	3	6	7
camiones 1.1 - 1.2	7	5	6	7
camiones 1.1 - 2	4	4	7	5
camiones 1.2 - 3 (C = 0.31)	5	2	5	5
Total %	100	100	100	100
Vida útil pav.rigido (años)	35	35	35	35
Vida útil pav.flexible (años)	12	12	12	12
Vida útil trat. y lechadas (años)	4	4	4	4
C.B.R. (subrasante)	5	7	10	8
confiabilidad	80	85	80	85
desviación std (So)	0.45	0.45	0.45	0.45
Ps (final)	2	2	2	2
Calidad del drenaje	Buena	Excelente	Buena	Buena
% del tiempo	0.5	2	0.8	0.8
cant de trochas por sentido	1	1	1	1
factor de seguridad de carga	1.2	1.2	1.1	1.1
M.R. del Hormigón kg/cm ²	38	39	40	41
Ancho de calzada [m]	7.30	7.30	7.30	7.30
precipitación media anual mm	500	600	450	350

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

Forma de aplicación del método

1º) Datos:

Confiabilidad: **R = 80 a 90%**

Desviación estándar de todas las variables $\sigma_o = 0,35$ a **0,50**

CBR de la SR > **3%**

CBR de la SB > **50%**

CBR de la B > **80%**

Modulo resiliente = **MR** (De ensayo o de un grafico en función del CBR de la SR)

Índice de serviciabilidad inicial (Adoptado: 4,2 pavimentos flexibles nuevos)

Índice de serviciabilidad final = **1,5 en Argentina**

Perdida de serviciabilidad = **IS_i – IS_f**

Vida útil de la calzada: **12años**

TMDA_o conocido = **2007 (año de censo)**

Año de inauguración= **2009**

Tasa de crecimiento hasta el año de inauguración **i =2%**

Tasa de crecimiento hasta el fin de vida útil **i =2%**

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

2º) Calculo el TMDA en el año de inauguración:

$$\text{TMDA}_1 = \text{TMDA}_0 * (1+i)^n$$

n: numero de años desde el censo hasta el año de inauguración = 2

(Otra forma de obtenerlo es con un coeficiente "a" de una tabla en función de "n" e "i")

3º) cálculo el TMDA al fin de la vida útil:

$$\text{TMDA}_2 = \text{TMDA}_1 * \sum (a/n) \quad a = (1+i)^n$$

Luego: $\text{TMDA}_f = (\text{TMDA}_1 + \text{TMDA}_2)/2$

(Otra forma de obtenerlo es con un coeficiente "b" de una tabla en función de "n =12" e "i =2").

4º) Factor de trocha ft:

Depende del proyecto. La trocha de diseño es aquella que recibe el mayor número de ejes. Para un camino de 2 trochas cualquier de las dos es la trocha de diseño ya que el tránsito forzosamente se canaliza por esa trocha. En este caso es $ft = 1$. En caso de caminos multitrocha, la trocha de diseño es la más externa dado que los camiones y por lo tanto la mayor cantidad de ejes usan esa trocha.

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

Número de trochas en cada dirección	ft
1	1,00
2	0,80 - 1,00
3	0,60 - 0,80
4	0,50 - 0,75

5º) Factor de sentido de circulación fs:

Sale del censo: se ha realizado el censo en una sección de camino, entonces se ha tenido en cuenta el numero de autos que pasan en un sentido o en el otro, o se ha censado el numero de autos totales que pasan en la sección, entonces en este ultimo caso se puede decir que el 50% de los autos van en un sentido y 50% van en otro sentido.

6º) Calculo el número de ejes equivalentes de 10 ton/veh:

El transito esta compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes, y a los efectos de cálculo, se los transforma en un número equivalente de ejes tipo de 10 ton y luego se convierte a número de ejes de 18 kips, ya que los ábacos están hechos para estos valores.

