

UNIDADE VIII

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO
DE PAVIMENTO FLEXÍVEL
PELO MÉTODO DO DNER**

8. DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO DNER

A.2 – Métodos empíricos que empregam ensaios de resistência dos solos.

- **A.2.3: MÉTODO DO DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER**

Trata-se do método de dimensionamento proposto pelo Eng. Murilo Lopes de Souza, de Steelee e no que se refere ao tráfego, no trabalho “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume”, da autoria de W. J. Turnbull, C. R. Foster e R. G. Alvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U. e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO. Os dados correspondentes aos coeficientes de equivalência estrutural são baseados nos resultados do The AASTHO Road Test, levado a cabo nas proximidades de Ottawa, Estado de Lllinois, no período de 1958 a 1960.

A capacidade de Suporte do Subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo C.B.R., adotando-se o método de ensaio preconizado pelo DNER, em corpos-de-prova indeformados ou moldados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade para o serviço.

O método pode assim ser apresentado:

8.1 Subleito.

8.2 Tráfego.

8.3 Materiais das camadas (dimensionamento).

8.1 SUBLEITO

A idéia básica é adotar um **Índice Suporte - IS**, calculado com **média aritmética** de dois outros índices derivados, respectivamente, de **C.B.R. e do Índice de Grupo – IG**, à semelhança do proposto pelo Eng. William Haynes Mills, quando praticamente combinou os métodos de dimensionamento do índice de Grupo e do C.B.R. em trabalhos de pavimentação realizados no Estado do Espírito Santo, no início dos anos 50.

O Índice de Suporte IS é dado por:

$$I_s = \frac{(I_{s_{CBR}} + I_{s_{IG}})}{2}$$

Onde:

$I_{s_{CBR}}$: índice suporte derivado do CBR (numericamente é o próprio CBR),

$I_{s_{IG}}$: índice suporte derivado do índice de grupo, correspondendo praticamente a uma inversão de escala, fazendo com que solos de boa qualidade tenham os maiores valores de $I_{s_{IG}}$ (tabela 8.1).

O **C.B.R.**, que é dado em porcentagem, é **transformado em um índice**, com o **mesmo valor numérico**.

Índice de Suporte

Índice de grupo IG	Índice de Suporte $I_{s_{IG}}$
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

Tabela 8.1 - Valores de $I_{s_{IG}}$ em função de IG

Impõe-se a condição de que o Índice Suporte seja, no máximo, igual ao C.B.R., ou seja, quando o cálculo do IS resultar num índice maior que o C.B.R. (ou $I_{s_{CBR}}$), adota-se o valor do C.B.R. como Índice Suporte.

REGRA:

Se: $I_s \leq CBR \rightarrow$ usa-se o $I_{s_{CBR}}$

Se: $I_s > CBR \rightarrow$ usa-se o CBR

Exercício 01:

1. Dados: C.B.R. = 10% e IG = 9

2. Dados: IG = 1 e C.B.R. = 12%

O método admite que, nos casos de anteprojetos, podem-se tomar $IS = IS_{IG}$ quando não se dispõe dos resultados de C.B.R. dos materiais do subleito.

A **compactação** do subleito e outras camadas devem obedecer:

- Os 20 cm superiores do subleito, o reforço do subleito e a sub-base:
 - No mínimo, 100% compactação obtida no ensaio AASHTO normal;
- Compactação da base:
 - No mínimo, 100% do ensaio de AASHTO intermediário;

As misturas betuminosas devem ser dosadas utilizando-se, de preferência, o ensaio de Bruce Marshall.

Os **materiais granulares** a serem empregados no pavimento deverão obedecer:

- Materiais para **reforço do subleito**:
 - Os que apresentam um IS ou C.B.R. inferior a 20% e superior ao do subleito;
- Materiais para **sub-base**:
 - Os que apresentam um IS ou C.B.R. igual ou superior a 20%. Costuma-se chamar esta camada de H_{20} em razão dos 20%.
- Materiais de **base** os que apresentam:
 - C.B.R. $\geq 60\%$
 - Expansão $\leq 0,5\%$
 - Limite de liquidez $\leq 25\%$
 - Índice de plasticidade ≤ 6
 - Equivalente areia $\geq 20\%$.

OBS.: Caso o Limite de Liquidez seja superior a 25% e/ou o Índice de Plasticidade seja superior a 5, o material pode ser empregado em base, desde que o Equivalente areia seja superior a 30%.

Pode ser tolerado o emprego, em base, de materiais com CBR = 40% desde que haja carência de materiais e o período de projeto corresponda a um número de operações de eixo padrão igual ou inferior a 1.000.000 (10⁶).

Os materiais de **base** devem, ainda, apresentar uma das seguintes granulometrias:

TIPOS PENEIRA	I				II	
	A	B	C	D	E	F
	% em peso passando					
2"	100	100	—	—	—	—
1"		75-90	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	...	—
Nº4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25

Tabela 8.2 – Granulometrias especificadas

Fonte: Manual de pavimentação DNIT 2006

Para o cálculo do Índice Suporte do subleito usa-se ainda:

➤ **IS_{médio}**: é a média do IS_{adotado}.

$$\overline{IS} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n IS_i \right)}{n}$$

Onde:

$\sum_{i=1}^n IS_i$ → o somatório do IS_{final};
n → número de amostras.

