



Diseño de Pavimentos sobre Caminos Empedrados

Autor:

Ing. Nelson Figueredo Kamm, MSc.

Los Pavimentos Empedrados

- Sabido es que, muchas de las rutas de la red vial de Paraguay están pavimentadas con pavimento tipo Empedrado.
- Según datos recientes del MOPC, se tienen aproximadamente 1.300 Km de empedrado.
- Muchos de estos pavimentos Empedrados han sido mejorados mediante un refuerzo con carpeta de rodadura de concreto asfáltico, mejorando substancialmente su transitabilidad y confort.

Pavimentos por Tipo de Superficie

RESUMEN DE LA RED VIAL DEL PAIS									
31/12/2017					Total Red Inventariada a Nivel País (Km.):				75.120,00
TIPO DE RED	TIPO DE SUPERFICIE								TOTALES POR TIPO DE RED(km)
	PAVIMENTADA(km)						NO PAVIMENTADA(km)		
	PCA	TRAT. SUPERF.	H°CP	ADOQUINADO	EMPEDRADO	EMPEDRADO/ ENRIPIADO	ENRIPIADO	TIERRA	
NACIONAL(km)	2.992,00	207,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	402,00	3.616,00
DEPARTAMENTAL (km)	3.127,00	369,00	0,00	26,00	656,00	252,00	197,00	9.211,00	13.838,00
VECINAL(km)	73,00	0,00	0,00	0,00	633,00	79,00	696,00	56.183,00	57.664,00
TOTALES POR TIPO DE SUPERFICIE(km)	6.192,00	576,00	15,00	26,00	1.289,00	331,00	895,00	65.796,00	75.120,00
%	8,24	0,77	0,02	0,03	1,72	0,44	1,19	87,59	100,00
PAVIMENTADA ASFALTICA(km)OTROS	6.768,00		1.661,00				66.691,00		75.120,00
%	9,01		2,21				88,78		100,00
%	11,22						88,78		75.120,00
%	100,00								75.120,00

Los Pavimentos Empedrados

- Si bien este tipo de pavimento tiene sus desventajas técnicas, debemos asumir como un hecho la existencia de muchos caminos de todo tiempo con este tipo de superficie, y que han sido construidos con criterio de economía y como una solución para una mejora progresiva,
- Puede ser utilizado como capa de rodadura en un inicio, para luego ejecutar un pavimento de tipo superior, pasando a integrar la base o sub base.

Los Pavimentos Empedrados

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Economía 	<p>Procedimiento constructivo artesanal</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Uso intensivo de Mano de Obra Local 	<p>Variabilidad en la calidad.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 	<p>No se dispone de una metodología de control de calidad que incluya ensayos medibles y con trazabilidad del proceso.</p>
	<p>No se dispone de una Metodología Formal de Diseño Estructural</p>

Comportamiento Estructural

- En varios países de la región se aplica el término de **Empedrado** a un pavimento ejecutado con adoquines de piedra natural cortados o labrados en forma de paralelepípedo.
- En nuestro país ese tipo de pavimento se denomina comúnmente **Adoquinado de piedra**.

Comportamiento Estructural

- En Paraguay el empedrado se ejecuta generalmente con piedra bruta maceada de forma irregular y que son colocadas sobre un colchón de arena con la cara más ancha hacia arriba, de manera a generar una superficie que sirva como capa de rodadura.
- Esta puntualización va en el sentido de aclarar que los métodos de dimensionamiento de **Pavimentos Adoquinados** no son aplicables a nuestros empedrados.



