

DNER

667
—
22

MÉTODO DE PROJETO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

RIO DE JANEIRO
1981

MT-DNER-INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIARIAS.

DIVISÃO DE INFORMÁTICA TÉCNICO CIENTÍFICA.



**MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM
INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS
DIVISÃO DE INFORMÁTICA TÉCNICO-CIENTÍFICA**

**667
22**

**MÉTODO DE PROJETO
DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

ENG.º MURILLO LOPES DE SOUZA

3ª Edição

**RIO DE JANEIRO
1981**

SOUZA, Murillo Lopes de. Método de projeto de pavimentos flexíveis.
3 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, IPR., 1981 (IPR. Publ. 667).

1. Pavimento betuminoso. I. Série. II. Título.

B. Central
DNER

CDD. 625-85

Os conceitos emitidos neste trabalho, correspondem, apenas,
aos pontos de vista do autor.

Resumo

No presente trabalho apresenta-se um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis com base na experiência do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América do Norte e em algumas conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHO.

SUMÁRIO

	Páginas
1 — Introdução	7
2 — Capacidade de suporte	7
3 — Classificação dos materiais granulares empregados no pavimento	8
4 — Tráfego	10
5 — Fator climático Regional	14
6 — Coeficiente de equivalência estrutural	15
7 — Espessura mínima de revestimento betuminoso	16
8 — Dimensionamento do pavimento	16
9 — Exemplo de dimensionamento	20
10 — Acostamento	30
11 — Pavimento por etapas	30

1 — Introdução — O método ora apresentado tem como base o trabalho "Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume", da autoria de W.J. Turnbull, C.R. Foster e R.G. Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO.

2 — Capacidade de suporte — A determinação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais granulares constitutivos do pavimento é feita pelo C.B.R., em corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório, nas condições de massa específica e umidade especificadas para o serviço no campo e submetidos a embebição durante quatro dias.

Quando se desejar e for justificável uma segurança maior, em vez do C.B.R., pode-se usar um C.B.R. corrigido em função do Índice de Grupo (I.G.), que é denominado Índice de Suporte (I.S.).

O Índice de Suporte (I.S.) é dado por:

$$I.S. = \frac{C.B.R. + C.B.R. \cdot I.G.}{2}$$

com a condição $I.S. \leq C.B.R.$

C.B.R. = valor C.B.R. determinado no ensaio respectivo e nas condições descritas anteriormente.

C.B.R._{I.G.} = um valor dado na tabela a seguir

TABELA — 1

Índice de Grupo (I.G.)	C.B.R. _{I.G.}
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

A tabela anterior pode ser substituída por outra desde que se disponha de melhor correlação entre I.G. e C.B.R.*

Exemplos de cálculo de I.S.

Exemplo 1 — Calcular o I.S. de um material que apresenta C.B.R. = 10 e I.G. = 9

$$\text{C.B.R.} = 10$$

$$\text{C.B.R.}_{\text{I.G.}} = 6$$

$$\text{I.S.} = \frac{\text{C.B.R.} + \text{C.B.R.}_{\text{I.G.}}}{2} = \frac{10 + 6}{2} = 8$$

Exemplo 2 — Calcular o I.S. de um material que apresenta C.B.R. = 12 e I.G. = 1

$$\text{C.B.R.} = 12$$

$$\text{C.B.R.}_{\text{I.G.}} = 18$$

$$\text{I.S.} = 12$$

No caso de anteprojetos, para efeito de estimativa apenas, e quando não se dispõe do valor C.B.R., pode-se tomar, como capacidade de suporte dos materiais, o valor C.B.R._{I.G.}. Como o pavimento é dimensionado em função da capacidade de suporte do subleito, vê-se que há três alternativas:

- a) em função do C.B.R.
- b) em função do I.S.
- c) em função do C.B.R._{I.G.}

O procedimento normal é o dimensionamento em função do C.B.R. e a adoção das alternativas b ou c deve ser convenientemente justificada.

O subleito e as diferentes camadas do pavimento devem ser compactadas de acordo com os valores fixados nas "Especificações Gerais", recomendando-se que, em nenhum caso, o grau de compactação deve ser inferior a 100% com relação ao ensaio AASHTO normal.

Os materiais do subleito devem apresentar uma expansão, medida no ensaio C.B.R., menor ou igual a 2%.

3 — Classificação dos materiais granulares empregados no pavimento.

- a) Materiais para reforço do subleito, os que apresentam:
I.S. ou C.B.R. maior que o subleito
Expansão $\leq$ 2%

* C.B.R. tem o mesmo significado de I.S.C. (Índice Suporte Califórnia)

b) Materiais para sub-base, os que apresentam:

I.S. ou C.B.R. ≥ 20

I.G. = 0

Expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10 lbs)

c) Materiais para base, os que apresentam:

C.B.R. ≥ 80

Expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lbs)

Limite de liquidez ≤ 25

Índice de plasticidade ≤ 6

Caso o limite de liquidez seja superior a 25 e/ou o índice de plasticidade seja superior a 6, o material pode ser empregado em base (satisfeitas as demais condições), desde que o equivalente de areia seja superior a 30%.

Para um número de repetições do eixo-padrão, durante o período do projeto $N \leq 10^6$, podem ser empregados materiais com C.B.R. ≥ 60 , e as faixas granulométricas E e F da AASHTO.

Os materiais para base granular devem se enquadrar numa das seguintes faixas granulométricas:

TABELA - 2

Peneiras	Porcentagem em peso passando			
	A	B	C	D
2"	100	100	—	—
1"	—	75 — 90	100	100
3/8"	30 — 65	40 — 75	50 — 85	60 — 100
Nº 4	25 — 55	30 — 60	35 — 65	50 — 85
Nº 10	15 — 40	20 — 45	25 — 50	40 — 70
Nº 40	8 — 20	15 — 30	15 — 30	25 — 45
Nº 200	2 — 8	5 — 15	5 — 15	5 — 20

A fração que passa na peneira nº 200 deve ser inferior a 2/3 de fração que passa na peneira nº 40. A fração graúda deve apresentar um desgaste Los Angeles inferior a 50. Pode ser aceito um valor de desgaste maior, desde que haja experiência no uso do material.

Em casos especiais podem ser especificados outros ensaios representativos da durabilidade da fração graúda.

Para o caso de materiais lateríticos, as "Especificações Gerais" fixarão valores para expansão, índices de consistência, granulometria e durabilidade da fração gráuda.

4 — Tráfego — O pavimento é dimensionado em função do número equivalente (N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido. A Fig. 1 e Tabela 8 dão os fatores de equivalência de operação entre eixos simples e em "tandem", com diferentes cargas e o eixo simples padrão com carga de 8,2 t (18.000 lbs).

Seja V_1 o volume médio diário de tráfego no ano de abertura, num sentido e admitindo-se uma taxa $t\%$ de crescimento anual, em progressão aritmética, o volume médio diário de tráfego, V_m , (num sentido) durante o período de P anos, será:

$$V_m = \frac{V_1 [2 + (P - 1) t/100]}{2}$$

O volume total de tráfego, (num sentido) durante o período, V_t , será:

$$V_t = 365 \times P \times V_m$$

Admitindo-se uma taxa $t\%$ de acréscimo anual em progressão geométrica, o volume total do tráfego, V_t , durante o período de projeto é dado por:

$$V_t = \frac{365 V_1 [(1 + t/100)^P - 1]}{t/100}$$

Conhecido V_t , calcula-se N , que é o número equivalente de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto e o parâmetro de tráfego usado no dimensionamento.

$$N = V_t \times (F.E) \times (F.C)$$

$$(F.E) \times (F.C) = F.V$$

$$N = V_t \times (F.V)$$

$F.E$ é um fator de eixos, isto é, um número que, multiplicado pelo número de veículos, dá o número de eixos correspondentes. $F.C$ é um fator de carga, isto é, um número que, multiplicado pelo número de eixos que operam, dá o número de eixos equivalentes ao eixo padrão. $F.V$ é um fator de veículo, isto é, um número que multiplicado pelo número de veículos que operam, dá, diretamente, o número de eixos equivalentes ao eixo padrão.