➤ **S**: é o desvio padrão do IS_{adotado}

$$S = \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\overline{IS} - IS_i)^2 \right]}{(n-1)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

➤ **IS_{min}**: é feito um ajuste estatístico, a favor da segurança, onde é descontado um valor proporcional ao desvio padrão.

$$IS_{\min} = \overline{IS} - \left[\left(\frac{1,29}{n^{\frac{1}{2}}} \right) + 0,68 \right] * S$$

Exercício 02: Tabela entregue em aula “Dados do subleito”

Pavimentação a ser executada em um ano, entre as estacas 370 e 490 (2.400 metros).

No local a ser implantada a estrada pavimentada, foram colhidas amostras a cada 5 estacas (de 100 em 100 metros), a fim de determinar as características do subleito, obtendo-se os seguintes resultados: tabela.

Depois de ter calculado: IG, IS_{IG} , $IS_{calç}$, $IS_{adotado}$ e seu somatório, ache:

$IS_{médio} =$ _____, $S =$ _____, $IS_{min} =$ _____

8.2 TRÁFEGO

Quanto ao tráfego previsto, o pavimento é dimensionado em função do número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão N, durante o período de projeto escolhido.

O número **N** representa um **número de passadas do eixo padrão** na rodovia para um **período estimado de anos** de utilização desta rodovia (P), sendo que são considerados fatores climáticos de chuvas (FR), volume médio diário de tráfego (V_m) e fator de veículo (FV).

$$N = 365 * V_m * P * FV * FR$$

Onde:

N: número equivalente de operações de eixo padrão durante o período de projeto escolhido.

V_m : volume médio diário de tráfego no sentido mais solicitado, no ano médio do período de projeto.

P: período de projeto ou vida útil em anos (usual de 10 a 20 anos)

FV: fator de veículo

FR: fator climático regional (fator de chuva)

8.2.1 Cálculo de “ V_m ”

Para o cálculo de V_m – volume médio diário de tráfego no sentido mais solicitado, no ano do período do projeto -, é necessário adotar uma **taxa de crescimento de tráfego para o período de projeto**.

Essa taxa de crescimento deve levar em conta o crescimento histórico do tráfego da via a ser pavimentada ou, no caso de uma via nova, da contribuição das vias existentes que atendem à mesma ligação.

A esse tráfego atraído ou desviado, deve-se somar o tráfego gerado, ou seja, o tráfego que passa a existir às melhores condições oferecidas pela pavimentação.

De uma forma simplificada, podem-se admitir dois tipos de crescimento de tráfego:

8.2.1.1 *Crescimento linear;*

8.2.1.2 *Crescimento geométrico ou exponencial.*

8.2.1.1 Crescimento Linear

Chamando de V_1 o tráfego no sentido mais solicitado, no primeiro ano do período de projeto (primeiro ano de operação do pavimento) e V_p o tráfego no mesmo sentido, no último ano desse período, tem-se:

$$V_m = \frac{(V_1 + V_p)}{2}$$

Chamando **TDM₀**, o tráfego diário médio (período dos estudos e da construção), o tráfego no sentido mais solicitado será:

$$V_0 = \frac{TDM_0 * D}{100}$$

D: é a porcentagem do tráfego no sentido dominante, ou seja, no sentido mais solicitado.

Quando o tráfego se distribui de maneira uniforme (em vias de duas faixas de tráfego de direção) em ambas as direções, ou seja, **D = 50%**, tem-se:

$$V_0 = \frac{TDM_0}{2}$$

Chamando de **p** o número de anos necessários para a execução das obras de pavimentação e assim, para se atingir o primeiro ano de operação, que é o primeiro ano do período de projeto, o tráfego nesse ano será:

$$V_1 = V_0 * \left[1 + \left(p * \frac{t}{100} \right) \right]$$

t: é a taxa de crescimento linear do tráfego, em porcentagem ao ano.

O **tráfego no último ano** de período de projeto **P** será:

$$V_p = V_1 * \left[1 + \frac{t}{100} * P \right]$$

E o tráfego, no período de projeto **P**, no sentido mais solicitado, que é o volume total de tráfego nesse período e nessa direção, será:

$$V_t = 365 * V_m * P$$

V_t → o tráfego que realmente deve solicitar o pavimento, no período de projeto, no sentido mais solicitado, segundo as previsões.

Exercício 03: Seja um $TDM_0 = 800$ veículos/dia, com 60% dos veículos no sentido mais solicitado, numa via de duas faixas e duas mãos.

Sendo:

t = 5% ao ano	Taxa de crescimento linear do tráfego
P = 10 anos	Período de projeto
p = 1 ano	Tempo de execução das obras

8.2.1.2 Crescimento Geométrico

Neste caso, a curva representativa de crescimento do tráfego é uma parábola com a fórmula geral:

$$V_0 = V_1 * \left(1 + \frac{t}{100}\right)^n$$

Partindo de um tráfego V_0 , no sentido dominante, como visto no caso anterior, o tráfego no ano inicial do período de projeto será:

$$V_1 = V_0 * \left(1 + \frac{t}{100}\right)^p$$

p: o número de anos de execução do pavimento.

$$V_p = V_1 * \left(1 + \frac{t}{100}\right)^P$$

O tráfego total, no sentido dominante, no período de projeto P , será:

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

Exercício 04: Os mesmos dados do exemplo anterior levariam a:

8.2.2 Fator de veículo “FV”

FV → transforma o tráfego real que solicita o pavimento durante o período de projeto, em um tráfego equivalente de eixos padrão no mesmo período.

$$FV = FE * FC$$

OBS.: Para o **cálculo** de **FE** (fator de eixo), **FC** (fator de carga) e **FV** (fator de veículo), é necessário conhecer a **composição de tráfego**.

