

SECCION 3.604 DISEÑO DE PAVIMENTOS NUEVOS

3.604.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES

3.604.101 Consideraciones Generales. El método de diseño de pavimentos flexibles nuevos que se presenta en este Manual, está basado en el método AASHTO. Fundamentalmente es la versión de 1993 del método, con algunas precisiones y complementos para ajustarlo más a la realidad chilena. Esto último implica, entre otros cambios, que el procedimiento no debe utilizarse para diseñar pavimentos localizados en las áreas desérticas del norte del país; entendiéndose como tales las ubicadas al norte del paralelo 29° 30' y siempre que la precipitación media anual, para 10 años de periodo de retorno (PP_{10}), sea igual o inferior que 40 mm.; en esas zonas se aplicarán los criterios que se exponen en el Tópico 3.604.4, Pavimentos para la Zona Norte.

El procedimiento que se describe es el resultado de ensayos realizados en pistas de pruebas, construidas bajo condiciones ambientales y con suelos de características muy definidas y en muchos casos completamente diferentes a las condiciones que se dan en algunas zonas del país. Por consiguiente, a pesar que se le han introducido una serie de modelaciones matemáticas tendientes a ajustar mejor algunos parámetros a la situación real de la zona donde se emplaza el proyecto que se diseña, se debe ser extremadamente cauteloso cuando corresponda salirse mucho del marco bajo el cual fue desarrollado.

El método en su versión de 1993, es una extensión del procedimiento original derivado de la prueba AASHO realizada durante 2 años y terminada en 1960. Las modificaciones introducidas en esta versión están únicamente orientadas a expandir las posibilidades de aplicación del método a diferentes climas, diseños, materiales y suelos. Siguiendo ese lineamiento, el procedimiento que se presenta, incluye algunos cambios adicionales destinados a ajustarse mejor a la realidad nacional.

La fórmula general de diseño relaciona la cantidad de ejes equivalentes (EE) solicitantes con el número estructural y el nivel de confianza, de manera que la estructura experimente una pérdida de serviciabilidad determinada. La ecuación es la siguiente:

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} \cdot 10^{-(16,40 + ZR \times S_0)} \cdot M_R^{2,32} \cdot [(p_i - p_f) / (p_i - 1,5)]^{1/\beta} \quad (\text{ec. 3.604.101.1})$$

$$\beta = 0,40 + [97,81 / (NE + 25,4)]^{5,19} \quad (\text{ec. 3.604.101.2})$$

en que:

EE : ejes equivalentes de 80 KN acumulados durante la vida de diseño

NE : número estructural (mm)

$$NE = a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot m_2 \cdot h_2 + a_3 \cdot m_3 \cdot h_3$$

a_1, h_1 : coeficiente estructural y espesor (mm) de cada una de las capas asfálticas o tratadas que componen el pavimento. Los subíndices 2 y 3 representan las capas granulares no tratadas.

m_2, m_3 : coeficiente de drenaje de las capas no tratadas (bases y subbases granulares)

Z_R : coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte

S_0 : desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.

M_R : módulo resiliente del suelo de la subrasante (MPa)

p_i : índice de serviciabilidad inicial

p_f : índice de serviciabilidad final

Un pavimento flexible es un sistema multicapa y por lo tanto, debe diseñarse como tal. Esto implica, en primer lugar, una secuencia de capas que a partir de la subrasante contemple una subbase, una base y la o las capas asfálticas. El primer cálculo es determinar, mediante el algoritmo desarrollado por AASHTO, el número estructural (NE_T) que se requiere sobre la subrasante. Enseguida, se establecen los espesores mínimos de capas asfálticas a colocar para que las tensiones que se generan no originen fallas en la subrasante ni en las propias capas asfálticas; para tales efectos se presentan Tablas y gráficos que permiten determinar el número estructural mínimo a colocar sobre la base (NE_A), en función de las solicitaciones previstas y de la temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA) del lugar donde se localiza la obra. El número estructural para las capas no ligadas (subbases y bases granulares) se determina como la diferencia entre NE_T y NE_A .

La estructuración de las diferentes capas debe hacerse de manera que la suma de los productos de los espesores por sus correspondientes coeficientes estructurales satisfagan los números estructurales calculados.

La valorización de los parámetros necesarios para establecer el número estructural requerido se explican más adelante, en los Numerales siguientes:

Serviciabilidad	Numeral 3.604.102
Ejes Equivalentes Solicitantes	Numeral 3.604.103
Nivel de Confianza	Numeral 3.604.104
Módulos Resilientes y Elásticos	Numeral 3.604.105
Coefficientes de Drenaje	Numeral 3.604.106
Coefficientes Estructurales	Numeral 3.604.107

3.604.102 Serviciosibilidad. El pavimento se diseña para que sirva por un determinado lapso llamado vida de diseño, que se refiere al período durante el cual la serviciosibilidad se mantiene dentro de ciertos límites; terminada la vida útil de diseño deberá rehabilitarse. La ecuación de diseño establece un estado inicial del pavimento (p_i), que depende exclusivamente de las posibilidades tecnológicas disponibles para construirlo y un nivel de deterioro considerado como final o inconveniente para transitar (p_f).

Algunas investigaciones indican que la vida diseño no es independiente del nivel de la serviciosibilidad inicial, de manera que los pavimentos con buen p_i logran vidas útiles más prolongadas que los con serviciosibilidades iniciales más deficientes, permaneciendo constantes las demás condiciones.

En la Tabla 3.604.102.A se entregan los valores que se recomiendan para estos parámetros. En situaciones especiales se podrán adoptar índices de serviciosibilidad final distintos a los que se señalan en la Tabla, siempre que se justifiquen adecuadamente y cuenten con la conformidad de la Dirección de Vialidad.

TABLA 3.604.102.A
INDICES DE SERVICIABILIDAD

Indice de Serviciosibilidad Inicial (p_i)	4,2
Indice de Serviciosibilidad Final (p_f)	2,0

3.604.103 Solicitaciones. Las solicitudes que afectan la estructura se expresan como los EE acumulados durante el período de vida de diseño definido. Salvo que se indique o autorice especialmente de otra manera, normalmente los pavimentos se deberán diseñar en una sola etapa y para las vidas útiles que se indican en la Tabla 3.604.103.A.