Para o cálculo de $F.E$, $F.C$ e $F.V$, é necessário conhecer a composição de tráfego. Para isto, é necessário fazer uma contagem do tráfego na estrada que se está considerando, estudando-se um certo volume total do tráfego, V_t (para o período de amostragem). Faz-se a contagem do número total de eixos, n e pesam-se todos estes eixos.

$$\text{Tem-se } n = V_t \times (F.E), \text{ donde, } F.E = \frac{n}{V_t}$$

Com os dados de pesagem, organiza-se um quadro, como o seguinte, agrupando-se os diversos eixos por intervalos de carga, representados pelo seu ponto central:

TABELA – 3

(1)	(2)	(3)	(4)
Eixos Simples (t)	Porcentagem	Fator de equiva- lência	Equivalência de operações
Eixos tan- dem (t)			

Os valores da coluna 3 são obtidos da Fig. 1 e tabela 8

Os valores da coluna 4 são os produtos dos valores da coluna 2 pelos da coluna 3.

O somatório dos valores da coluna 4 representa o produto $100 \times (F.C)$, isto é,

$$\text{Equivalência} = 100 F.C$$

$$\text{Donde, } F.C = \frac{\text{Equivalência}}{100}$$

$$F.V = (F.E) \times (F.C)$$

Normalmente, o cálculo de N é feito de acordo com as seguintes etapas:

a) Cálculo de V_t através de dados estatísticos da estrada que se está considerando, incluindo-se a fixação de V_1 (onde devem ser levados em conta os tráfegos gerado e desviado), do tipo de crescimento e de sua taxa t . O cálculo de V_t pode ser feito também em face de um estudo econômico da região.

b) Cálculo de $F.V$, através dos $F.V$ individuais ($F.V_i$) para as diferentes categorias de veículos, determinadas numa estação de pesagem representativa da região e das percentagens P_i (determinadas no item a) com que estas categorias de veículos ocorrem na estrada que está sendo considerada.

$$F.V = \frac{\sum (P_i) \times (F.V_i)}{100}$$

Os diferentes veículos são classificados pelo DNER nas seguintes categorias:

- a) automóveis
- b) ônibus
- c) caminhões leves, com dois eixos simples, de rodas simples
- d) caminhões médios, com dois eixos, sendo o traseiro de rodas duplas
- e) caminhões pesados, com dois eixos, sendo o traseiro "tandem"
- f) reboques e semi-reboques: as diferentes condições de veículos, em unidades múltiplas.

Os $F.V_i$ para automóveis e caminhões leves (embora calculáveis) são desprezíveis, interessando especialmente, os $F.V_i$ para caminhões médios, pesados e reboques e semi-reboques.

Exemplo 1

Para dados de uma pesagem efetuada e adotando os fatores de equivalência da Fig.1 e Tabela 8, resultaram os seguintes $F.V_i$.

Classe de veículo	$F.V_i$
Automóveis	—
Caminhões leves	—
Caminhões médios	1,67
Caminhões pesados	13,17
Reboques e semi-reboques	10,12
Ônibus	0,76

Exemplo 2

Calcular o número N para uma estrada, que apresenta um $V_m = 1600$ ($P = 20$ anos). Os $F.V_i$ são os do exemplo anterior. A composição de tráfego é a seguinte:

Automóveis -	50%
Caminhões leves -	4%
Ônibus -	5%
Caminhões médios -	32%
Caminhões pesados -	8%
Reboques e semi-reboques -	1%
	<u>100%</u>

Solução

a) Considerando o tráfego total

$$F.V = \frac{\sum (P_i) \times (F.V_i)}{100} = 0,05 \times 0,76 + 0,32 \times 1,67 + 0,08 \times 13,17 + 0,01 \times$$

$$10,12 = 0,038 + 0,535 + 1,050 + 0,101 = 1,724$$

$$F.V = 1,724$$

$$V_t = 365 \times P \times V_m = 365 \times 20 \times 1600 = 11.700.000$$

$$N = V_t \times (F.V) = 11.700.000 \times 1,724 = 20.200.000 = 2,02 \times 10^7$$

b) Considerando só o tráfego comercial

Caminhões leves -	4%
Caminhões médios -	32%
Caminhões pesados -	8%
Reboques e semi-reboques -	1%
Ônibus -	5%
	<u>50%</u>

Ou

Ônibus -	10%
Caminhões leves -	8%
Caminhões médios -	64%
Caminhões pesados -	16%
Reboques e semi-reboques -	2%
	<u>100%</u>

$$F.V = \frac{\sum (P_i) \times (F.V_i)}{100} = 0,64 \times 1,67 + 0,16 \times 13,17 + 0,02 \times 10,12 + 0,1 \times$$

$$0,76 = 1,070 + 2,100 + 0,203 + 0,076 = 3,449$$

$$V_m = 0,5 \times 1600 = 800; V_t = 365 \times 20 \times 800 = 5.850.000$$

$$N = 5.850.000 \times 3,449 = 20.200.000 = 2,02 \times 10^7$$

O valor V_m deve estar de acordo com a capacidade de tráfego da estrada. O Bureau of Public Roads dos EEUU dá as seguintes indicações sobre capacidade de tráfego das rodovias:

NOTA : Bureau of Public Roads, atual Federal Highway, Administration.

TABELA — 4

Porcentagem de veículos comerciais	Capacidade: volume médio diário de tráfego (automóveis e caminhões nas duas direções).		
	Rodovia rural com 2 faixas de tráfego	Rodovia rural com 4 faixas de tráfego.	Rodovia urbana com 4 faixas de tráfego
0	5.750	19.250	37.500
10	5.200	17.500	34.000
20	4.800	16.050	31.000

NOTA: No Brasil, no entanto, a porcentagem de veículos comerciais oscila entre 50% e 70% do tráfego total.

O tráfego, para efeito de projeto, é o da faixa de tráfego mais solicitada. À falta de dados mais precisos, são fornecidas as seguintes indicações:

Porcentagens de tráfego comercial (em relação ao tráfego comercial nos dois sentidos) na faixa de tráfego tomada para projeto.

TABELA — 5

Número de faixas de tráfego (2 sentidos)	% de veículos comerciais na faixa de projeto
2	50
4	35 a 48
6 ou mais	25 a 48

5 — Fator climático Regional — Para levar em conta as variações de umidade dos materiais do pavimento durante as diversas estações do ano (o que se traduz em variações de capacidade de suporte dos materiais) o número equivalente de operações do eixo-padrão ou parâmetro de tráfego, N , deve ser multiplicado por um coeficiente ($F.R$) que, na pista experimental da AASHTO, variou de 0,2 (ocasião em que prevalecem baixos teores de umidade) a 5,0 (ocasiões em que os materiais estão praticamente saturados). É possível que, no método, objeto deste trabalho, estes coeficientes sejam diferentes, em função da diferença de sensibilidade à variação do número N ; é possível, ainda, pensar-se num fator climático que afetaria a espessura do pavimento (em vez do número N), e que seria, ao mesmo tempo, função desta espessura.

O coeficiente final a adotar é uma média ponderada dos diferentes coeficientes sazonais, levando-se em conta o espaço de tempo em que ocorrem.