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

TIPO DE VEHÍCULO	DISTRIBUCIÓN DE EJES	NÚMERO DE EJES (14)	% DE CADA TIPO DE VEHÍCULO (15)	FACTOR "C" (16)	Nº DE EJES (17)=(14)*(15)*(16)
Automóviles y camionetas	1,1	2	0,75	0,01	0,0150
Ómnibus	1,1	2	0,02	0,07	0,0028
Camiones	1,1	2	0,06	0,6	0,0720
Camiones	1,2	3	0,03	0,38	0,0342
Camiones	1,1-1,2	5	0,06	0,39	0,1170
Camiones	1,1 - 2	4	0,04	0,45	0,0720
Camiones	1,2 - 3	5	0,04	0,35	0,0700

Factor de contribución combinado (18) Ct= 0,3830

Ejes de 10 t / vehículo

Aclaraciones:

Ejes: **1,1** (2 ejes simples)

1,2 (1 eje simple y 1 tandem)

1,1 – 1,2 (3 eje simple y 1 eje tandem)

1,2 – 3 (1 eje simple, 1 eje tandem y 1 eje tridem)

Factor de corrección "c": es un factor de carga equivalente y se obtiene de tablas. En el caso que en el diseño de cargas no se tomen las cargas máximas que da la norma se tiene que buscar el factor de corrección y multiplicarlos por los valores de la columna de % de cada tipo de vehículos.

La norma me da como cargas máxima por eje:

Eje simple = 10tn

Eje tandem = 18tn

Eje tridem = 25tn

Entonces se obtiene el **Nº de ejes equivalentes de 10 ton** (ya no se hace distinción si es un auto, camión, etc.) en un número de ejes de **10ton**.

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

7º) Cálculo del número de repeticiones de ejes equivalentes en toda la vida útil:

$$N_{10tn} = f_s \cdot f_t \cdot TMDA_f \cdot Vu \cdot 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot \Sigma \text{ ejes equivalentes}$$

8º) Conversión de este número de ejes de 10tn a número de ejes de 18kips = 8,2tn (valor con que se hicieron los ábacos)

$$N_{18kips} = N_{10tn} \cdot 2,2$$

9º) Cálculo del número estructural SN

Se entra al **NOMOGRAMA**, el cual es el mismo para pavimentos con o sin tratamientos bituminosos superficiales, con:

- **Confiabilidad R**
- **Desviación estándar σ_o**
- **El número ESAL aplicados de la carga tipo de 8,2 ton/eje**
- **Módulo Resiliente de la SR**
- **Pérdida de serviciabilidad**

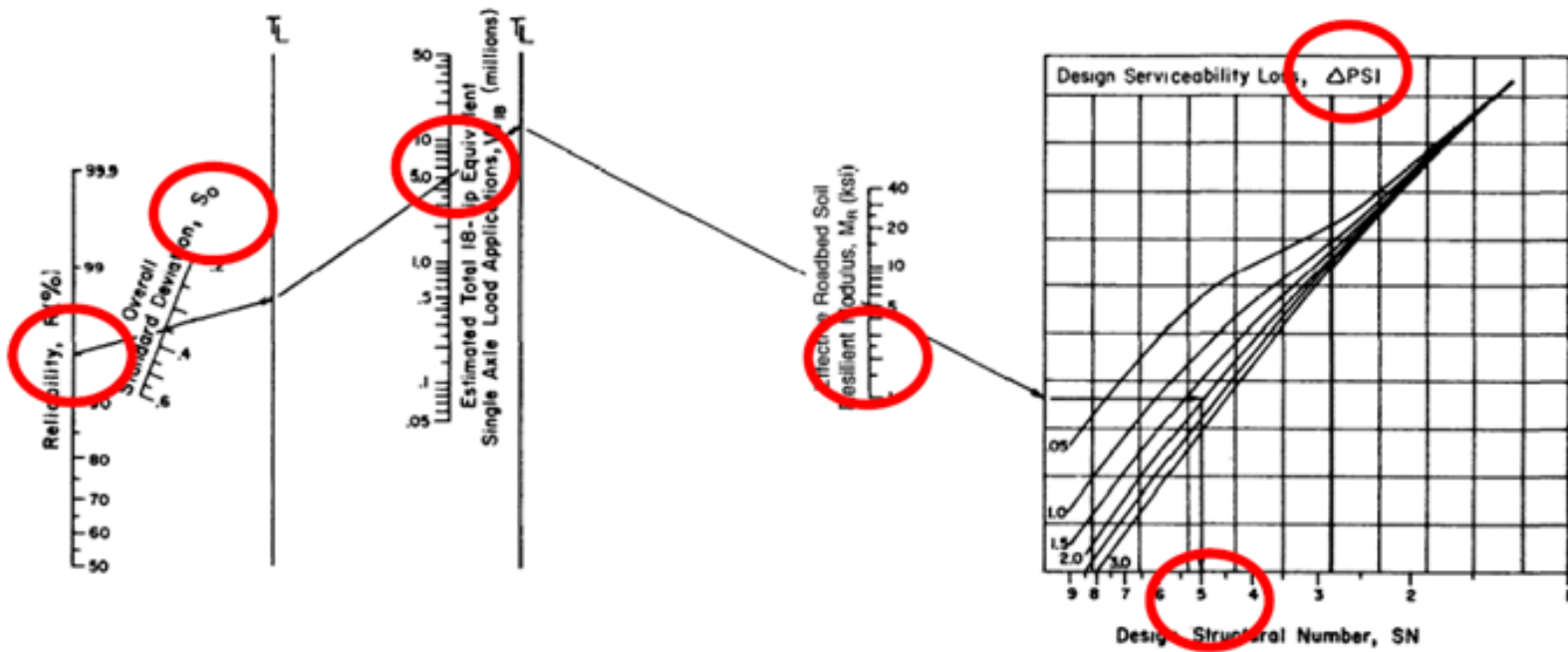
METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