Adoquines de Piedra Natural



Adoquines de Piedra Natural



Pavimento con Empedrado



Materiales para
empedrado con adoquines

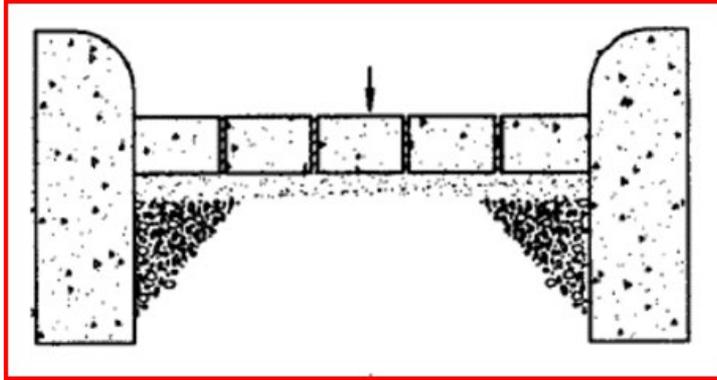




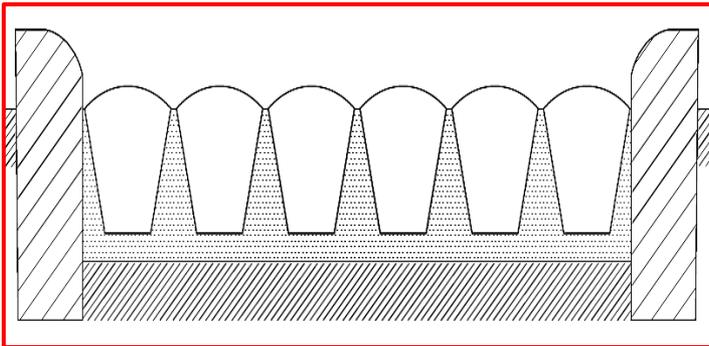
Materiales para empedrado con adoquines



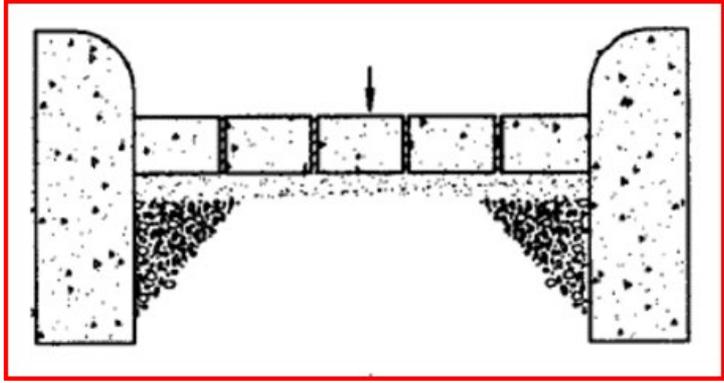
Materiales para empedrado con piedra maceada



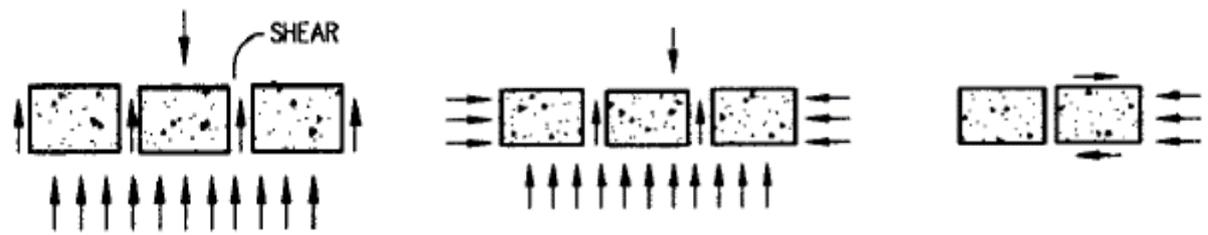
Bloques Intertrabados
de Hormigón



Empedrado con
Piedra maceada



Bloques Intertrabados de Hormigón



Con trabazón en todos los sentidos

Comportamiento Estructural

Conclusión 1

- Los Métodos de Diseño para Pavimentos Intertrabados (adoquines) no son aplicables a los pavimentos empedrados.

Métodos de Diseño Estructural de Pavimentos – AASHTO 93

- La Guía de Diseño de Pavimentos Flexibles **AASHTO 93** propone la metodología para asignar **Coefficientes Estructurales** a las distintas capas y tipos de materiales, ya sean granulares, cementados y capas asfálticas, todos ellos como producto de las investigaciones en Pistas de Prueba realizados con diferentes tipos de materiales.
- Las pistas de prueba AASHTO no incluyeron capas con pavimento tipo **Empedrado**.