Parece mais apropriado a adoção de um tal coeficiente, quando se toma, para projeto, um valor C.B.R. compreendido entre o que se obtém antes e o que se obtém depois da embebição, isto é, um valor correspondente à umidade de equilíbrio. Não se dispõe no Brasil, por enquanto, de elementos experimentais para tal fixação e, como tem sido adotada a embebição dos corpos de prova C.B.R. como norma geral, fica-se quase sempre do lado de segurança, adotando um F.R. = 1.

A determinação dos valores C.B.R. em amostras indeformadas e não embebidas, retiradas de antigos pavimentos, em estado de equilíbrio, bem como o estudo das variações sazonais das deflexões Benkelman, poderão fornecer elementos, não só para fixação mais conveniente dos valores C.B.R. a adotar em projeto, como para a estimativa dos fatores climáticos.

6 — Coeficiente de equivalência estrutural — São os seguintes os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constitutivos do pavimento:

TABELA — 6

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa.	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa.	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência a compressão a 7 dias superior a 45 kg/cm ² .	1,70
Idem, com resistência a compressão a 7 dias entre 45 e 28 kg/cm ² .	1,40
Idem, com resistência a compressão a 7 dias entre 28 e 21 kg/cm ² .	1,20
Bases de Solo — Cal	1,20

NOTA: Pesquisas futuras podem justificar mudanças nestes coeficientes .

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

Revestimento	: K_R
Base	: K_B
Sub-base	: K_S
Reforço	: K_{Ref}

- 7 — Espessura mínima de revestimento betuminoso — A fixação da espessura mínima a adotar para os revestimentos betuminosos é um dos pontos ainda em aberto na engenharia rodoviária, quer se trate de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quer se trate de evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. As espessuras a seguir recomendadas, visam, especialmente, as bases de comportamento puramente granular e são ditadas pelo que se tem podido observar.

TABELA — 7

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tramentos superficiais betuminosos.
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura.
$5 \times 10^6 \leq N < 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura.
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura.
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura.

No caso de adoção de tratamentos superficiais, as bases granulares devem possuir alguma coesão, pelo menos aparente, seja devido à capilaridade ou a entrosamento de partículas.

- 8 — Dimensionamento do pavimento — O gráfico constante da Fig. 2 dá a espessura total do pavimento, em função de N e de I.S. ou C.B.R.; a espessura fornecida por este gráfico é em termos de material com $K = 1,00$, isto é, em termos de base granular. Entrando-se em abscissas, com o valor de N, procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa da capacidade de suporte (I.S. ou C.B.R.) em causa e, procedendo-se horizontalmente, então, encontra-se, em ordenadas, a espessura total do pavimento.

Supõe-se, sempre, que há uma drenagem superficial adequada e que o lençol d'água subterrâneo foi rebaixado a, pelo menos, 1,50 m em relação ao greide de regularização.

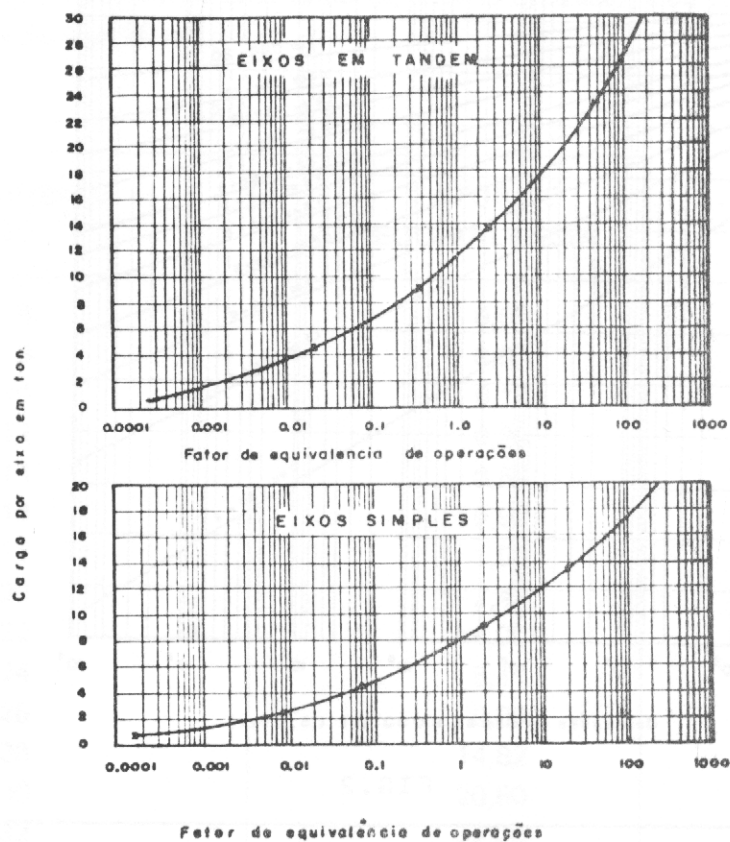


FIG. 1

D.N.E.R.	D.O.P./S.D.T.N.
Des:	Data:

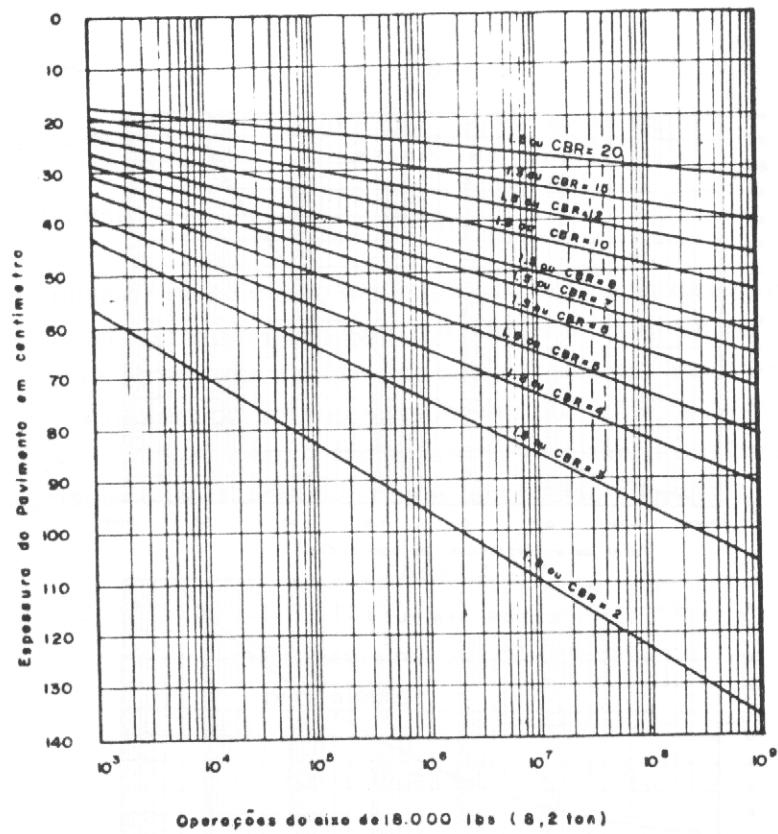


FIG:2

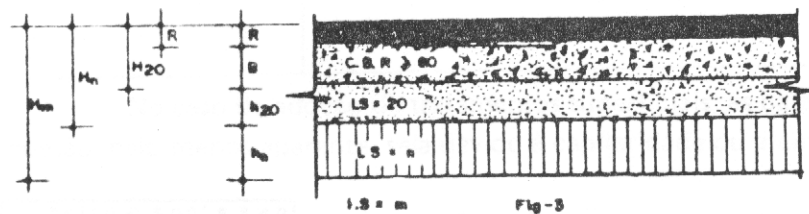


Fig-3

No caso de ocorrência de materiais com C.B.R. ou I.S. inferior a 2, é sempre preferível fazer a substituição, na espessura de, pelo menos 1,00 m, por material com C.B.R. ou I.S. superior a 2.