**TABLA 3.604.103.A
VIDA DE DISEÑO**

CLASIFICACION DEL CAMINO	VIDA DE DISEÑO (AÑOS)
De alto Tránsito en Zonas Urbanas	20 – 30
Caminos Nacionales	10 - 20
Regionales Principales	10 - 20
Regionales Secundarios	5 – 20

El cálculo de las solicitudes expresadas como ejes equivalentes (EE) se ajustará a los criterios expuestos en el Numeral 3.603.202 y teniendo en consideración los siguientes aspectos:

- El TMDA para el año de partida, así como sus proyecciones, deberá responder a un estudio de demanda específico para el camino que se proyecta.
- El camino o proyecto debe sectorizarse en tramos homogéneos en los cuales las solicitudes acumuladas durante la vida útil de diseño (EE) sean iguales.
- En lo posible se realizarán algunos pesajes de ejes para establecer, al menos, un orden de magnitud de los EE por tipo de vehículo que corresponde; los valores de EE/Veh incluidos en la Lámina 3.603.202.C deben utilizarse sólo cuando no se dispone de otra información. Por lo demás, debe tenerse en consideración que habitualmente las estratigrafías de pesos por eje resultan mucho más livianas en las proximidades de las plazas de pesaje fijas que en el resto de la red.
- Debe asegurarse que los flujos que efectivamente circularán por la ruta y que se utilizan para calcular los EE, en ningún momento superen la capacidad de la carretera, según los criterios expuestos en 3.102.805; si ello ocurriera y salvo que existan planes concretos de una ampliación, las solicitudes deben mantenerse constantes a partir del año que se alcance la capacidad máxima.
- El cálculo de los EE debe presentarse en un cuadro igual o similar al modelo que se incluye como Cuadro 3.603.202E y en todo caso debe incluir al menos antecedentes relacionados con el periodo de vida útil, el TMDA para cada año, total y para cada una de las categorías en que se hubiere dividido el tránsito, el factor de pista de diseño, los EE estimados para cada año y los acumulados.

3.604.104 Confiabilidad. El grado de confiabilidad del diseño se controla por el factor de confiabilidad (F_R) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Z_R) y de la desviación normal del error combinado (S_0) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

Para las situaciones normales, la Tabla 3.604.104.A indica los niveles de confianza a utilizar en los diseños y los correspondientes valores del coeficiente estadístico Z_R . En situaciones especiales, tales como vías urbanas o semi urbanas de alto tránsito, túneles, accesos a viaductos con mucho tránsito, inmediaciones de las plazas de peaje, etc., se podrán adoptar niveles de confianza distintos a los que se señalan en la Tabla, siempre que se justifiquen adecuadamente y cuenten con la conformidad de la Dirección de Vialidad.

En los diseños de proyectos localizados en la zona norte, (ver Tópico 3.604.4), se recomienda utilizar un nivel de confianza del 60%, cualquiera fuere el tipo y características del camino a proyectar.

La desviación normal del error combinado (S_0), tal como se señala en el Numeral 3.603.204, incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, entre los cuales tienen una participación preponderante los errores que pudieran darse en la predicción del tránsito solicitante y el grado de variabilidad que presentan los suelos de la subrasante. Cuando el nivel de solicitaciones es muy elevado, la probabilidad de errar por defecto en la predicción es menor, debido a que la pista de diseño se encuentra a niveles cercanos a la saturación; asimismo, entre mayor es la dispersión de los valores representativos de los suelos de la subrasante, existe una probabilidad más alta de fallas. Por último, con el propósito de minimizar los trabajos de mantenimiento durante la vida de servicio de la obra, el nivel de confianza del diseño debe crecer en la medida que aumenta el tránsito.

La Tabla 3.604.104.A indica los valores que se recomienda utilizar en los diseños de pavimentos flexibles en función de las solicitaciones esperadas y del coeficiente de variación (coeficiente de variación = desviación estándar / promedio) de la serie de valores representativos de las características de los suelos de la subrasante.

TABLA 3.604.104.A
NIVEL DE CONFIANZA Y VALOR DEL S_0

EE Solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	S_0 en función del coeficiente variación de los suelos				
			15 %	20%	30 %	40%	50%
< 5	60	- 0,253	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
5 – 15	60 – 70	- 0,253 – 0,524	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
15 – 30	60 – 75	- 0,253 – 0,674	0,45	0,46	0,47	0,49	0,50
30 – 50	70 – 80	- 0,524 – 0,841	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49
50 – 70	70 – 85	- 0,524 – 1,037	0,42	0,43	0,44	0,47	0,48
70 – 90	70 – 90	- 0,524 – 1,282	0,40	0,41	0,42	0,45	0,46

Debido a la mayor dispersión que resulta al determinar el número estructural para subrasantes débiles, conviene utilizar el mayor valor del rango del nivel de confianza para subrasantes de baja capacidad de soporte y mal drenaje.

El factor de confiabilidad (F_R) se determina con los valores del Z_R y S_0 que se adopten, según la ecuación, 3.603.204.1.

$$\text{Log } F_R = - Z_R \cdot S_0 \quad \text{ó} \quad F_R = 10^{-Z_R \cdot S_0} \quad (\text{ec. 3.603.204.1})$$

3.604.105 Módulos Resilientes y Elásticos.

3.604.105(1) Relaciones CBR – Módulo Resiliente. El método de diseño AASHTO caracteriza las propiedades de los suelos de la subrasante mediante el parámetro llamado Módulo Resiliente Efectivo (M_R). El módulo resiliente representa el módulo elástico del material después de haber sido sometido a cargas cíclicas; se determina mediante el ensayo AASHTO T 294-92, Método Estándar de Ensayo del Módulo Resiliente de Bases Granulares no Tratadas, Materiales de Subbase y Suelos de Subrasante - Protocolo SHRP P46.

La palabra "efectivo" implica que se debe adoptar un valor medio compensado, teniendo en consideración las variaciones estacionales que eventualmente pudiera experimentar este parámetro en el transcurso del año. En todo caso, para las condiciones que más habitualmente se dan en el país, se recomienda utilizar un valor único, dejando sólo para situaciones climáticas extremas, donde las heladas penetran hasta la subrasante, la aplicación de los conceptos de compensación por daño relativo de la subrasante.

El módulo resiliente (M_R) para diseñar pavimentos en trazados nuevos, habitualmente se define en forma indirecta, estimándolo a partir de resultados de ensayos que determinan el CBR. Diversos estudios, realizados en diferentes lugares han dado origen a una cantidad de fórmulas para relacionar el M_R con el ensayo CBR; las diferencias se originan porque los resultados son muy sensibles a una variedad de factores tales como las propiedades de los suelos, su contenido de humedad, nivel de compactación, estado tensiones de la muestra y procedimientos utilizados en el ensayo.