Métodos de Diseño Estructural de Pavimentos – AASHTO 93

- La Guía de Diseño no incluye este tipo de material entre las alternativas, por lo que no se cuenta con procedimientos o rangos para calcular el **Coefficiente Estructural** a ser aplicado a la capa tipo Empedrado.
- El Manual de Carreteras de Paraguay, para condiciones normales de diseño, recomienda adoptar los coeficientes estructurales indicados en la siguiente tabla.

Métodos de Diseño Estructural de Pavimentos – AASHTO 93

TABLA 13_1 COEFICIENTES ESTRUCTURALES PARA LAS CAPAS DE PAVIMENTO

CAPA	CARACTERÍSTICAS	COEFICIENTE ESTRUCTURAL
Subbase Granular	CBR = 40%	0,12
Base Granular	CBR = 80%	0,13
Base Asfáltica Grad. Gruesa	6.000 N	0,33
Base Asfáltica Grad. Abierta		0,28
Grava-emulsión		0,30
C. Asfáltico, Capa Interm.	8.000 N	0,41
C. Asfáltico de Superficie	9.000 N	0,43
Mezclas drenantes		0,32
Microaglomerado discontinuo en caliente		0,40
Mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt)		0,43

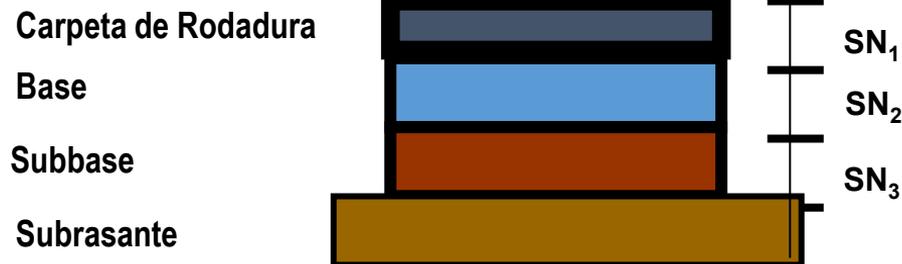
Métodos de Diseño Estructural de Pavimentos – AASHTO 93

$$SN = SN_1 + SN_2 + SN_3$$

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

a_i = Coeficiente Estructural

m_i = Coeficiente de drenaje

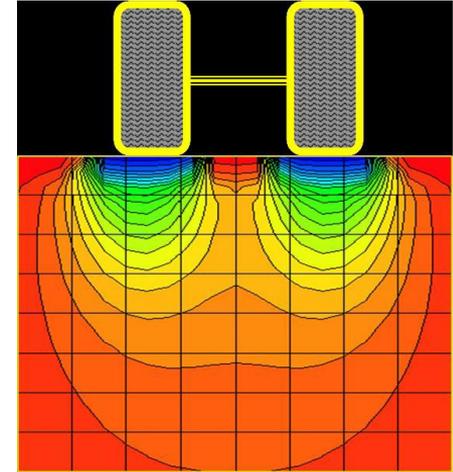


Conclusión 2

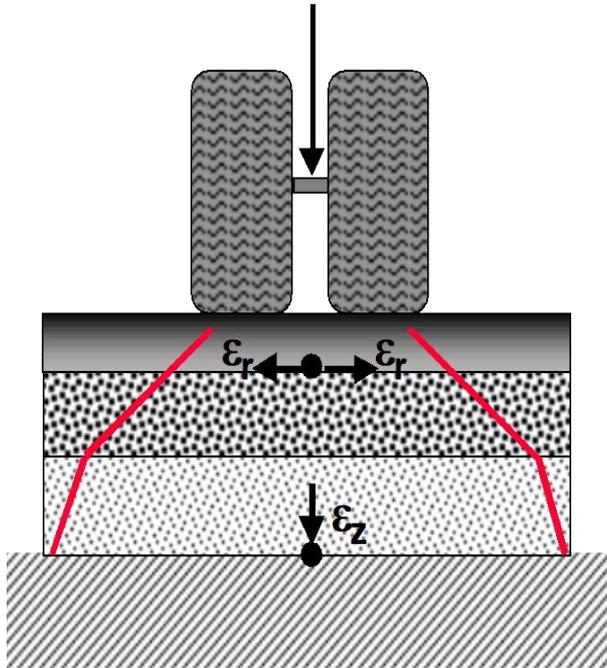
- El Métodos de Diseño AASHTO 93 no dispone de una metodología para la asignación de coeficientes de capa para los Pavimentos Empedrados.