10º) Calculo de espesores:

$$SN = a_1 * D_1 + m_2 * a_2 * D_2 + m_3 * a_3 * D_3$$

El coeficiente “a1” que es el aporte estructural de la capa de rodamiento se saca de una figura en función de la estabilidad Marshall requerida para esa **Carpeta de Rodamiento**.



METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

Se adoptan los coeficientes de drenaje según se muestra en la figura: “ m_2 ” y “ m_3 ”

Tabla 7.1

Calidad de drenaje	50% de saturación en:	85% de saturación en:
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	más de 10 horas
Muy pobre	El agua no drena	mucho más de 10 horas

Tabla 7.2

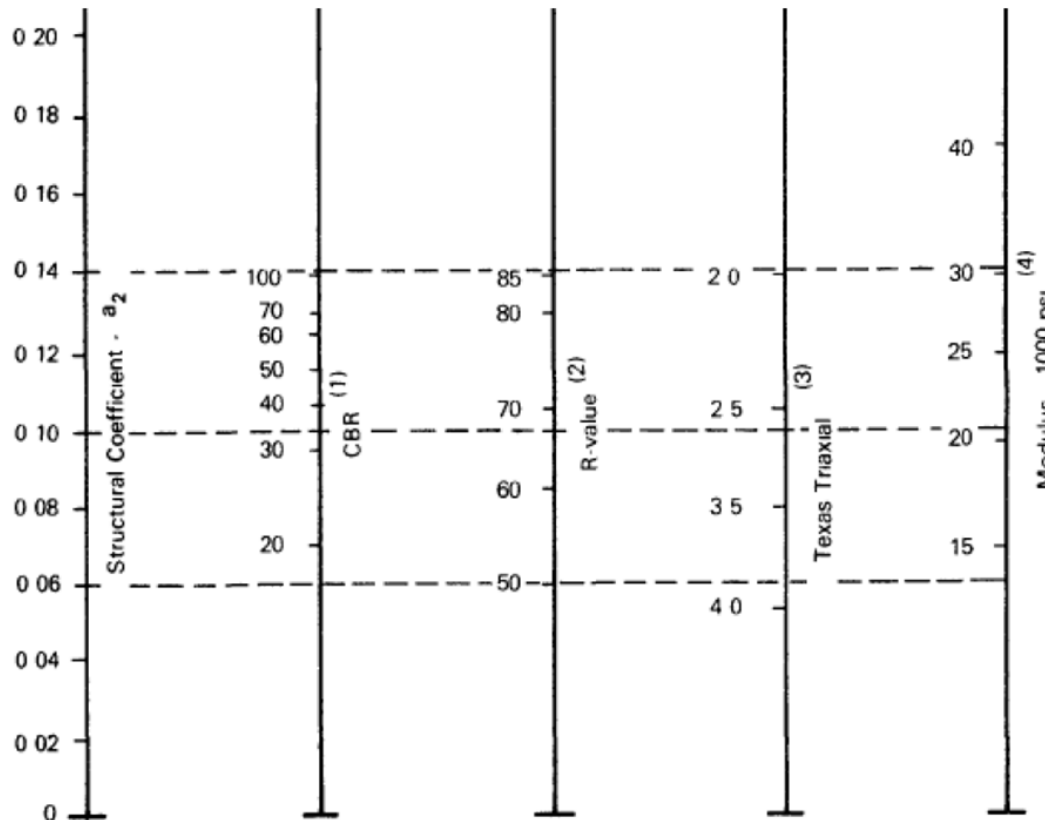
Coefficientes de drenaje para pavimentos flexibles