Para este Manual se incluyen las relaciones determinadas por el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) en 1987 y que deben utilizarse solamente para calcular el Módulo Resiliente de los suelos que conforman la subrasante.

El ensayo CBR debe realizarse en conformidad con el ensayo descrito en el Método 8.102.11 (LNV 92) del Volumen N° 8 de este Manual y teniendo en consideración que en la zona norte (ver Tópico 3.604.4), el ensayo debe realizarse a la humedad óptima (no saturados). Las relaciones son las siguientes:

$$M_R \text{ (MPa)} = 17,6 (\text{CBR})^{0,64} \quad \text{para } \text{CBR} < 12\% \quad (\text{ec. 3.604.105.1})$$

$$M_R \text{ (MPa)} = 22,1 (\text{CBR})^{0,55} \quad 12 \leq \text{para } \text{CBR} < 80\% \quad (\text{ec. 3.604.105.2})$$

3.604.105(2) Módulo Elástico de un Sistema Bicapa. Como se señala en el Numeral 3.603.105(3), el módulo elástico de una capa no tratada no es independiente del módulo de la capa subyacente, de manera que no debe estructurarse colocando sucesivamente capas de módulos muy diferentes, como sería emplazar una subbase, de alto módulo elástico, sobre una subrasante de baja capacidad soporte.

Para los efectos prácticos, se recomienda que cuando los suelos que conforman la subrasante (tanto en terraplenes como en cortes) tengan un $\text{CBR} \leq 10\%$ (aprox. $M_R \leq 77 \text{ MPa}$), incluir una capa superior de mejoramiento de un espesor no inferior a 300 mm, de preferencia granular (según clasificación AASHTO) y $\text{CBR} \geq 15\%$ o alternativamente colocar bajo la subbase una tela geotextil, según los criterios que se señalan en 3.602.407.1.

El sistema clásico para establecer el módulo de un sistema de dos capas elásticas sometido a una carga circular, es determinar el asentamiento elástico, el que está dado por la siguiente relación:

$$\Delta = \frac{1,5 p a^2}{E_0} \left\{ \frac{a}{\left[a^2 + h^2 \left(\frac{E_1}{E_0} \right)^{2/3} \right]^{1/2}} \left(1 - \frac{E_0}{E_1} \right) + \frac{E_0}{E_1} \right\} \quad (\text{ec. 3.604.105.3})$$

en que:

- p : presión de inflado del neumático
a : radio del círculo de apoyo del neumático en el pavimento
 E_0 y E_1 : módulos elásticos de la capa de orden 1 y 0, respectivamente
H: : espesor de la capa de orden 1 (superpuesta a la orden 0)

La relación anterior permite determinar el módulo resiliente de una subrasante que incluye una capa superior de mejoramiento de acuerdo con lo siguiente:

$$M_{Rd} = F \cdot M_{R0} \quad (\text{ec. 3.604.105.4})$$

$$1/F = \frac{0.125}{\left[0.0156 + h^2 \left(\frac{M_{R1}}{M_{R0}} \right)^{2/3} \right]^{1/2}} \left(1 - \frac{M_{R0}}{M_{R1}} \right) + \frac{M_{R0}}{M_{R1}} \quad (\text{ec.3.604.105.5})$$

en que:

- M_{Rd} : módulo resiliente de diseño (MPa)
 F : factor dado por la ec. 3.604.105.5
 M_{R0} : módulo resiliente de la subrasante o capa de orden 0 (MPa). Según ec. 3.604.105.1 ó 2
 M_{R1} : módulo resiliente de la capa de orden 1 (MPa). Según ec. 3.604.105.1 ó 2.
 h : espesor de la capa de orden 1 (m)

3.604.105(3) Sistematización del Análisis de la Información de la Prospección de Suelos. El valor representativo de las características de una determinada subrasante, de la que se cuenta con una serie de valores provenientes de la prospección de suelos, es fundamental para lograr un diseño adecuado del pavimento. Consecuentemente, la información recogida debe tratarse en forma sistemática y ordenada, de manera de asegurarse que los valores adoptados sean efectivamente los representativos de la situación real.

La siguiente pauta define un procedimiento para analizar en forma sistemática y secuencial la información originada en una prospección de suelos con el propósito de caracterizar una subrasante; se ha supuesto una prospección mediante ensayos tradicionales (el procedimiento cuando se dispone de ensayos no destructivos, tipo deflectometría, se indica en el Numeral 3.604.104 Evaluación del Pavimento Existente):

- Programar la prospección cuando se disponga de un perfil longitudinal del proyecto con la rasante prácticamente definitiva, aún cuando no necesariamente con todos sus parámetros y elementos calculados o totalmente definitivos.
- Preparar un cuadro, que puede ser igual o similar al de la Lámina 3.604.105.A que se incluye como ejemplo, conteniendo al menos la información que allí se indica. Los antecedentes a consignar deben corresponder a los del estrato más débil detectado hasta una profundidad de mínimo 1,5 m por debajo de la rasante del camino.

Los antecedentes incluidos en las diferentes columnas de la Lámina 3.604.105.A son los siguientes:

- | | | |
|----------------|---|--|
| Columnas 1 y 2 | : | Número correlativo y localización (kilometraje) de la prospección. |
| Columna 3 | : | Número de la muestra/profundidad respecto de la superficie del suelo natural de donde se extrajo la muestra. |
| Columna 4 | : | Altura de la rasante sobre el suelo natural; (+) terraplén, (-) corte. |
| Columnas 5 y 6 | : | Clasificación de suelos; sistemas U.S.C.S. y AASHTO. |
| Columnas 7 y 8 | : | Límites de Atterberg. |
| Columna 9 | : | CBR al 95% de la D.M.C.S. |
| Columna 10 | : | Densidad natural |
| Columna 11 | : | Porcentaje de la densidad respecto al Proctor. |
| Columna 12 | : | CBR a la densidad natural. (Los valores para CBR no ensayados se deben estimar en base principalmente a la clasificación del suelo según AASHTO, la Densidad Natural y/o el porcentaje del Proctor). |
| Columna 13 | : | Valor de M_R calculado según ec. 3.604.105.1 ó 3.604.105.2 |
| Columna 14 | : | Valor del M_R adoptado para diseño (ver Numeral siguiente). |