Métodos Mecanicistas

- El Método Mecánico – Empírico está basado en el comportamiento de los materiales componentes de las diferentes capas del pavimento.

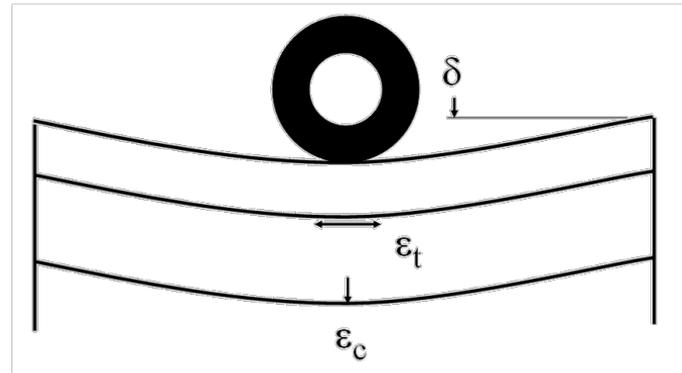


Métodos Mecanicistas



- Las propiedades de los materiales deben ser determinados y así calcular las respuestas del pavimento ante las cargas, tales como tensiones, deformaciones y desplazamientos en sus componentes críticos.

- Las Ecuaciones de Fatiga relacionan las condiciones de tensión – deformación con el número de repeticiones de carga que puede resistir bajo esas condiciones antes de alcanzar un modo de falla específico.



Métodos Mecanicistas

- **El Concepto de Falla**
- En los métodos de diseño de pavimentos mecánicos, se establecen ciertos criterios de falla, cada uno de ellos relacionado con un tipo específico de deterioro. Contrariamente al método AASHTO, que utiliza el concepto de Índice de Serviceabilidad para indicar la condición general del pavimento.

Métodos Mecanicistas

- **Los Tipos de Fallas**
- **Agrietamiento por fatiga:** Las fisuras por fatiga en los pavimentos flexibles son debidas a las tensiones horizontales en la base de la capa asfáltica. El criterio de falla relaciona un cierto número de repeticiones de carga admisible con la deformación por tensión.
- **Ahuellamiento:** El ahuellamiento es exclusivo de los pavimentos flexibles, debido a la deformación permanente o hundimiento a lo largo de la huella, limitándose a una profundidad tolerable, por ejemplo 1,25 mm.



Agrietamiento por fatiga:

Las fisuras por fatiga son debidas a las tensiones horizontales en la base de la capa asfáltica.

El criterio de falla relaciona un cierto número de repeticiones de carga admisible con la deformación por tensión.



Ahuellamiento: El ahuellamiento en los pavimentos flexibles es debido a la deformación permanente de la subrasante a lo largo de la huella.

Se limita a una profundidad tolerable, por ejemplo 1,25 mm.



Carpeta asfáltica sobre empedrado con fisuras



Carpeta asfáltica sobre
empedrado con
ahuellamientos

Conclusión 3

- El Método Mecanicista requiere la obtención del Módulo de la capa de Empedrado para su aplicación.

Métodología para la Estimación de Módulos

- A efectos de la estimación del Módulo de Diseño para Pavimentos flexibles que incluyen capas de Empedrado se han realizado mediciones de las deflexiones en varios tramos con empedrados con el FWD.
- A partir del resultado de las deflexiones se realizó la estimación de los módulos mediante el retrocálculo.
- Para el Retrocálculo de los Módulos se utilizó el Programa **BackViDe – IMAE**. Permite el ajuste de los módulos en base a la medición de deformaciones.

Proyecto de Mejoramiento del Corredor de Exportación



Tramo:
Natalio – Río Tembey

Consultora: Central

Tipo de Pavimento:
Empedrado

- **Preparación de la Superficie**
- La superficie del empedrado no es apta para para tomar las mediciones de las deflexiones con el FWD.
- Selección de puntos representativos para el ensayo.
- Regularización asfáltica con un mínimo espesor con las dimensiones que requiere el equipo para su operación.