A espessura mínima a adotar, para compactação de camadas granulares é de 10 cm, a espessura total mínima para estas camadas, quando utilizadas, é de 15 cm e a espessura máxima para compactação é de 20 cm.

TABELA - 8

CARGA/EIXO (t)	FATOR DE EQUIVALENCIA
6	0,04
8	0,08
10	0,15
12	0,29
14	0,58
16	0,92
18	1,50
20	2,47
22	4,00
24	6,11
26	9,88
28	14,82
30	20,80
32	33,00
34	46,80
36	70,00
38	80,00
40	130,00

Eixos
em
"tandem"

(triplo)

A Fig. 3 dá simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento, H_m designa, de modo geral, a espessura total de pavimento necessário para proteger um material com C.B.R. ou I.S. = m etc.; h_n designa, de modo geral, a espessura de camada do pavimento, com C.B.R. ou I.S. = n, etc.

Mesmo que o C.B.R. ou I.S. da sub-base seja superior a 20, a espessura de pavimento necessário para protegê-la é determinada como se este valor fosse 20 e, por esta razão, usam-se, sempre, os símbolos H_{20} e h_{20} para designar as espessuras de pavimento sobre a sub-base e da sub-base respectivamente.

Os símbolos B e R designam, respectivamente, as espessuras de base e de revestimento.

Uma vez determinadas as espessuras H_m , H_n , H_{20} pelo gráfico da Fig. 2 e R, pela tabela representada no item 7, as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n), são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (1)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S \geq H_n \quad (2)$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} \geq H_m \quad (3)$$

Quando o C.B.R. da sub-base for maior ou igual a 40 e para $N \leq 10^6$, admite-se substituir na inequação (1), H_{20} , por $0,2 \times H_{20}$. Para $N > 10^7$, recomenda-se substituir, na inequação (1), H_{20} por $1,2 \times H_{20}$.

9 — Exemplo de dimensionamento

Exemplo 1

Dimensionar o pavimento para uma estrada, em que $N = 10^3$, sabendo-se que o subleito apresenta um C.B.R. = 3 e dispondo-se de material para reforço do subleito, com C.B.R. = 9, de material para sub-base, com C.B.R. = 20 e de material para base, com C.B.R. = 60.

Solução

O revestimento será um tratamento superficial betuminoso, cuja espessura pode-se desprezar

A base tem coeficiente estrutural $K_B = 1,00$; a sub-base tem um coeficiente estrutural $K_S = 1$; o reforço tem um coeficiente estrutural $K_{Ref} = 1$.

$$H_{20} = B + R = 18 \text{ cm}$$

$$H_9 = 26 \text{ cm}$$

$$H_3 = 43 \text{ cm}$$

$$B = 18 \text{ cm}$$

$$B = 18 \text{ cm}$$

$$B + h_{20} \geq 26 \text{ cm}; 18 \text{ cm} + h_{20} \geq 26 \text{ cm}; h_{20} \geq 26 \text{ cm} - 18 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 15 \text{ cm}$$

$$B + h_{20} + h_3 \geq 43 \text{ cm}; 18 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + h_3 \geq 43 \text{ cm}; h_3 \geq 43 \text{ cm} - 33 \text{ cm} = 10 \text{ cm}$$

$$h_3 = 15 \text{ cm}$$

Exemplo 2

Dimensionar o pavimento para uma estrada em que $N = 10^6$, sabendo-se que o subleito apresenta um C.B.R. = 12, dispondo-se de material para sub-base com C.B.R. = 40 e, para base, com C.B.R. = 80.

Solução

O revestimento será um tratamento superficial betuminoso, cuja espessura pode-se desprezar. A base tem coeficiente estrutural $K_B = 1,00$; a sub-base tem coeficiente estrutural $K_S = 1,00$.

$$H_{20} = 25 \text{ cm} = B + R$$

$$H_{12} = 34 \text{ cm}$$

Como a sub-base apresenta um C.B.R. = 40, pode-se substituir H_{20} por $0,8 \times H_{20} = 0,8 \times 25 \text{ cm} = 20 \text{ cm}$.

$$B \geq 20 \text{ cm}$$

$$B = 20 \text{ cm}$$

$$B + h_{20} \geq 34 \text{ cm}; 20 \text{ cm} + h_{20} \geq 34 \text{ cm}; h_{20} \geq 34 \text{ cm} - 20 \text{ cm} = 14 \text{ cm}.$$

$$h_{20} = 15 \text{ cm}$$

Exemplo 3

Dimensionar o pavimento para uma estrada em que $N = 7 \times 10^6$, sabendo-se que o subleito apresenta um C.B.R. = 12 e dispondo-se de material para sub-base, com C.B.R. = 20 e para base, com C.B.R. = 80.

Solução

O revestimento será de concreto asfáltico, com 7,5 cm de espessura; O revestimento tem um coeficiente estrutural $K_R = 2,00$; a base tem um coeficiente estrutural $K_B = 1,00$; a sub-base tem um coeficiente estrutural $K_S = 1,00$

$$H_{20} = B + R = 28 \text{ cm}$$

$$H_{12} = 38 \text{ cm}$$

$$R = 7,5 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B \geq H_{20}; 2 \times 7,5 \text{ cm} + B \geq 28 \text{ cm}; B \geq 28 \text{ cm} - 15 \text{ cm} = 13 \text{ cm}$$

$$B = 15 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_s \geq H_{12}; 2 \times 7,5 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + h_{20} \geq 38 \text{ cm}; h_{20} \geq 38 \text{ cm} - 30 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 8 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 15 \text{ cm}$$

Exemplo 4

Dimensionar o pavimento para uma estrada em que $N = 6 \times 10^7$, sabendo-se que o subleito apresenta um C.B.R. = 8, dispondo-se de material para sub-base, com C.B.R. = 40 e para base, com C.B.R. = 80.

Solução

O revestimento será de concreto asfáltico, com 12,5 cm de espessura.

O revestimento tem um coeficiente estrutural $K_R = 2,00$; a base tem um coeficiente estrutural $K_B = 1,00$; a sub-base tem um coeficiente estrutural $K_S = 1,00$.

$$H_{20} = 30 \text{ cm}$$

$$H_B = 64 \text{ cm}$$

$$R = 12,5 \text{ cm}$$

Sendo $N = 6 \times 10^7 \geq 10^7$, deve-se substituir H_{20} por $1,2 \times H_{20} = 1,2 \times 30 \text{ cm} = 36 \text{ cm}$.

$$RK_R + BK_B \geq 1,2 H_{20}; 12,5 \text{ cm} \times 2 + B \geq 36 \text{ cm};$$

$$B \geq 36 - 25 = 11 \text{ cm}$$

$$B = 15 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_s \geq H_B; 25 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + h_{20} \geq 64 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 64 \text{ cm} - 40 \text{ cm} = 24 \text{ cm};$$

$$h_{20} = 24 \text{ cm}$$

O pavimento será constituído por:

Revestimento de concreto asfáltico:	12,5 cm
Base granular	15 cm
Sub-base granular	24 cm

Ou, por exemplo, adotando-se,

$$B = 19 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S \geq H_g; 25 \text{ cm} + 19 \text{ cm} + h_{20} \geq 64 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 64 \text{ cm} - 44 \text{ cm} = 20 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 20 \text{ cm}$$

O pavimento será constituído por:

Revestimento de concreto asfáltico:	12,5 cm
Base granular	19,0 cm
Sub-base granular	20,0 cm