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pozo N°	Km.	N°/prof	H rasante	U.S.C.S.	AASHTO	IP	LL	CBR 95	D. NAT	Dens(%)	CBR nat	Mr	Mr dis
1	0,300	1/0,5	0,5	ML	A-4(4)	7	31	27,9	1,49	81	5,9	55	78 m
2	0,500	4/0,5	0,7	ML-CL	A-4(1)	6	27		1,65		7,0 e	61	81 m
3	0,750		-2,0	GC							15,0 e	98	98
4	1,000	6/0,6	0,2	GM	A-7-6(4)	14	42		1,59		3,0 e	61	61 g
5	1,300	7/0,6	-0,3	GC	A-2-6(0)	13	37	38,9	1,81	91,5	24,1	127	127
6	1,500	8/0,6	-0,4	GM	A-2-4(0)	14	42		1,59		10,0 e	77	77
7	1,760	9/0,5	-0,1	GM	A-2-6(0)	11	36				10,0 e	77	77
8	2,000	11/0,6	0,8	GW	A-1-a(0)	4	22	102	2,12	94	92,1	266	
9	2,300	13/0,7	0	SC	A-6(2)	11	29	22,9	1,69	85,1	6,5	58	80 m
10	2,500	14/0,7	0,5	CL	A-6(4)	14	34		1,79		6,0 e	55	80 m
11	2,740	15/0,6	0,7	GP-GC	A-2-7(0)	22	45	19	1,98	95	19,0	112	112
12	3,000	16/0,1	2,0	GC	A-7-6(3)	19	45		1,63		3,0 e	36	77 t
13	3,270	18/0,6	3,0	CL	A-6(7)	15	34	20,9	1,55	83	4,3	45	77 t
14	3,500		2,0	roca fisurada							15,0 e	98	98
15	3,750	20/0,8	-3,0	GM	A-2-4(0)	8	32	79,3	1,77	83,6	11,4	84	84
16	4,000	21/0,6	0,0	GC	A-2-7(2)	21	41		1,77		15,0 e	98	98
17	4,250	22/0,6	1,0	GM	A-1-a(0)	3	23	107,6	1,91	86,7	31,3	146	147
18	4,500	23/0,6	1,3	GW-GM	A-1-a(0)	4	26				15,0 e	98	98
19	4,820				roca						15,0 e	98	98
20	5,020	24/0,6	-5,0	CL	A-6(5)	13	32	14,1	1,61	84,9	4,4	45	72 m
21	5,200	26/0,6	-0,3	GM	A-1-a(0)	NP	NP				15,0 e	98	98
(e)	CBR deducido por correlación										Promedio	90,9	
(m)	Mr modificado por capa mejoramiento de 300 mm y CBR = 20%										Desv. Standard	20,2	
(t)	Mr modificado terraplén h > 2 m, CBR = 10%										Coef. Variación	0,22	
(g)	Mr modificado por colocación de geotextil												

3.604.105(4) Módulo Resiliente de Diseño. El método de diseño AASHTO utiliza como M_R de diseño, el valor promedio de la serie muestral; por otra parte, adoptando el S_0 adecuado, se incorpora al diseño la dispersión que presenta la serie por medio del coeficiente de variación (coeficiente de variación = desviación estándar / promedio). Por lo tanto, utilizar procedimientos más conservadores para definir el valor de diseño implica aceptar coeficientes de seguridad mayores que los necesarios, además que se pierde el control sobre el nivel de confianza con que resulta el diseño.

Como criterio general para un buen diseño, se recomienda evitar dejar hasta 1,5 a 2,0 m por debajo de la rasante, suelos de baja capacidad soporte, es decir suelos con el equivalente a $CBR \leq 3 \%$, salvo que un estudio o tratamiento especial asegure que se comportarán en forma adecuada. Cuando se presentan suelos de las características señaladas, normalmente existen tres posibilidades para ajustarse al requerimiento de mejorar su capacidad soporte:

- Realizar un estudio de Mecánica de Suelos que permita establecer procedimientos para densificar el suelo, normalmente junto con drenarlo, con lo que mejora su capacidad soporte.
- Reemplazar un estrato del suelo de baja capacidad por otro mejor. Esta solución presenta el problema de cómo evitar que el tramo donde se realizó el reemplazo se convierta en un especie de "piscina", con lo que se pierde todo el efecto deseado. La "piscina" se crea porque el suelo de reemplazo es normalmente mucho más permeable que el que lo rodea, de manera que el agua que alcanza hasta él no puede drenar.
- Colocar una tela tipo geotextil que aumente la capacidad soporte del suelo. Esta alternativa, normalmente de fácil aplicación, permite considerar que la colocación del geotextil equivale a elevar la capacidad soporte del suelo en el equivalente de 3 a 5 % del CBR, tal como se explica en 3.602.407.1. De acuerdo con ello, si sobre un suelo $CBR = 2\%$ se coloca una tela geotextil, equivale para los efectos del comportamiento, como si el suelo tuviera una capacidad de soporte CBR entre 5 y 7%. En todo caso para utilizar este procedimiento debe verificarse que el recubrimiento sobre la tela sea el adecuado para evitar ahuellamientos, deformaciones y eventuales roturas de la tela.

También, cuando la prospección indique la existencia de suelos en la subrasante con $CBR \leq 10\%$, tal como se indica en 3.604.105(2), es conveniente incluir una capa de mejoramiento superficial de las características allí señaladas; esto se traduce en un módulo resiliente modificado, que puede calcularse con la ec. 3.604.105.5.

Por otra parte, en las zonas donde la rasante impone terraplenes de alturas superiores a 2 m, son las características de los suelos especificados para estos rellenos los que definen los parámetros para el diseño del pavimento. En el caso de cortes de alturas importantes, el plano de la subrasante normalmente intercepta suelos de mucho mejor calidad que los detectados en la superficie; esta circunstancia también debe ser considerada para el diseño.

Cualquiera fuere el procedimiento que se utilice para modificar la capacidad soporte del suelo en la zona representada por la muestra, el valor correspondiente del M_R representativo se coloca en la columna 14 del cuadro de la Lámina 3.604.105.A. Deberá utilizarse alguna nomenclatura como la incluida en la referida Lámina para señalar los motivos por los que se ha optado por ese valor.

El siguiente paso es establecer el M_R de diseño para sectores o tramos considerados homogéneos en cuanto a las características de los suelos. Se considera que un tramo es homogéneo cuando el coeficiente de variación no es superior al 50 %; con este valor se determina el correspondiente S_0 , para lo que se utiliza la Tabla 3.604.104.A. Sin embargo, como el S_0 depende del coeficiente de variación y por consiguiente modifica los espesores de las capas de la estructura, es conveniente analizar más de una sectorización antes de optar por una definitiva.