Calidad de drenaje	% de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad que el pavimento está expuesto a saturación			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

El coeficientes “ a_2 ” se obtienen de La grafica en función del **CBR** de la base



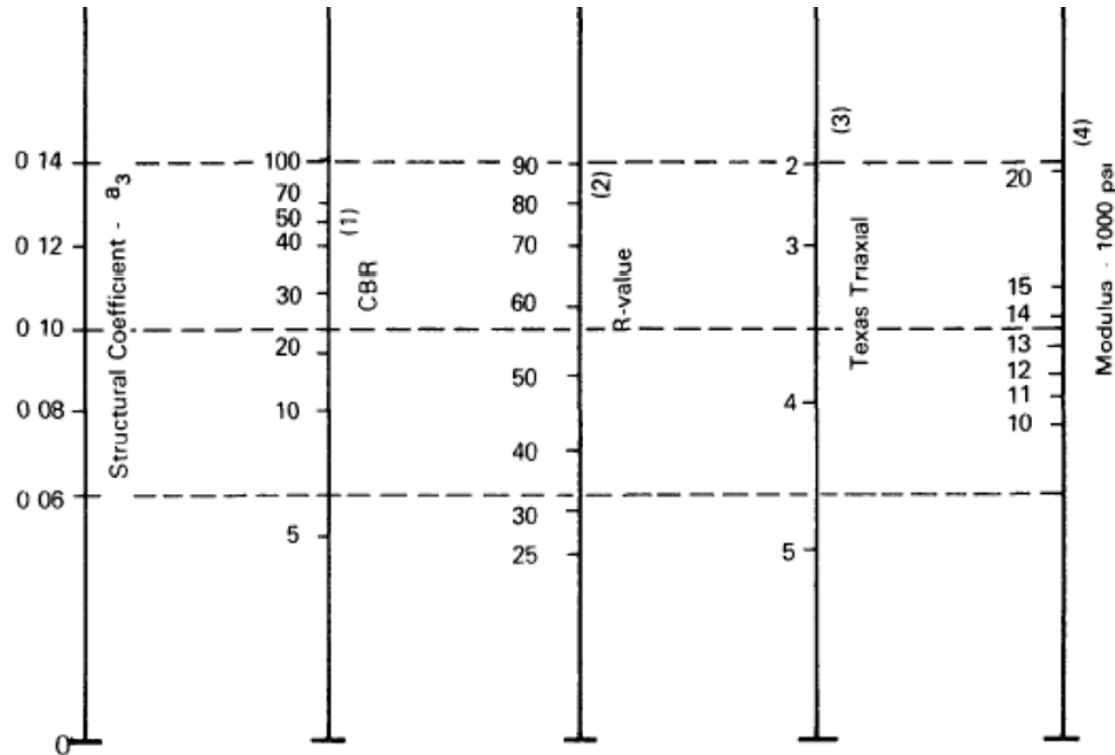
- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
- (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figure 2.6. Variation in Granular Base Layer Coefficient (a_2) with Various Base Strength Parameters (3)

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

El coeficiente “ a_3 ” se obtienen de la grafica en función del CBR de la subbase.



- (1) Scale derived from correlations from Illinois
- (2) Scale derived from correlations obtained from The Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived from correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figure 2.7. Variation in Granular Subbase Layer Coefficient (a_3) with Various Subbase Strength Parameters (3)

METODOLOGÍA AASHTO '93

DESARROLLO DEL TRABAJO PRÁCTICO

Se adoptan espesores de base y subbase (D2 y D3) hasta verificar el número estructural obtenido. Se debe recordar que para el caso de tratamientos D1=1.

Hay espesores mínimos que respetar, dados principalmente por razones constructivas:

Capa	Espesor mínimo
CR	5cm
B	10cm
SB	10cm