Selección de
lugares para el
ensayo



Regularización con
asfalto en frío.



Equipo Utilizado



Cálculo del Módulo de la capa de Empedrado

Dist. (m)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Modulos Empedrado
270	534	345	227	142	97	61	56	440
2.829	416	225	151	96	72	54	48	452
5.218	499	300	179	115	91	67	15	396
10.067	666	397	386	130	91	61	16	360
10.911	459	307	200	143	112	81	63	580
14.242	712	347	208	129	92	64	46	209
Promedio	548	320	225	126	93	65	41	406
Maximo	712	397	386	143	112	81	63	580
Minimo	416	225	151	96	72	54	15	209
Percentil 90	689	372	307	143	105	74	60	285

Resumen de los valores de módulos obtenidos

Resultados del Retroajuste modular

Observaciones al ajuste

Número de iteraciones **48**, Convergencia de módulos,

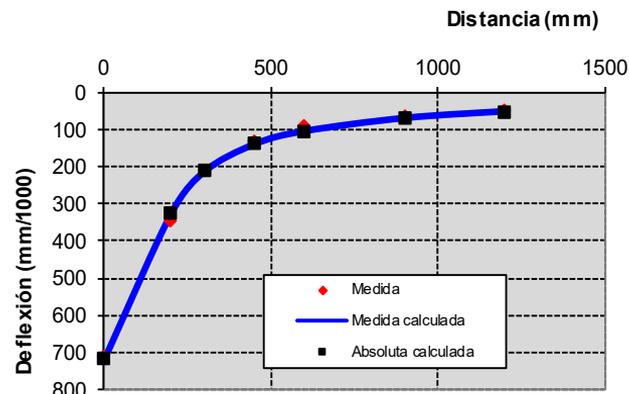
Tipo de medición de la deformada

ABSOLUTA FWD

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)							Radio Curv	
	0	200	300	450	600	900	1200	0 (m)	
Medida	712	347	208	129	92	64	46		55
Calculada	716	325	212	139	104	69	51		51
Error	4	22	4	10	12	5	5		Eprom 8,9

Eprom	
Caso anterior	
	10,4

Estructura	Tipo de Capa	Espesor (mm)	Módulo (MPa)
	Asfáltica CA	10	8000
	Bloques Articulados	200	209
	Subrasante		171



Ejemplo de Salida del Programa BackViDe – IMAE.

Proyecto de Mejoramiento del Corredor de Exportación



Tramo:
Natalio – Río Tembey

Tipo de Pavimento:
Empedrado

Paquete Propuesto:
Carpeta y base granular sobre
empedrado existente

Proyecto de Mejoramiento del Corredor de Exportación



Tramo:
Cedrales – Pte. Franco

Consultora: Central

Tipo de Pavimento:
Carpeta sobre Empedrado



Cálculo del Módulo de la capa de Empedrado

Dist. (m)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Modulos Empedrado
250	268	197	152	105	72	41	32	
506	236	162	122	84	57	38	32	396
750	241	182	149	112	85	56	47	530
1.000	262	196	159	115	84	56	46	367
1.250	258	181	132	85	60	43	37	282
1.498	215	135	97	64	41	28	25	600
1.751	281	211	166	119	84	52	43	246
1.997	255	194	160	123	92	59	47	429
2.249	246	193	162	127	98	66	54	574
2.494	251	193	161	123	94	63	52	524
2.716	311	223	175	127	94	59	49	325
Promedio	257	188	149	108	78	51	42	427
Maximo	311	223	175	127	98	66	54	600
Minimo	215	135	97	64	41	28	25	246
Percentil 90	281	211	166	127	94	63	52	278