Exemplo 5

O estudo geotécnico do subleito de um trecho de 1 km de estrada fornece os resultados constantes do boletim de sondagem e do quadro resumo de resultados de ensaios transcritos a seguir:

Boletim de Sondagem — Subleito

Estaca	Posição	Furo	Profundidade (m)	Classificação H.R.B.
0	C	1	0,00 — 0,30	A — 6
"	"	"	0,30 — 1,00	A — 7-6
"	E	2	0,00 — 0,20	A — 6
"	"	"	0,20 — 1,00	A — 7-6
"	D	3	0,00 — 0,30	A — 6
"	"	"	0,30 — 1,00	A — 7-6
5	C	4	0,00 — 0,40	A — 6
"	"	"	0,40 — 1,00	A — 7-6
"	E	5	0,00 — 0,30	A — 6
"	"	"	0,30 — 1,00	A — 7-6
"	D	6	0,00 — 0,50	A — 6
"	"	"	0,50 — 1,00	A — 7-6
10	C	7	0,00 — 0,50	A — 6
"	"	"	0,50 — 1,00	A — 7-6
"	E	8	0,00 — 0,50	A — 6
"	"	"	0,50 — 1,00	A — 7-6
"	D	9	0,00 — 0,50	A — 6
"	"	"	0,50 — 1,00	A — 7-6
15	C	10	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7-6
"	E	11	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7-6
"	D	12	0,00 — 0,60	A — 6

Boletim de sondagem — subleito (continuação)

Estaca	Posição	Furo	Profundidade (m)	Classificação H.R.B.
15	D	12	0,60 — 1,00	A — 7—6
20	C	13	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	E	14	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	D	15	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
25	C	16	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	E	17	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	D	18	0,00 — 1,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
30	C	19	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	E	20	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	D	21	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
35	C	22	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	E	23	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	D	24	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
40	C	25	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	E	26	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	D	27	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
45	C	28	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	E	29	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	D	30	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
50	C	31	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	E	32	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6
"	D	33	0,00 — 0,60	A — 6
"	"	"	0,60 — 1,00	A — 7—6

Quadro resumo dos resultados de ensaios — subleito

Estaca	Posição	Profundidade	Classificação	Grau de compactação (%)	C.B.R.
0	C	0,00 – 0,30	A – 6	100	9
"	"	0,30 – 1,00	A – 7–6	"	4
5	"	0,00 – 0,40	A – 6	102	12
"	"	0,40 – 1,00	A – 7–6	"	3
10	"	0,00 – 0,50	A – 6	100	12
"	"	0,50 – 1,00	A – 7–6	"	5
15	"	0,00 – 0,60	A – 6	104	12
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	3
20	"	0,00 – 0,60	A – 6	103	15
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	3
25	"	0,00 – 0,60	A – 6	103	14
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	4
30	"	0,00 – 0,60	A – 6	101	12
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	5
35	"	0,00 – 0,60	A – 6	100	10
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	5
40	"	0,00 – 0,60	A – 6	105	12
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	4
45	"	0,00 – 0,60	A – 6	102	10
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	5
50	"	0,00 – 0,60	A – 6	99	15
"	"	0,60 – 1,00	A – 7–6	"	3

Os estudos de uma jazida para sub-base, cuja planta de situação consta de Fig. 4, forneceu os resultados constantes do boletim de sondagem e do quadro resumo de resultados de ensaios apresentado a seguir:

Boletim de sondagem — jazida para sub-base

Furo Nº	Profundidade (m)	Classificação (H.R.B.)
1	0,00 – 0,20	SOLO ORGÂNICO
"	0,20 – 2,00	A – 2–4
2	0,00 – 0,30	SOLO ORGÂNICO
"	0,30 – 2,00	A – 2–4
3	0,00 – 0,20	SOLO ORGÂNICO
"	0,20 – 2,00	A – 2–4
4	0,00 – 0,30	SOLO ORGÂNICO
"	0,30 – 2,00	A – 2–4
5	0,00 – 0,30	SOLO ORGÂNICO
"	0,30 – 2,00	A – 2–4
6	0,00 – 0,30	SOLO ORGÂNICO
"	0,30 – 2,00	A – 2–4
7	0,00 – 0,30	SOLO ORGÂNICO
"	0,30 – 2,00	A – 2–4
8	0,00 – 0,20	SOLO ORGÂNICO
"	0,20 – 2,00	A – 2–4
9	0,00 – 0,20	SOLO ORGÂNICO
"	0,20 – 2,00	A – 2–4

Furo Nº	Profundidade	C.B.R.
1	0,20 – 2,00	30
2	0,30 – 2,00	18
3	0,20 – 2,00	20
4	0,30 – 2,00	35
5	0,30 – 2,00	30
6	0,30 – 2,00	38
7	0,30 – 2,00	35
8	0,20 – 2,00	30
9	0,20 – 2,00	36

A base será construída com produtos de britagem.
Dimensionar o pavimento, para um valor $N = 10^7$

Solução

Análise estatística dos valores C.B.R. do subleito e sub-base e do grau de compactação do subleito

NOTA: Poderão ser adotados outros coeficientes estatísticos, desde que justificados.

Solo A-6 (Subleito) — C.B.R.

X	$\bar{X}$	$X - \bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$
9	12	3	9
12	—	0	0
12	—	0	0
12	—	0	0
15	—	3	9
14	—	2	4
12	—	0	9
10	—	2	4
12	—	0	0
10	—	2	4
15	—	3	9
133			39

$$\bar{X} = \frac{133}{11} = 12$$

$$S = \sqrt{\frac{39}{10}} = 1,98$$

$$X_{\min} = 12 - \frac{1,29 \times 1,98}{\sqrt{11}} = 11$$

C.B.R. (para projeto) = 11

Solo A-7-6 (Subleito) — C.B.R.

X	$\bar{X}$	$X - \bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$
4	4	0	0
3	—	1	1
5	—	1	1
3	—	1	1
3	—	1	1
4	—	0	0
5	—	1	1
5	—	1	1
4	—	0	0

$$\bar{X} = \frac{44}{11} = 4$$

$$S = \sqrt{\frac{8}{10}} = 0,90$$

$$X_{\min} = 4 - \frac{1,29 \times 0,90}{\sqrt{11}} = 4$$

Solo A - 7 - 6 (Subleito) - C.B.R. - Continuação

X	$\bar{X}$	$X - \bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$
5	—	1	1
3	—	1	1
44			8

C.B.R. (para projeto) = 4

Grau de compactação (Subleito)

X	$\bar{X}$	$X - \bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$
100	102	2	4
102	—	0	0
100	—	2	4
104	—	2	4
103	—	1	1
103	—	1	1
101	—	1	1
100	—	2	4
105	—	3	9
102	—	0	0
99	—	3	9
1119			37

$$\bar{X} = \frac{1119}{11} = 102$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{37}{10}} = 1,93$$

$$X_{\min} = 102 - \frac{1,29 \times 1,93}{\sqrt{11}}$$

$$= 0,68 \times 1,93 = 100$$

O grau mínimo de compactação do subleito é 100
Solo A 2-4 (jazida para sub-base - C.B.R.)

X	$\bar{X}$	$X - \bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$
30	30	0	0
18	—	12	144
20	—	10	100
35	—	5	25
30	—	0	0
38	—	8	64
35	—	5	25
30	0	0	0
36	—	6	36
272			394

$$\bar{X} = \frac{272}{9} = 30$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{394}{8}} = 7,05$$

$$X_{\min} = 30 - 2 \times \frac{1,29 \times 7,05}{\sqrt{9}} \quad 24$$

C.B.R. (para projeto) = 24

Com base nos boletins de sondagem, nos quadros resumos de ensaios e na análise estatística, são apresentados, na Fig. 5, o perfil longitudinal e as seções transversais de solos do subleito e, na Fig. 6, os perfis de solo da jazida de sub-base.