Una vez definida la sectorización se calcula, para cada tramo, el M_R promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Los valores del M_R superiores que el promedio más 2 desviaciones estándar, se desechan y no entran en el cálculo; las zonas o áreas representadas por valores inferiores al promedio menos 2 desviaciones estándar, debe tratarse para mejorar la calidad del suelos de fundación, para lo cual pueden aplicarse algunos de los procedimientos indicados más arriba. Tampoco deben considerarse en el cálculo del M_R promedio representativo del tramo.

3.604.105(5) Ejemplo de cálculo del M_R . En la Lámina 3.604.105.A se incluye un ejemplo de cómo se debe calcular el Módulo Resiliente de diseño. El procedimiento es el siguiente:

- En las columnas 1 a la 11 se colocaron los antecedentes básicos tal como se describe en 3.604.105(3).
- Columna 12. Se indican los CBR a la densidad natural, en atención a lo señalado en 3.603.205(2); unos determinados en el laboratorio y los otros estimados, básicamente en la clasificación del suelo y la densidad natural ó porcentaje del Proctor. Los valores estimados se individualizan con la letra "e" al costado derecho de la columna.
- Columna 13. Se anota el valor del M_R calculado con las ecuaciones 3.604.105.1 ó 3.604.105.2, según corresponda.
- Columna 14. Se anota el M_R de diseño, calculado con alguno de los siguientes criterios que se individualizan con la letra colocada a la derecha de la columna:
 - Donde el $M_R < 77$ MPa (ver 3.604.105(2)) se considera una capa de mejoramiento de 300 mm de espesor y CBR = 20%, que eleva el módulo general; se aplica la ecuación 3.604.105.5 y se indica con la letra "m".
 - Donde el CBR < 3% (ver 3.604.105(4)) se coloca una tela geotextil que equivale a mejorar el CBR en 4% para los efectos de calcular M_R ; se indica con la letra "g". Alternativamente, también se pudo optar por un reemplazo de material o por colocar una capa de mejoramiento de espesor superior a 300 mm y utilizar el criterio indicado en el punto precedente.
 - Donde se proyecta un terraplén de 2 m de alto o más, es el de este material el que define el valor de diseño, ello es $M_R = 77$ MPa; esos casos se indican con la letra "t".
 - Se elimina de la serie el valor correspondiente al Pozo N° 8, pues $M_R = 266$ MPa, queda fuera de rango dado por el promedio más dos desviaciones estándar.
- Los valores utilizados para calcular el M_R de diseño tienen un promedio de 90,9 MPa, una desviación estándar de 20,2 MPa y un coeficiente de variación (CV) de 22%. En consecuencia:
 - Puede considerarse todo como un solo tramo, pues el coeficiente de variación es menor que 50% (ver 3.604.105(4)).
 - Para los efectos de diseño se debe utilizar $M_R = 90$ MPa.
 - De acuerdo con la Tabla 3.604.104.A para CV = 22% ;se tiene:
 - $S_0 = 0,46$ si $EE \leq 30$ millones.
 - $S_0 = 0,45$ si $30 < EE \leq 50$ millones.
 - $S_0 = 0,43$ si $50 < EE \leq 70$ millones.
 - $S_0 = 0,41$ si $EE > 70$ millones.

3.604.106 Coeficientes de Drenaje. El coeficiente de drenaje (m_i) que figura en la ecuación general de diseño (ec. 3.604.101.1), permite ajustar el coeficiente estructural de las capas granulares no tratadas, en función de las condiciones del drenaje del proyecto que se analiza.

De acuerdo con AASHTO, la "calidad del drenaje" es función del tiempo que demora una base o sub base saturada, en evacuar el 50% del agua. Consecuentemente, la calidad del drenaje depende de factores tales como: la permeabilidad de la base, la permeabilidad del suelo de la subrasante, la existencia o no de sistemas de drenaje insertos en la base, la pendiente transversal y la distancia a que se encuentran los puntos de evacuación.

La Tabla 3.604.106.A indica la clasificación de calidad del drenaje de las bases en función del tiempo que demora la evacuación del 50% del agua de saturación, según la definición de AASHTO. Se recomienda utilizarla en todos los diseños de pavimentos localizados al sur del paralelo 29° 30' y en la zona Cordillerana al norte de ese paralelo. Para la zona norte, exceptuando la zona Cordillerana, se recomienda adoptar, en todos los casos, $m_i = 1,4$, tal como se indica en el Tópico 3.604.4.

TABLA 3.604.106.A
CALIDAD DEL DRENAJE DE BASES Y SUB BASES

Calidad del Drenaje	Tiempo de Evacuación
Excelente	2 h.
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Malo	1 mes
Muy Malo	no drena

Los coeficientes de drenaje (m_i) a utilizar dependen tanto de la calidad del drenaje como del tiempo durante el cual la estructura del pavimento se verá expuestas a niveles de humedad cercanas a la saturación, en la práctica, con más de 50% de humedad. El tiempo de saturación depende de la calidad del drenaje y también de la distribución y frecuencia de las precipitaciones que caracterizan la zona donde se localiza el proyecto que se analiza.

La Tabla 3.604.106.B, muestra los coeficientes de drenaje que se proponen para el país; corresponden a un resumen de los resultados obtenidos en un estudio realizado especialmente con ese propósito.

TABLA 3.604.106.B
COEFICIENTES DE DRENAJE (m_i)

REGION	PRECIP.	BASE PERMEABLE	BASE : FINOS HASTA 10%		BASE: MAS 10% FINOS	
			SUBRAS. GRAN.	SUBRAS. FINOS	SUBRAS. GRAN	SUBRAS. FINOS
IV	<= 100 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,05
	> 100 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,05 - 0,80
V a VI	<=150 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,00
	> 150 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
VII a IX	<= 350 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,00	0,80
	> 350 mm	1,40 - 1,35	1,25 - 1,15	1,25 - 1,15	1,00-0,80	0,80
X	<= 1.500 mm	1,40 - 1,35	1,25 - 1,15	1,15	1,00-0,80	0,80 - 0,60
	> 1.500 mm	1,35 - 1,30	1,15 - 1,00	1,15 - 1,00	0,80	0,60
XI y XII	<= 500 mm	1,40 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
	> 500 mm	1,40- 1,35	1,25 - 1,15	1,15	0,80	0,80

Base permeable: menos de 3% de finos y/o coeficiente de permeabilidad > 0,01 cm/s
Subras Gran.: subrasante granular, máximo 35% pasa tamiz de 0,08 mm
Subras Finos: subrasante de suelo fino.

Cuando se proyecte una base permeable deberán tomarse todas las precauciones necesarias para que sean efectivas asegurando su drenaje, no sólo inmediatamente después de construida, si no durante toda la vida útil de la obra.