Cálculo del Módulo de la capa de Empedrado

Dist. (m)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Modulos Empedrado
2.700	353	248	186	124	89	59	50	219
2.576	224	168	139	107	82	58	49	600
2.322	278	210	171	125	91	57	45	280
2.074	233	174	140	103	75	50	41	424
1.821	240	176	141	104	78	51	39	459
1.571	208	149	116	82	60	38	32	498
1.326	214	144	107	73	51	34	30	600
1.074	239	176	145	109	83	56	45	600
825	274	190	153	113	84	56	44	529
574	254	179	137	95	65	45	39	343
320	263	186	143	95	63	36	29	
77	261	189	151	106	75	48	38	287
-	265	189	153	106	77	50	40	331
Promedio	254	183	145	103	75	49	40	431
Maximo	353	248	186	125	91	59	50	600
Minimo	208	144	107	73	51	34	29	219
Percentil 90	277	206	167	122	88	58	48	281

Resultados del Retroajuste modular

Observaciones al ajuste

Número de iteraciones 8, Convergencia de módulos,

Tipo de medición de la deformada

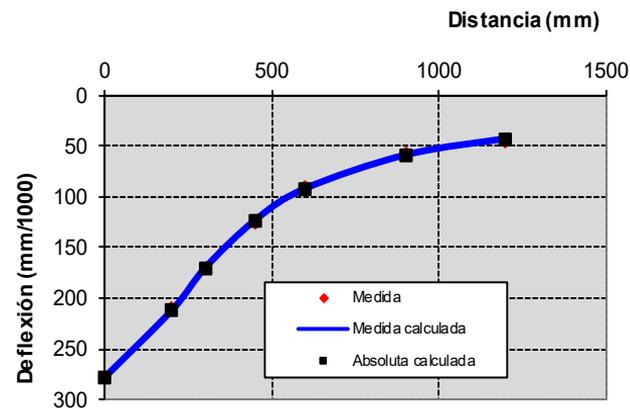
ABSOLUTA FWD

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)							Radio Curv	
	0	200	300	450	600	900	1200	0 (m)	
Medida	278	210	171	125	91	57	45		294
Calculada	278	212	170	123	92	59	43		303
Error	0	2	1	2	1	2	2		Eprom 1,4

Eprom
Caso anterior
1,4

Estructura Tipo de Capa Espesor (mm) Módulo (MPa)

	Asfáltica CA	100	6853
	Bloques Articulados	200	280
	Subrasante		207



Ejemplo de Salida del Programa BackViDe – IMAE.

Conclusión 4

- El Módulo de Diseño adoptado para la capa de empedrado es de 250 MPa.

Otras Experiencias Recientes



Tramo:
San Cristobal – Naranjal – Ruta 6

Tipo de Pavimento:
Empedrado

Otras Experiencias Recientes

- **Tramo: San Cristobal – Naranjal – Ruta 6**
- En la obra del tramo mencionado a cargo del Consorcio Concret Mix y Asociados, la contratista ha presentado un Informe de Evaluación Modular de la capa de Empedrado Existente, en la cual se justifica el diseño de pavimento en los tramos con empedrado existente.
- El Informe fue elaborado por la Empresa PEE SA

Otras Experiencias Recientes

- **De acuerdo al Informe:**
- “Del análisis de los resultados se desprenden que la estructura presenta heterogeneidad en los diferentes tramos medidos. De todas formas, en todos los casos estudiados, el módulo promedio de la capa de empedrado supera los 250 MPa.”

San Cristobal – Naranjal – Ruta 6

Capas	Espesor (cm)
Carpeta de CA	6
Base Granular Estabilizada (CBR \geq 100%)	16
Sub Base Granular de regularización (CBR \geq 80%)	Variable 9 - 14
Empedrado existente	15 a 18
Terraplén (CBR \geq 5%)	

La solución técnica para los sectores con **empedrado existente**, consiste en una base granular con CBR 100% de espesor variable sobre la capa del empedrado y una carpeta de espesor mínimo de 6 cm.



Empedrado con fallas de subrasante



Carpeta asfáltica sobre empedrado con ahuellamientos



Carpeta asfáltica sobre empedrado con ahuellamientos



Carpeta asfáltica sobre empedrado con ahuellamientos

Conclusión 5

- Para un tránsito medio a pesado, la capa de concreto asfáltico directo sobre el empedrado sin un refuerzo de base granular o similar no garantiza la capacidad estructural necesaria para la vida útil de proyecto.