É considerando as seções transversais de solos do subleito, que será feito o dimensionamento do pavimento.

Estaca 0

A situação mais desfavorável é no bordo esquerdo, onde se dispõe, apenas de 20 cm de solo A-6, com C.B.R. = 11.

O revestimento será de concreto asfáltico com 7,5 cm de espessura e coeficiente estrutural $K_R = 2,00$

A base tem um coeficiente estrutural $K_B = 1,00$

A sub-base, tem coeficiente estrutural $K_S = 1,00$; tendo em vista o solo A-6, que será considerado como um reforço virtual, o reforço tem coeficiente estrutural $K_{Ref} = 1,00$ e C.B.R. = 11

$$H_{20} = 27 \text{ cm}$$

$$H_{11} = 41 \text{ cm}$$

$$H_4 = 73 \text{ cm}$$

$$R = 7,5 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B \geq H_{20}; 2 \times 7,5 \text{ cm} + B \geq 27 \text{ cm}; B \geq 27 \text{ cm} - 15 \text{ cm} = 12 \text{ cm}$$

$$B = 15 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S \geq H_{11}; 2 \times 7,5 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + h_{20} \geq 41 \text{ cm}.$$

$$h_{20} \geq 41 \text{ cm} - 15 \text{ cm} - 15 \text{ cm} = 11 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 15 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S + h_{11} K_{Ref} \geq H_4$$

$$2 \times 7,5 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + h_{11} \geq 73 \text{ cm}$$

$$h_{11} \geq 73 \text{ cm} - 15 \text{ cm} - 15 \text{ cm} - 15 \text{ cm} = 28 \text{ cm}$$

$$h_{11} \geq 28 \text{ cm}$$

Dispõe-se, no entanto, de apenas 20 cm do solo A-6, com C.B.R. = 11 e o cálculo da espessura da sub-base deve ser refeito, considerando-se a existência dos 20 cm de solo A-6.

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S + h_{11} K_{Ref} \geq H_4$$

$$2 \times 7,5 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + h_{20} + 20 \text{ cm} \geq 73 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 73 \text{ cm} - 50 \text{ cm} = 23 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 23 \text{ cm}$$

Estaca 5

A situação mais desfavorável é no bordo esquerdo, onde se dispõe de, apenas, 30 cm de solo A-6, quando se necessita, como foi visto, de no mínimo 38 cm.

Basta fazer o cálculo de espessura de sub-base.

$$R = 7,5 \text{ cm}$$

$$B = 15 \text{ cm}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S + h_{11} K_{Ref} \geq H_4$$

$$15 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + h_{20} + 30 \text{ cm} \geq 73 \text{ cm}$$

$$h_{20} \geq 13 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 15 \text{ cm}$$

Estaca 10 a 50

Dispõe-se de uma espessura de solo A-6 maior que necessária (28 cm), como foi calculada para a estaca 0.

Ter-se-á

$$R = 7,5 \text{ cm}$$

$$B = 15 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 15 \text{ cm}$$

Tem-se, então, as espessuras de pavimento em todas as estacas onde foi levantada uma seção transversal de solos e o problema agora é adotar uma variação de espessura do lado da segurança e tendo em vista as condições do canteiro de obra.

Organizam-se quadros como o seguinte:

Estacas	Revestimento (cm)	Base (cm)	Sub-base (cm)
0 a 5	7,5	15	23
5 a 10	7,5	15	15
10 a 50	7,5	15	15

- 10 — Acostamento — Não se dispõe de dados seguros para o dimensionamento dos acostamentos, sendo que sua espessura está, de antemão, condicionada à da pista de rolamento, podendo ser feitas reduções de espessura, praticamente, apenas na camada de revestimento. A solicitação de cargas é, no entanto, diferente e pode haver uma solução estrutural diversa da pista de rolamento.

A adoção nos acostamentos da mesma estrutura da pista de rolamento tem efeitos benéficos no comportamento desta última e simplifica os problemas de drenagem; geralmente, na parte correspondente às camadas de reforço e sub-base, adota-se, para acostamentos e pista de rolamento, a mesma solução, procedendo-se de modo idêntico para a parte correspondente à camada de base, quando o custo desta camada não é muito elevado. O revestimento dos acostamentos pode ser, sempre, de categoria inferior ao da pista de rolamento.

Quando a camada de base é de custo elevado, pode-se dar uma solução de menor custo para os acostamentos.

Algumas sugestões têm sido apontadas para a solução dos problemas aqui focalizados, como:

a) adoção, nos acostamentos, na parte correspondente à camada de base, de materiais próprios para sub-base granular de excepcional qualidade, incluindo solos modificados por cimento, cal, etc.

b) consideração, para efeito de escolha de revestimento, de um tráfego nos acostamentos da ordem de, até 1% do tráfego na pista de rolamento.

- 11 — Pavimentos por etapas — Muitas vezes, quando não se dispõe de dados seguros sobre a composição de tráfego, é conveniente a pavimentação por etapas, havendo ainda a vantagem de, ao se completar o pavimento para o período de projeto definitivo, eliminarem-se as pequenas irregularidades que podem ocorrer nos primeiros anos de vida do pavimento.

A pavimentação por etapas é especialmente recomendável quando, para a primeira etapa, pode-se adotar um tratamento superficial como revestimento, cuja espessura é, perfeitamente desprezível; na segunda etapa a espessura a acrescentar vai ser dada, muitas vezes, pela condição de espessura mínima de revestimento betuminoso a adotar.

Exemplo

Uma estrada apresenta um volume médio diário de tráfego $V_1 = 150$, com uma taxa de crescimento anual, em progressão geométrica, $t = 6\%$ e um fator de veículo $F.V. = 1,7$.

$$\text{Para um período } P = 2 \text{ anos, tem-se } V_t = 365 V_1 \times \frac{(1 + t/100)^P - 1}{t/100}$$

$$V_t = 109.000$$

$$N = V_t \times (F.V.) = 109.000 \times 1,7 = 1,86 \times 10^5$$

Para um período $P = 15$ anos, tem-se

$$N = 2,13 \times 10^6$$

Sendo 2 o C.B.R. do subleito, tem-se, para a primeira etapa, (com tratamento superficial betuminoso como revestimento), $H_2 = 87$ cm. Para a segunda etapa (em que o revestimento betuminoso mínimo deve ser 5 cm, em função de N), $H_2 = 100$ cm. A diferença é $100 - 87$ cm = 13 cm e deve ser construído, para a segunda etapa, um revestimento concreto asfáltico ($K_R = 2,00$) com 6,5 cm de espessura.

Sendo 15 o C.B.R. do subleito, tem-se para a primeira etapa, $H_{15} = 28$ cm e, para a segunda etapa, $H_{15} = 31$ cm, a diferença é 31 cm $- 28$ cm = 3 cm e deve-se construir, para a segunda etapa, um revestimento betuminoso com 5 cm de espessura.