3.604.107 Coeficientes Estructurales. La versión 1993 del método AASHTO enfatiza la conveniencia de asignar el coeficiente estructural adecuado a cada capa del pavimento, considerando las propiedades reales de los materiales que las constituyen. El coeficiente estructural depende directamente del módulo elástico del material que compone la capa, por lo que la mejor manera de obtenerlo es a través de esa propiedad. Consecuentemente, se deben realizar los ensayos correspondientes para determinar el módulo elástico de las bases y subbases; si son granulares no tratadas, según AASHTO T 294 - 92 y si son concretos asfálticos u otros materiales tratados, según ASTM 4123 ó ASTM C 469.

Los ensayos para determinar el módulo elástico requieren equipos especiales, por lo que normalmente se prefiere determinar el coeficiente estructural por procedimientos indirectos. Las siguientes

relaciones permiten estimar el coeficiente estructural (a) de concretos asfálticos en función del módulo elástico y de la estabilidad Marshall.

$$a_1 = 0,0052 \cdot E^{0,555} \quad E \text{ en MPa} \quad (\text{ec. 3.604.107.1})$$

$$a_1 = 0,0078 \cdot EM^{0,441} \quad EM : \text{Estabilidad Marshall en N} \quad (\text{ec. 3.604.107.2})$$

Los coeficientes estructurales de bases y subbases granulares no tratadas se pueden estimar a partir de las siguientes correlaciones con el CBR:

Coeficiente estructural de bases granulares (a_2).

$$a_2 = 0,032 \cdot (\text{CBR})^{0,32} \quad (\text{ec. 3.604.107.3})$$

Coeficiente estructural de subbases granulares (a_3).

$$a_3 = 0,058 \cdot (\text{CBR})^{0,19} \quad (\text{ec. 3.604.107.4})$$

Los coeficientes estructurales de bases tratadas, tanto con cemento como con asfalto, se pueden estimar a partir de las siguientes correlaciones con la resistencia a la compresión simple determinada con ensayos a la ruptura de testigos de probetas cilíndricas (ensayadas según 8.402.11 (LNV 82) Volumen N° 8 de este Manual a los 7 días) y con la estabilidad Marshall, respectivamente.

Coeficiente estructural de bases tratadas con cemento (a_2).

$$a_2 = 0,0918 \cdot (f_c)^{0,514} \quad (\text{ec. 3.604.107.5})$$

f_c : resistencia cilíndrica a la ruptura (MPa)

Coeficiente estructural de bases tratadas con asfalto (a_2).

$$a_2 = 0,0074 \cdot (EM)^{0,415} \quad EM \text{ en Newton(N)} \quad (\text{ec.3.604.107.6})$$

Para condiciones normales de diseño, con las especificaciones de construcción habituales, se recomienda adoptar los coeficientes estructurales que se indican en la Tabla 3.604.107.A. Sin embargo, para condiciones especiales, debidamente justificadas, se deberán utilizar los coeficientes apropiados a esas situaciones.

TABLA 3.604.107.A
COEFICIENTES ESTRUCTURALES PARA LAS CAPAS DE PAVIMENTO

CAPA	CARACTERISTICAS	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

3.604.108 Estructuración de las Capas.

3.604.108(1) Número Estructural Total (NE_T). El número estructural total (NE_T), corresponde al valor que resulta de aplicar la ec. 3.604.101.1 para todos los parámetros indicados en los Numerales precedentes, incluyendo el valor del M_R representativo de la subrasante. Todas las capas que compondrán la estructura del pavimento, incluyendo las asfálticas y las no ligadas, se deben estructurar por tipo y espesores de manera que se cumpla con la expresión ec. 3.604.108.1:

$$NE \text{ (mm)} = a_1 \times h_1 + a_2 \times h_2 \times m_2 + a_3 \times h_3 \times m_3 \quad (\text{ec. 3.604.108.1})$$

Donde a_i son los coeficientes estructurales de las diversas capas, h_i los espesores (mm) de cada capa y m_i los coeficientes de drenaje de las capas no tratadas.

La ecuación 3.604.108.1, no tiene una solución única pues existen muchas combinaciones que satisfacen el número estructural. Sin embargo, existen una serie de consideraciones que deben tenerse en cuenta al definir los espesores de las diferentes capas.

- Los espesores tienen ciertas limitaciones a los que deben ajustarse para hacerlas compatibles con requerimientos constructivos y de estabilidad; la Tabla 3.604.108.A indica esas limitaciones. El espesor mínimo de la capa asfáltica sobre una base granular se refiere a las pistas de circulación; en las bermas pueden colocarse espesores menores e incluso variables.
- Por razones constructivas y para evitar una proliferación excesiva de diferentes diseños, los espesores de las capas ligadas (asfálticas) deben redondearse a los 5 mm, en tanto que los de las capas no ligadas, a los 10 mm.
- Una mala estructuración puede originar tensiones y deformaciones superiores a las que son capaces de soportar, la subrasante, las capas granulares no tratadas o las mezclas asfálticas, por lo que la distribución del NE_T no puede hacerse en forma arbitraria. Se recomienda proceder ajustándose a los siguientes criterios:
 - La relación entre los módulos elásticos de dos capas no ligadas (granulares) sucesivas, no debe ser mayor que 4.
 - La relación entre las capas asfálticas y las granulares debe definirse con el procedimiento que se describe en el Numeral 3.604.108(2); éste permite determinar el número estructural mínimo (NE_A) que deben tener todas las capas de mezclas asfálticas a colocar en la estructura. El procedimiento se basa en análisis teórico – empíricos sustentados en la experiencia nacional.

TABLA 3.604.108.A
LIMITACIONES A LOS ESPESORES DE LAS CAPAS ESTRUCTURALES

CAPA	Espesor (mm)
Cada capa asfáltica individual, mín	50 (*)
Capa granular no tratada, mín.	15

(*) Para las capas con mezclas convencionales dependiendo del clima y condiciones de la zona el espesor podrá ser 10 mm menor al indicado en la Tabla.

Para las capas de rodadura especiales tales como mezclas drenantes, microaglomerados discontinuos en caliente y mezclas SMA, no existirá restricción en el espesor mínimo, este estará determinado por las condiciones de diseño de la mezcla (T_{máx.} y otros).