Para isto, é necessário fazer uma **contagem do tráfego na estrada** que se está considerando, estudando-se certo volume total do tráfego, **Vt** (para o período de amostragem). Faz-se a contagem do número total de eixos **n**, e pesam-se todos esses eixos.



FE: Fator de Eixo → Coeficiente que, multiplicado pelo volume total de tráfego comercial que solicita o pavimento durante o período de projeto, fornece a estimativa do **número de eixos que solicitam o pavimento no mesmo período**.

- ✓ É um fator que transforma o tráfego em **número de veículos padrão** no sentido dominante → em **número de passagens de eixos equivalentes**. Para tanto, calcula-se o número de eixos dos tipos de veículos que passarão pela via.
- ✓ A expressão correspondente seria:

$$FE = \left(\frac{P_2}{100}\right) * 2 + \left(\frac{P_3}{100}\right) * 3 + \dots + \left(\frac{P_n}{100}\right) * n$$

Onde:

p_2 : porcentagem de veículos de 2 eixos;

p_3 : porcentagem de veículos de 3 eixos;

p_n : porcentagem de veículos de n eixos.

$$p_2 + p_3 + \dots + p_n = 100\%$$

- ✓ Quando houver deficiência ou falta de dados, é proposto adotar o valor $FE = 2,07$.

Exercício 05: Para um projeto em que se prevê 60% dos veículos com dois eixos e os outros 40% com três eixos, o fator de eixo será:



FC: Fator de Carga → Coeficiente que, multiplicado pelo número de eixos que solicitam o pavimento durante o período de projeto, fornece o **número equivalente de operações do eixo simples padrão**.

O cálculo do fator de carga baseia-se no conceito de equivalência de operação, mais especificamente no fator de equivalência de operações (f):

- ✓ **Fator de equivalência de operações** é um número que relaciona o efeito de uma passagem de qualquer tipo de veículo sobre o pavimento com o feito provocado pela passagem de um veículo considerado padrão. Assim, por exemplo, quando o fator de equivalência de operações é igual a 9, deve-se interpretar como um veículo cuja passagem representa o mesmo efeito que nove passagens do veículo padrão; um veículo com um fator de equivalência de operações igual a 0,2 deve ser interpretado como a necessidade de cinco passagens desse veículo para equivaler a uma passagem do veículo padrão.

- ✓ No método, o **veículo padrão** adotado é o veículo americano de **18.000 libras por eixo simples de roda dupla** – ESRD – ou seja, 9.000 libras como carga de roda. Todos os veículos previstos em projeto para circular pela via serão relacionados com o veículo padrão, para se obter um tráfego representado por um número de passagens desse veículo padrão, passando tantas vezes quanto o necessário para reproduzir o efeito do tráfego diversificado que realmente vai passar pela via no período de projeto.
- ✓ Sendo o veículo padrão de 18.000 libras por eixo simples, ou seja, $8,172 \approx 8,2$ tf por eixo **simples**, veículos com carga por eixo simples superior a 8,2 tf terão fator de equivalência de operações maior que a unidade; inversamente, veículos com carga por eixo simples inferior a 8,2 tf terão fator de equivalência menor que a unidade.
- ✓ Multiplicando-se os valores do **fator de equivalência** pelo **número de veículos por dia**, com uma determinada **carga por eixo**, obtém-se a **equivalência**, para esse tipo de veículo, no período considerado, geralmente em veículos por dia. A soma desses produtos referentes a todos os veículos que trafegarão pela via dá a **equivalência de operações** entre esses dois tráfegos: o tráfego em termos de veículo padrão e tráfego real.
- ✓ Os valores do fator de **equivalência de operações** são apresentados em dois ábacos, na escala logarítmica, que se destinam a fornecer as equivalências para eixos simples e eixos em tandem.
- ✓ As cargas por eixo inferior a 4 toneladas praticamente não influem no resultado final, o que pode ser interpretado como considerar-se apenas **veículos comerciais** para o cálculo do **Fator de Carga**, desprezando-se, entre outros, todos os veículos de passageiros.