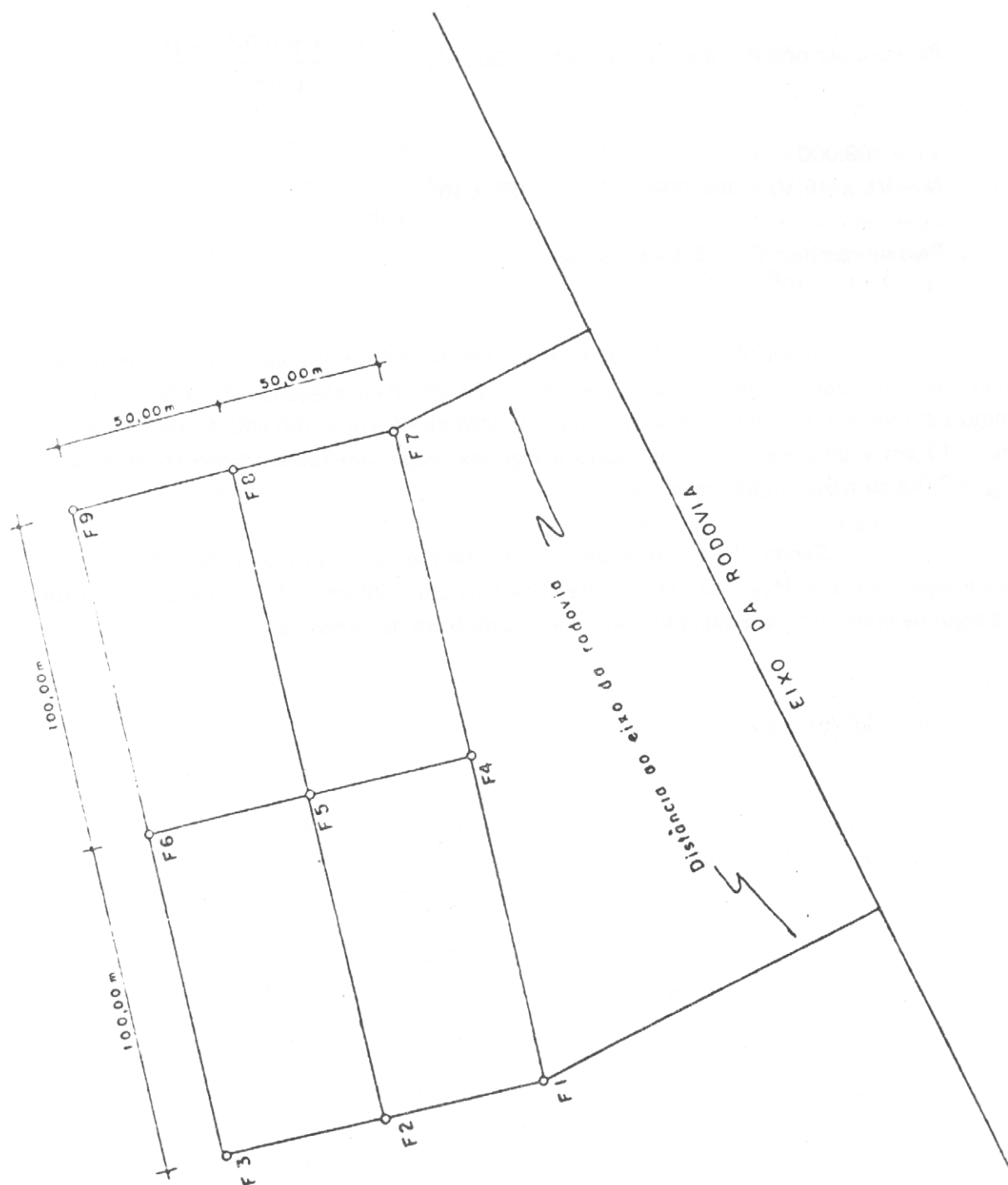
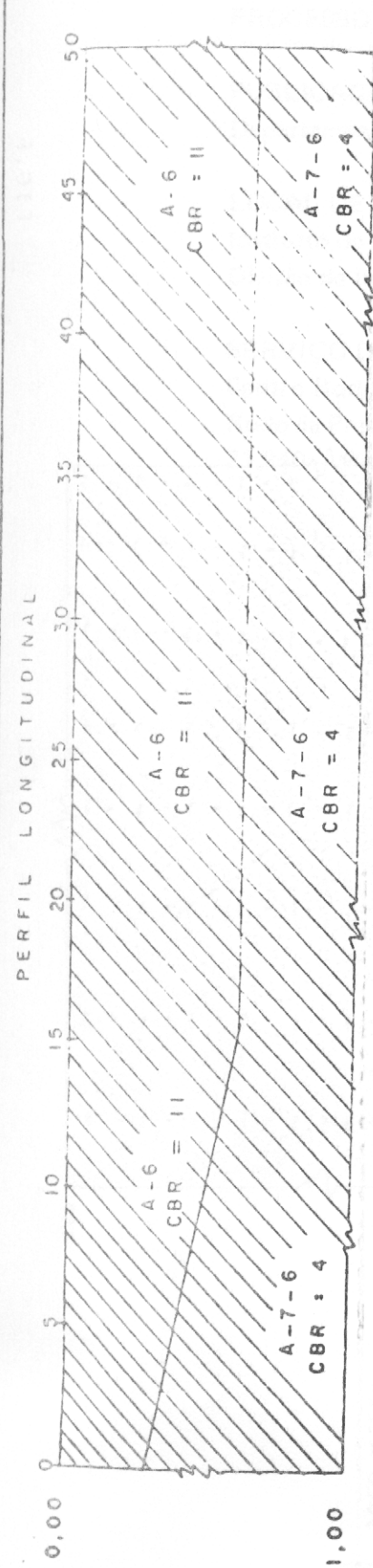
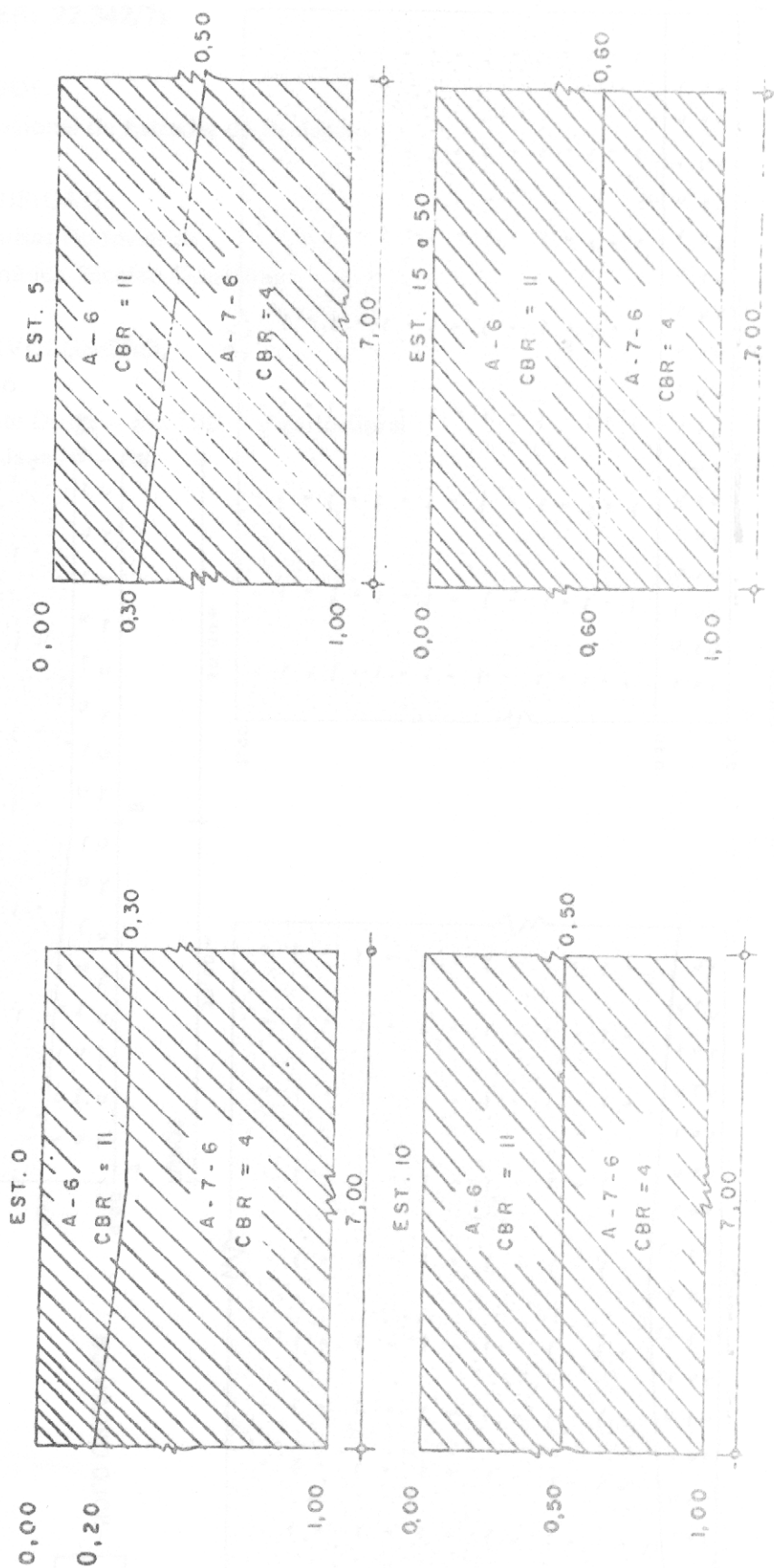