3.604.108(2) Número Estructural Mínimo (NE_A) de las Capas Asfálticas. La fracción del número estructural total (NE_T) que debe asignarse a las capas asfálticas de la estructura se calcula según un procedimiento de dos etapas: primero se determina la temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA) en la localidad donde se localiza la obra, luego con los gráficos que se incluyen, parametrizados para diferentes TMAPA, las solicitaciones previstas (EE) para la vida útil de diseño y el módulo resiliente (M_R) de la subrasante, se determina el número estructural mínimo (NE_A) que deben tener las capas asfálticas.

La temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA) se calcula a partir de las temperaturas medias mensuales del aire (TMMA) de la zona donde se emplaza el camino. Para ello se deben utilizar los antecedentes disponibles en la estación meteorológica más cercana a la obra. La TMMA representativa de cada mes, corresponde al promedio de una estadística de no menos de 10 años. Luego se prepara una Tabla (ejemplo, Tabla 3.604.108.B) en que para la TMMA de cada uno de los 12 meses del año se determina un factor de ponderación (W_i), mediante la siguiente relación:

$$TMMA (^{\circ}C) = 20,348 + 17,5683 \log W_i \quad (\text{ec. 3.604.108.2})$$

en que:

TMMA (°C) : temperatura media mensual del aire

W_i : factor de ponderación

Por último la temperatura media anual ponderada (TMAPA) se determina calculando el factor de ponderación promedio del año (W_p) que se introduce en la misma ec. 3.604.108.2, pero en forma inversa; el resultado es la TMAPA.

TABLA 3.604.108.B
CALCULO DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL PONDERADA DEL AIRE (TMAPA)
(ejemplo)

MES	TMMA (°C)	W _i
Enero	28	2,73
Febrero	26	2,10
Marzo	22	1,24
Abril	19	0,84
Mayo	16	0,57
Junio	8	0,20
Julio	8	0,20
Agosto	6	0,15
Septiembre	12	0,33
Octubre	12	0,33
Noviembre	19	0,84
Diciembre	22	1,24
	Suma	10,77
	Promedio (W _p) = 10,77/12	0,90
	TMAPA (°C)	19,5 aprox. 20 °C

La Lámina 3.604.108.A muestra, para varias localidades a lo largo del país, las TMMA y las TMAPA.

Por otra parte la fracción del número estructural total (NE_T) que debe asignarse a las diversas capas asfálticas que conformarán la estructura se determina con los gráficos incluidos en las Láminas 3.604.108.B1, B2 y B3 que corresponden a TMAPA de 6° C, 14 °C y 19 °C, respectivamente. El procedimiento general a seguir es el siguiente:

- Determinar las solicitaciones, expresadas como EE, calculadas para la vida útil de diseño. Los gráficos han sido calculados para un nivel de confianza del 50%, es decir, para $F_R = 1$ en la ec. 3.603.204.1, por lo tanto, para niveles de confianza diferentes que 50%, debe calcularse el correspondiente F_R . En los gráficos se entra con la cantidad de EE que resulta de multiplicar los EE de diseño por el factor F_R calculado.
- Las curvas que figuran en los gráficos han sido determinadas utilizando como parámetro diferentes valores del módulo resiliente de la subrasante (M_R).
- Con los dos datos descritos se elige el gráfico correspondiente a la TMAPA de la localidad donde se encuentra el proyecto.
- A los gráficos se entra por las abscisas con los EE de diseño, afectados por el factor F_R , subiendo verticalmente hasta encontrar la curva correspondiente al M_R de la subrasante. Saliendo horizontalmente hacia la izquierda, se determina el número estructural que deben tener la totalidad de las capas asfálticas (NE_A). Por lo tanto se debe cumplir lo siguiente:

$$NE_A \text{ (mm)} = \sum a_i \cdot h_i \quad (\text{ec. 3.604.108.3})$$

en que:

a_i : coeficiente estructural de la capa asfáltica de orden i

h_i : espesor (mm) de la capa asfáltica de orden i

- En el caso que la TMAPA de una localidad no coincida con ninguna de las señaladas en los 3 gráficos, se deben calcular los NE_A para las dos TMAPA más cercanas e interpolar linealmente para encontrar el valor buscado. De la misma manera se debe interpolar dentro del gráfico para valores del M_R diferentes de los que figuran en los gráficos.
- Las capas no ligadas (subbases y bases granulares) deben estructurarse de manera que se cumpla al siguiente relación:

$$(NE_T - NE_A) \text{ (mm)} = a_2 \cdot h_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot h_3 \cdot m_3 \quad (\text{ec. 3.604.108.4})$$

en que:

a_2 : coeficiente estructural de la base granular

h_2 : espesor (mm) de la base granular

m_2 : coeficiente de drenaje de la base granular

a_3 : coeficiente estructural de la sub base

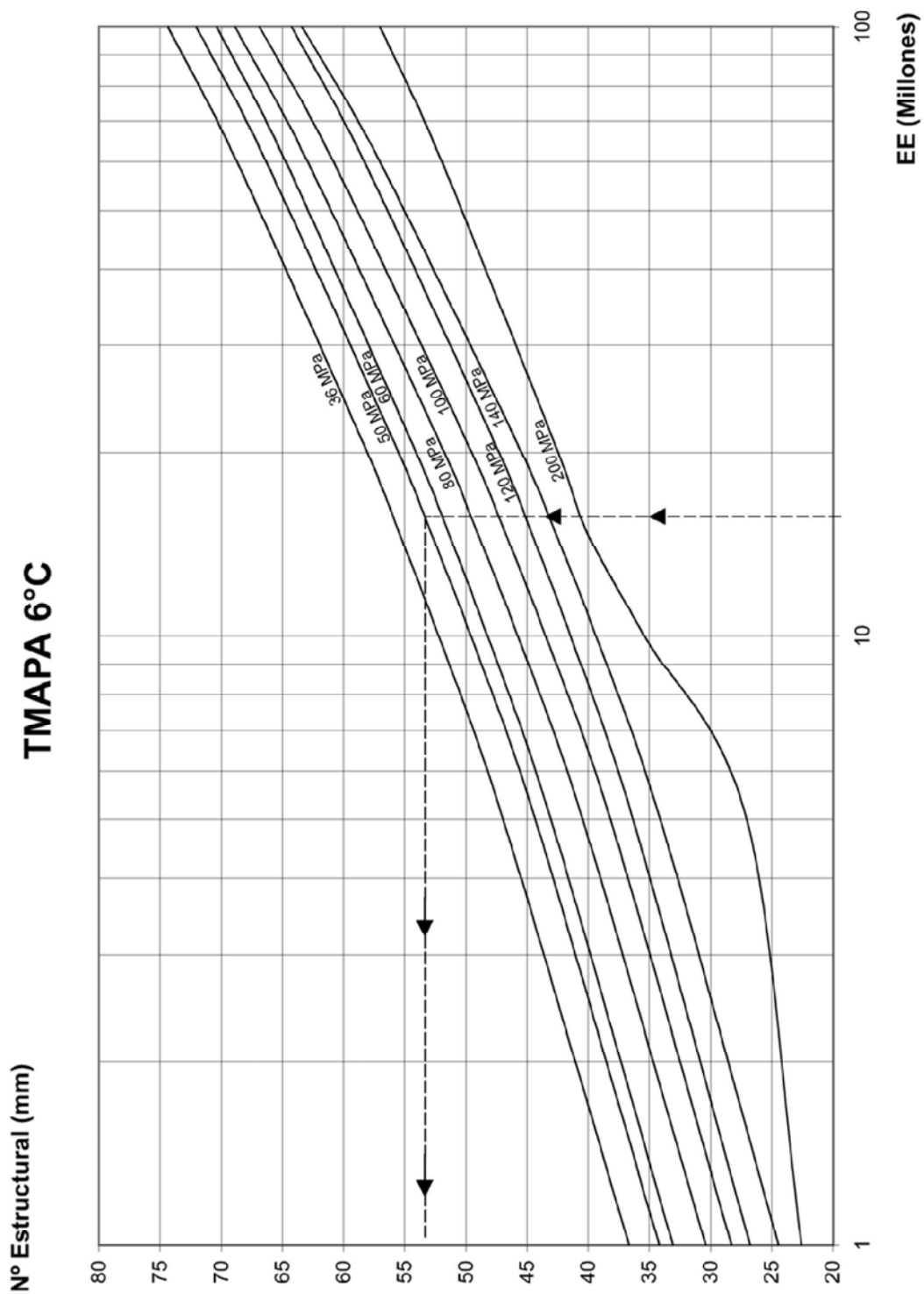
h_3 : espesor (mm) de la subbase

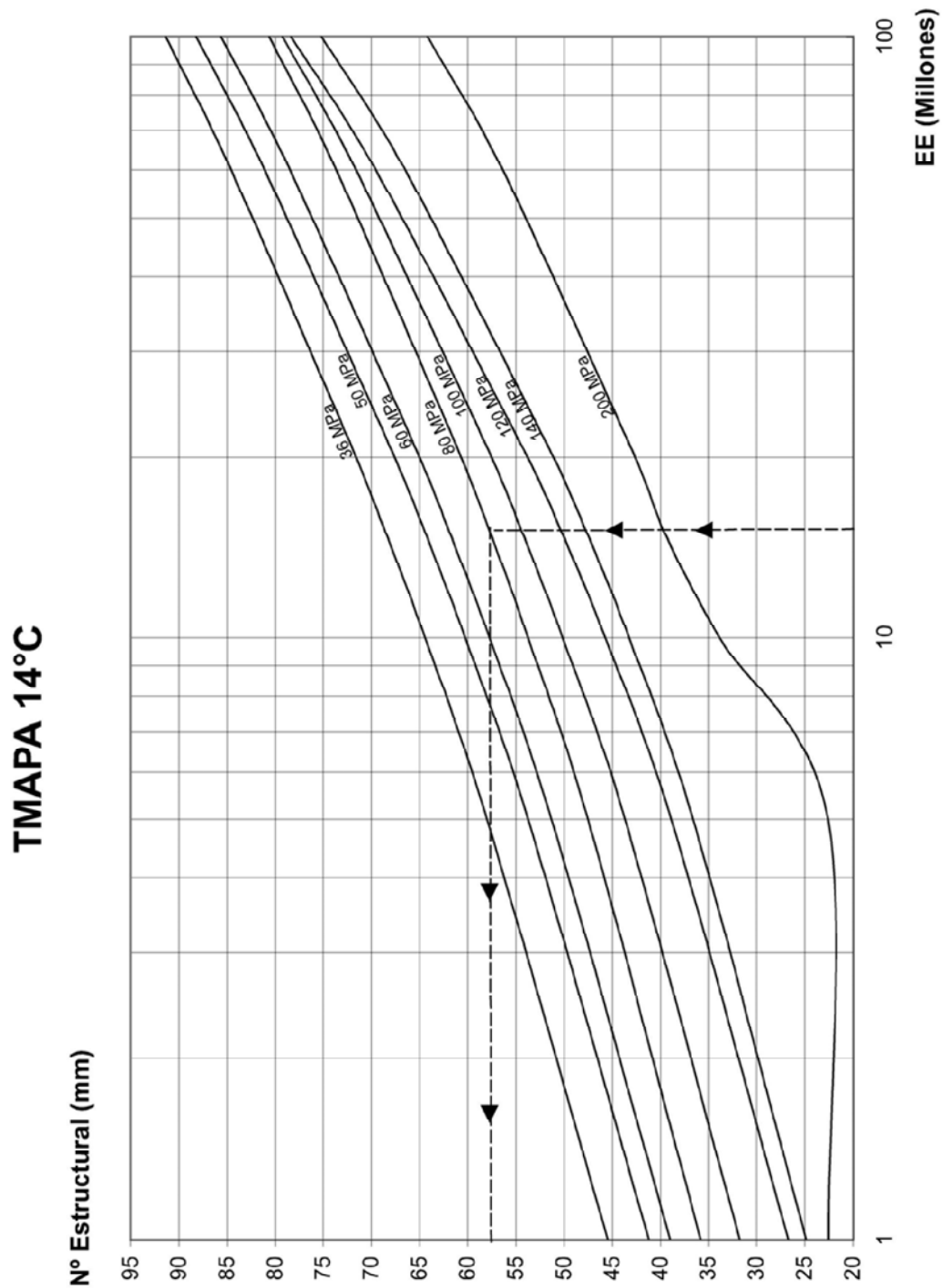
m_3 : coeficiente de drenaje de la subbase

- Los espesores de las capas ligadas (asfálticas) deben redondearse a los 5 mm, en tanto que los de las capas no ligadas, a los 10 mm.

3.604.109 Programa Computacional. El diseño descrito puede realizarse con la ayuda del programa computacional PAVIVIAL que se incluye como anexo a este Volumen del Manual de Carreteras, utilizando la opción Pavimentos Flexibles. Los requerimientos de equipos y plataforma de operación son los mismos que se señalan en el Tópico 3.601.3.

MANUAL DE CARRETERAS VOL. N° 3 DISEÑO		TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES (TMMA) Y TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES PONDERADAS (TMPA)												3.604.108 A Junio 2002





TMAPA 19°C