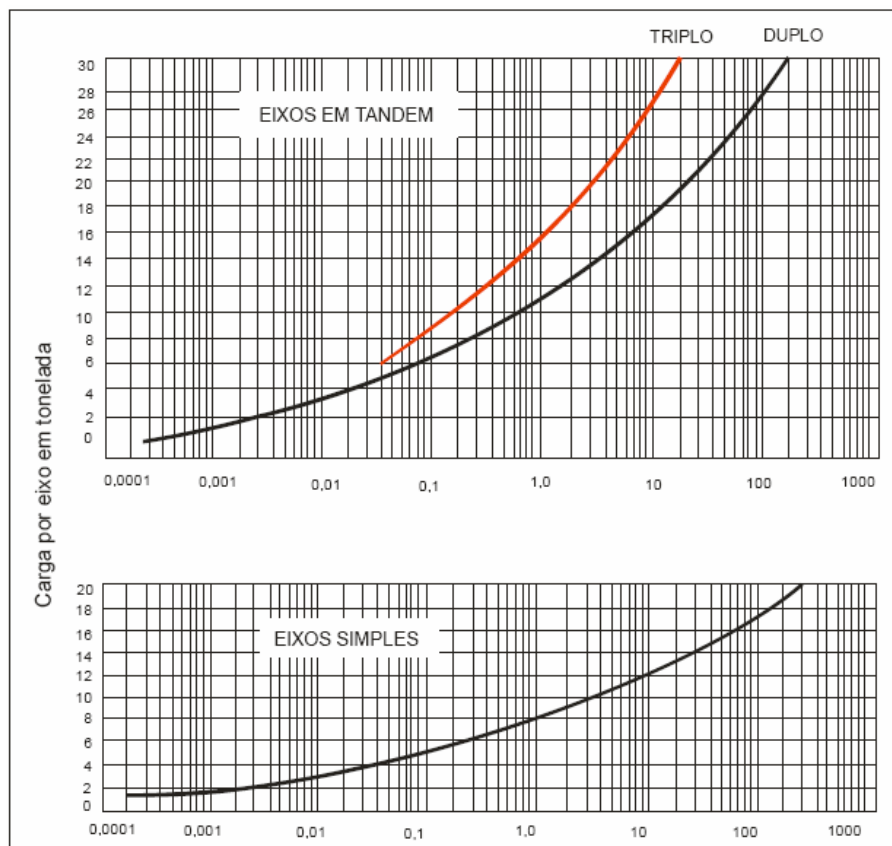


Figura 8.2 – Determinação do Fator de Operação (Fonte: Manual de pavimentação DNIT 2006)

Eixo simples Carga por eixo (tf)	Fator de equivalência estrutural (f)	Eixo em tandem Carga por eixo (tf)	Fator de equivalência estrutural (f)
1	0,0004	1	0,001
2	0,004	2	0,002
3	0,020	3	0,005
4	0,050	4	0,010
5	0,100	5	0,020
6	0,200	6	0,060
7	0,500	7	0,100
8	1,000	8	0,200
9	2,000	9	0,400
10	3,000	10	0,600
11	6,000	11	0,700
12	9,000	12	1,300
13	15,000	13	2,000
14	25,000	14	3,100
15	40,000	15	4,000
16	50,000	16	6,000
17	80,000	17	7,000
18	110,000	18	10,000
19	200,000	19	15,000
20	260,000	20	20,000
		21	30,000
		22	35,000
		23	45,000
		24	55,000
		25	70,000
		26	80,000
		27	100,000
		28	130,000
		29	160,000
		30	190,000

Tabela 8.3 – Fatores de equivalência de operações - f

Exercício 06: Calcule FV (fator de veículo):

Dados do tráfego:

Eixos simples (ton)	Nº de eixos	%	Tabela ou ábaco	
			Fator de equivalência (f)	% x f
			Fator de equivalência (f)	Equivalência de operações
< 5	2	72		
5	2	7		
7	2	3		
9	2	7		
11	3	5		
13	3	4		
15	3	1		
Eixos Tandem				
19	2	1		
		100%	100 (FC) =	

No exercício 06, o tráfego foi dado em percentagem para cada tipo de veículo. A utilização dos dados de tráfego em **veículos por dia** não implica nenhuma dificuldade.

Exercício 07: Calcule FV (fator de veículo), sabendo que $FC = (\Sigma \text{equiv.oper.}) / \Sigma VDM_i$

Dados do tráfego:

Eixos simples (tf)	Nº de eixos	VDM _i (veíc./dia)	Tabela ou ábaco	
			Fator de equivalência (f)	VDM x f
			Fator de equivalência (f)	Equivalência de operações
4	2	540		
6	2	280		
8	2	98		
10	3	67		
12	3	34		
14	4	22		
VDM (veíc./dia) =		1.041	-----	

8.2.2.1 Cálculo do FV utilizando dados obtidos por uma balança de controle de carga e as combinações permissíveis do tipo de eixo de cada veículo

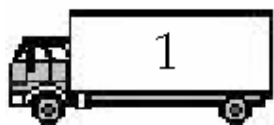
Também são utilizados, para calcular o Fator de Veículos FV, os dados obtidos por uma **balança de controle de carga**.

Através dos cálculos utilizando fatores de eixo, é possível determinar o volume de tráfego médio diário, que, juntamente com a determinação de outros fatores, possibilita o dimensionamento do tipo de material mais indicado e da espessura de cada camada de pavimento.

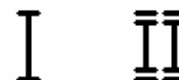
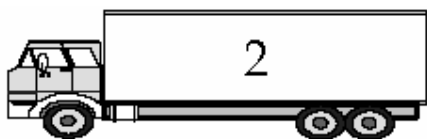
Quando calculados os **fatores de eixos** para **cada tipo de veículo** e multiplicado pela sua porcentagem respectiva, é possível chegar-se ao **fator de veículo** que é apresentado na tabela do próximo exemplo.