FIG. 4

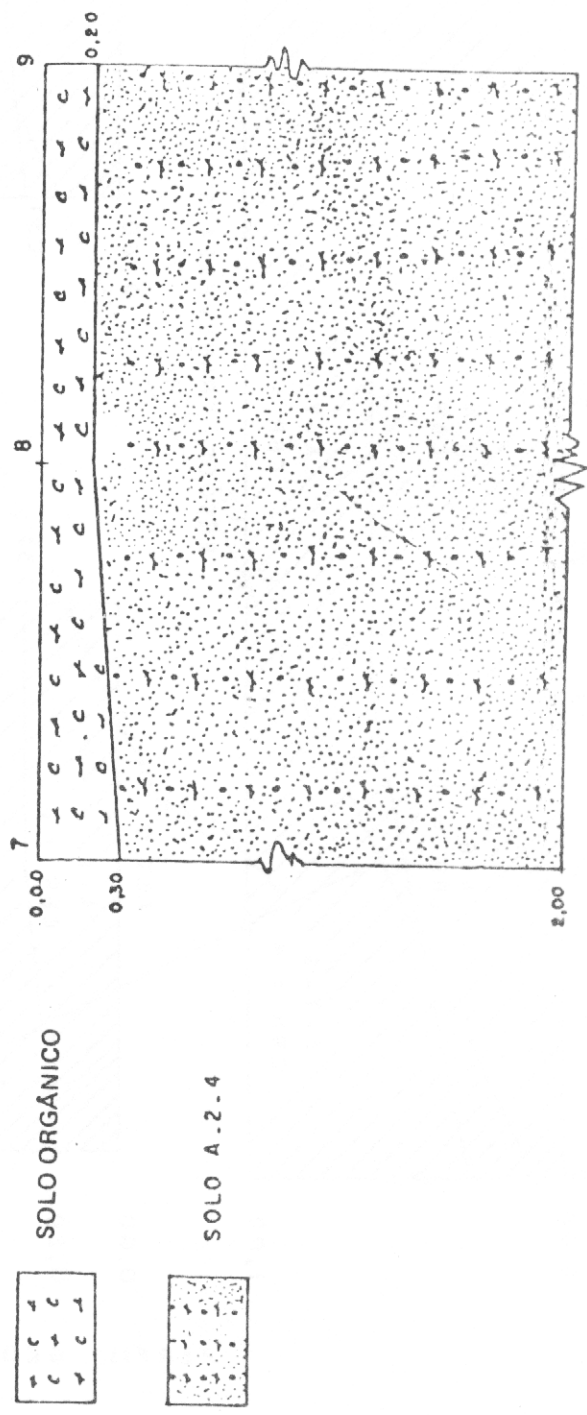
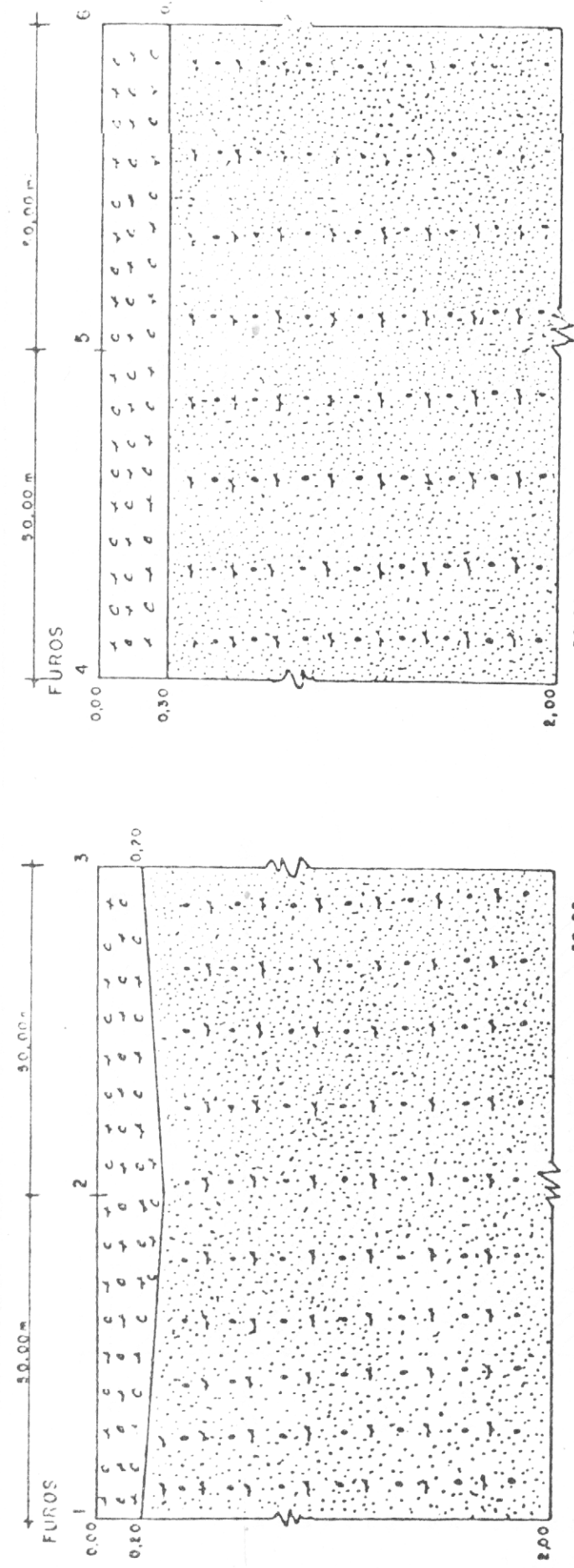


SEÇÕES TRANSVERSAIS:



PERFIL GEOTÉCNICO DA ESTRADA

FIG. 5



SOLO ORGÁNICO

SOLO A.2.4

FIG. 6

PROCESSO DNER: 22.342/79

PUBLICAÇÃO DO:

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

LOCAL DE AQUISIÇÃO:

Instituto de Pesquisas Rodoviárias

Divisão de Informática Técnico-Científica

SERVIÇO DE DIVULGAÇÃO:

Centro Rodoviário

Rodovia Presidente Dutra — km 163 — Vigário Geral

21.240 — Rio de Janeiro — RJ.