Cada veículo possui características próprias, como o tipo de eixos, que podem ser de rodas simples e duplas, tandem duplos e triplos, sendo que para cada tipo de eixo corresponde um fator, relacionado a um eixo padrão de 8,2t.

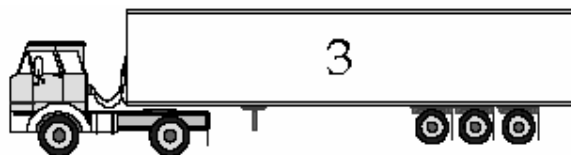
ESRS	Eixo Simples Roda Simples	6t
ESRD	Eixo Simples Roda Dupla	10t
ETD	Eixo TANDEM Duplo	17t
ETT	Eixo TANDEM Triplo	25,5t



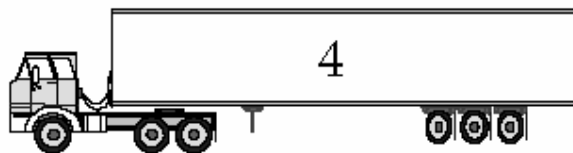
ESRS 6t ESRD 10t = 16t



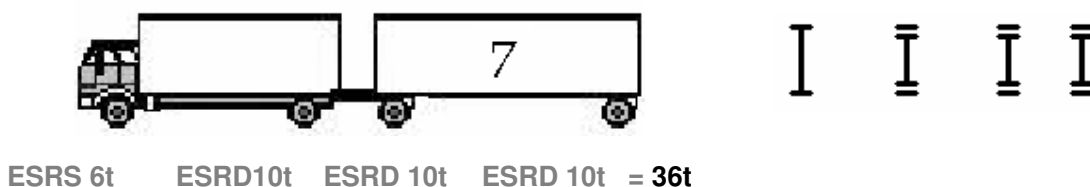
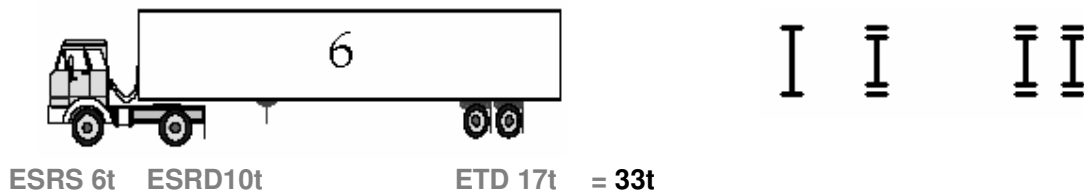
ESRS 6t ETD 17t = 23t



ESRS 6t ESRD 10t ETT 25,5t = 41,5t



ESRS 6t ETD 17t ETT 25,5t = 48,5t



Exemplo:

Dos dados da contagem, extraímos os tipos de veículos e a quantidade em que passavam pelo trecho.

Calculamos o fator de veículo para cada tipo, o volume médio diário dos mesmos, para posteriormente calcularmos o fator de veículos e o “N” do projeto.

FV → É o índice que transforma a passagem dos veículos em números equivalentes de eixo padrão.

Para isso, tem-se a carga por eixo dos veículos e entra-se na tabela de fator de carga para verificar sua equivalência.

CONTAGEM

Fatores de Equivalência de Operação							
1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
Tipo de veículo	Quant.	%	ESRS	ESRD	ETD	ETT	
	1	1,39	0,2	4			0,058
	10	13,89	0,2		7		1,000
	29	40,28	0,2	4		8,94	5,212
	2	2,78	0,2		7	8,94	0,443
	27	37,50	0,2		3x7 21		7,950
	2	2,78	0,2	4	7		0,306
	1	1,39	0,2	3x4 12			0,169
Total	72	100				FV =	15,138

3ª Coluna: % → (100 / total veículos) x quantidade do tipo

$$\text{Tipo 1: \% = (100/72) * 1 = 1,39}$$

8ª Coluna: (ESRS + ESRD + ETD + ETT) x (% / 100) = última coluna

$$\text{Tipo 1: (0,2 + 4) * (1,39 / 100) = 0,058}$$

8.2.3 Fator Climático Regional (Fator de Chuva) “FR”

Fator Climático Regional → ou Fator de Chuva, as variações de umidade dos materiais do pavimento durante o ano afetam a capacidade de suporte.

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 desses materiais -, o número equivalente de operações do eixo tomado como referência ou padrão, que é um parâmetro de tráfego – deve ser multiplicado por um coeficiente (FR) que varia de 0,2 – ocasiões em que prevalecem baixos teores de umidade – a 5,0 – ocasiões em que os materiais estão praticamente saturados.

São sugeridos para o Brasil os seguintes fatores climáticos regionais, em função da altura média anual de chuva em mm:

Altura média anual de chuva (mm)	Fator climático Regional (FR)
Até 800	0,7
De 800 a 1.500	1,4
Mais 1.500	1,8

Tabela 8.4 – Fator Climático - FR

Havendo falta de dados, podem-se adotar valores médios a serem estabelecidos por região.

Calculados V_m (volume médio diário de tráfego no sentido mais solicitado, no ano do período do projeto), FC (fator de carga), FE (fator de eixo) e FR (fator climático regional), calcula-se a **equivalência de operações**, o número N , pela expressão já vista:

$$N = 365 * V_m * P * FC * FE * FR$$

$$\text{Mas } \rightarrow V_t = 365 * V_m * P \quad \text{e} \quad FV = FC * FE$$

$$\text{Então } \rightarrow N = V_t * FV * FR$$

Exercício 08: Usando os valores do exercício 06, calcular a equivalência de operações (N), admitindo $FR = 1$ e o valor de $V_t = 2,3 \times 10^6$:

Exercício 09: Continuação do exercício 02:

Dados do tráfego: trata-se de uma via simples de duas faixas de tráfego com duas mãos de direção (2f2m) com $TDM_0 = 1.100$ veículos/dia;

Eixo simples (tonel.)	Número de eixos	TDM ₀ x %		Ábaco ou tabela	f x VDM _i
		%	VDM _i (veic./dia)	Fator de equivalência (f)	Equivalência de operações
< 5 (média 2,4)	2	50	550	0,004	2,20
6	2	18	198	0,2	39,60
8	3	8	88	1,0	88,00
12	3	6	66	9,0	594,00
15	3	1	11	40,0	440,00
Tandem					
9	2	10	110	0,4	44,00
15	2	4	44	4,0	176,00
17	2	3	33	7,0	231,00
Σ		100%	1100	-----	1614,80

Os dados do tráfego indicam uma predominância de veículos de carga por eixos simples inferiores à do eixo padrão (18.000 lb ou 8,2 tf/eixo simples) e, conseqüentemente, de veículos de dois eixos;

Serão adotados:

Período de projeto = 10 anos, Taxa de crescimento do tráfego = 5% ao ano (linear) e Fator climático regional = 1.

Calcular V_t , completar a tabela de composição do tráfego para calcular FC, FE e, conseqüentemente, FV. E, por fim, calcular a equivalência de operações – N.

8.3 DIMENSIONAMENTO

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNER é um método empírico derivado do método CBR.

Dimensionamento: compatibilizar carga com o suporte de carregamento do subleito.
Carga: são dinâmicas → número de passagens de eixos.
Eixos: a passagem dos eixos provoca deformações, que são recuperáveis na vida útil do pavimento.
A repetição das deformações leva a FADIGA e RUPTURA.
Para cada veículo tipo (para cada eixo) calcula-se o fator de veículo (corrige o valor do veículo para um eixo padrão).

8.3.1 Ábaco de dimensionamento

Dispondo dos Índices Suporte, do subleito, do reforço do subleito e da sub-base, pode-se obter, através do ábaco de dimensionamento, em primeira aproximação, as espessuras necessárias, respectivamente, **acima** dessas camadas.

A simbologia a ser adotada é:

Subleito: $IS = m$; Reforço do subleito: $IS = n$ e Sub-base: $IS = 20$.

O ábaco dará as espessuras necessárias cima dessas camadas, sem levar em conta a qualidade dos materiais que irão compor o pavimento. Admite-se que todos os materiais das camadas são iguais quanto ao comportamento estrutural, correspondente a um coeficiente de equivalência $K = 1$, a ser definido a seguir:

Então se tem:

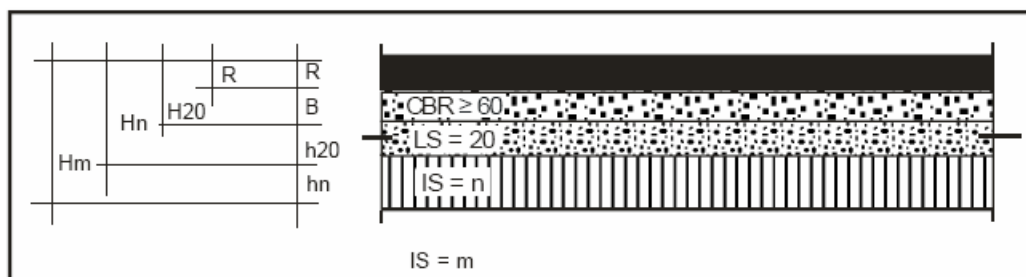


Figura 8.3 – Simbologia das camadas

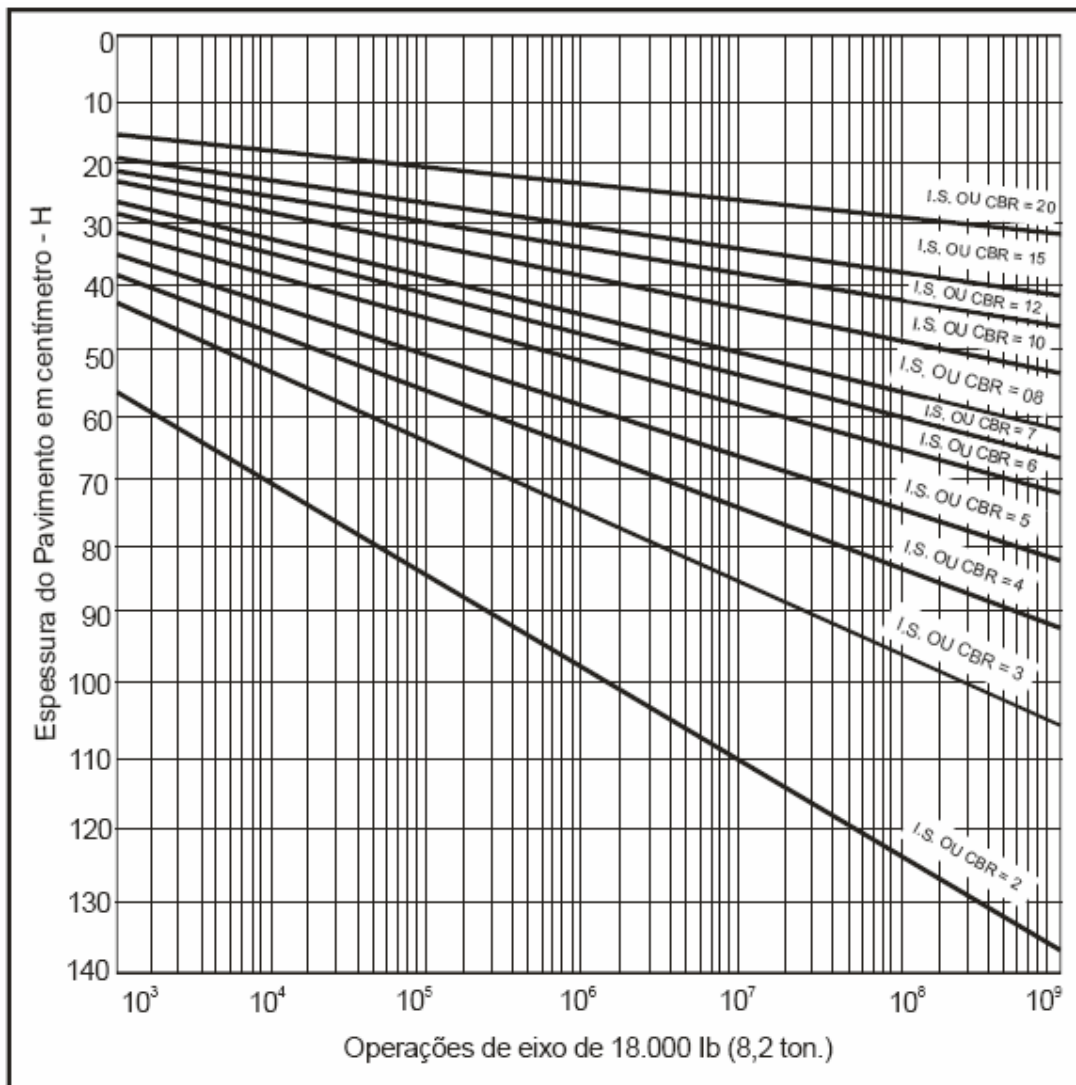


Figura 8.4 – Ábaco para o dimensionamento

⇒ Subleito: IS = m Tráfego: N → ábaco → H_m

H_m é a espessura total do pavimento para materiais de $k = 1$.

⇒ Reforço do Subleito: IS = n Tráfego: N → ábaco → H_n

H_n é a espessura necessária de pavimento acima do reforço, ou seja, sub-base + base + revestimento, para materiais de $k = 1$.

⇒ Sub-base: IS = 20 Tráfego: N → ábaco → H_{20}

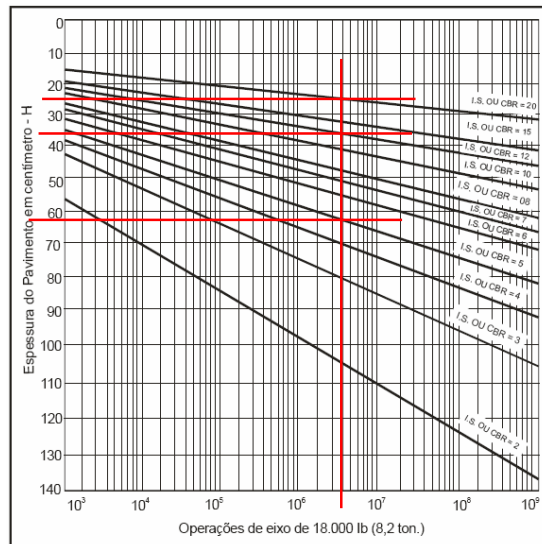
H_{20} é a espessura necessária de pavimento acima da sub-base, ou seja, base + revestimento, para materiais de $k = 1$. O material de sub-base deve ter um índice Suporte ou CBR mínimo de 20.

8.3.1.1 Uso do ábaco de dimensionamento

Traça-se a vertical pelo valor encontrado de N (equivalência de operações). No cruzamento com os segmentos inclinados correspondentes aos valores de IS ou CBR, determina-se:

- No cruzamento com IS = m → H_m
- No cruzamento com IS = n → H_n
- No cruzamento com IS = 20 → H₂₀

Exercício 10: Para um subleito de IS = 5 e dispondo-se de material de reforço de IS = 12, determinar os valores de H_m, H_n e H₂₀ para N = 3,0 x 10⁶.



8.3.2 Materiais das camadas. Coeficiente de equivalência estrutural - k

Neste método de dimensionamento de pavimentos, a hierarquia dos materiais que vão compor as camadas é determinada adotando-se um MATERIAL PADRÃO, a base granular, e **comparando-se** os outros materiais com esse padrão em termos de comportamento estrutural.

Assim, chama-se **Coeficiente de Equivalência Estrutural** um número que relaciona a espessura necessária da camada, constituída de material padrão, com a espessura equivalente do material que realmente vai compor essa camada.

$$h_p = k_i * h_i$$

Sendo:

h_p: espessura equivalente a h_i, de material padrão;

h_i = espessura do material que vai compor a camada e

k_i = coeficiente de equivalência do material i.

Por exemplo: quando se diz que o coeficiente de equivalência estrutural da base de solo-cimento com resistência à compressão, após sete dias de cura, é $k_B = 1,4$, deve ser interpretado → 10 cm da base de solo-cimento têm o mesmo comportamento estrutural que 14 cm ($14 = 10 \times 1,4$) da base granular que é o material padrão de $k = 1$.

A Tabela 8.5 mostra os valores do coeficiente de equivalência estrutural para alguns materiais de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito.

Componentes dos pavimentos	Coefficiente 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 por penetração	1,20
Base granular	1,00
Sub-base granular	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento (resistência à compressão em 7 dias > 45kgf/cm ²)	1,70
Idem (resistência à compressão em 7 dias entre 45kgf/cm ² e 35kgf/cm ²)	1,40
Idem (resistência à compressão a 7 dias inferior 35kgf/cm ²)	1,00

Tabela 8.5 – Coeficiente de equivalência estrutural – k
 Fonte: Manual de Técnicas de Pavimentação – Wlastermiler de Senço

O coeficiente de equivalência estrutural do **reforço do subleito** ou da **sub-base granular** deverá ser **1,0** toda vez que o CBR do material de um ou outro for igual ou superior a três vezes o do subleito.

Componentes do pavimento	Coefficiente 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 à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Tabela 8.6 – Coeficiente de equivalência estrutural – k
 Fonte: Manual de Pavimentação – DNIT 2006

Pesquisas futuras podem justificar mudanças nestes coeficientes.

8.3.3 Cálculo das espessuras das camadas

Para o cálculo das espessuras das camadas, são adotados os símbolos mostrados na Tabela 8.7.

Camada	Espessura (cm)	Coefficiente de equivalência estrutural (K)
Revestimento	R	K_R
Base	B	K_B
Sub-base	h_{20}	K_S
Reforço do subleito	h_n	K_{Ref} ou K_n

Tabela 8.7 - Símbolos das camadas

Em relação ao material padrão, de $k = 1$, as equivalências das camadas são:

$R \times K_R$ = espessura equivalente do revestimento;
 $B \times K_B$ = espessura equivalente da base;
 $h_{20} \times K_S$ = espessura equivalente da sub-base e
 $h_n \times K_{ref}$ ou $h_n \times K_n$ = espessura equivalente do reforço do subleito.

Monta-se então o sistema de inequações:

$$R \cdot k_R + B \cdot K_B \geq H_{20}$$

$$R \cdot k_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S \geq H_n$$

$$R \cdot k_R + B \cdot K_B + h_{20} \cdot K_S + h_n \cdot K_{ref} \geq H_m$$

Verifica-se a existência de quatro incógnitas: R, B, h_{20} e h_n , e apenas três equações. A indefinição é contornada dotando-se a espessura do revestimento em função da equivalência de operações N.

Em função do número equivalente “N” de operações do eixo padrão, o tipo e espessura são dados conforme a tabela a seguir:

N	R_{min} (cm)	Tipo de revestimento
Até 10^6	2,5 - 3,0	Tratamento Superficial
10^6 a 5×10^6	5	Revestimento Betuminoso
5×10^6 a 10^7	5	Concreto betuminoso
10^7 a 5×10^7	7,5	Concreto betuminoso
Mais de 5×10^7	10	Concreto betuminoso

Tabela 8.8 – Valores de R em função de N

Exemplo de dimensionamento:

Dimensionar o pavimento para uma estrada para a qual se prevê $N = 10^3$ – já levado em conta FR - sabendo-se que o subleito apresenta um $IS = 2$, e que se dispõe de material para reforço do subleito com $IS = 12$ e material para sub-base. Adotar concreto betuminoso como revestimento.

Dos ábacos e do problema, tira-se:

Subleito:	$IS = 2 = m$	$H_m = 56$ cm (reforço+ sub-base + base + revestimento)	
Reforço:	$IS = 12 = n$	$H_n = 21$ cm (sub-base + base + revestimento)	$K_{ref}=0,71$
Sub-base:	$IS = 20$	$H_{20} = 16$ cm (base + revestimento)	$K_S=0,77$
Base:		$K_B=1,00$	
Revestimento:	$R = 5$ cm	$K_R=2,00$	

- A espessura da base:

$$R \times K_R + B \times K_B = H_{20}$$
$$5 \times 2,00 + B \times 1,00 = 16 \quad 10 + B = 16 \quad B = 6\text{cm}$$

A espessura mínima de base e camadas inferiores, sempre que possível, é de 10 cm.

Então: **$B = 10$ cm (base)**

- A espessura da sub-base:

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S = H_n$$
$$5 \times 2,00 + 10 \times 1,00 + h_{20} \times 0,77 = 21$$
$$10 + 10 + 0,77 h_{20} = 21 \quad 0,77 h_{20} = 1 \quad h_{20} = 1,30$$

A espessura mínima de base e camadas inferiores, sempre que possível, é de 10 cm.

Então: **$h_{20} = 10$ cm (sub-base)**

- A espessura do reforço:

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{ref} = H_m$$
$$5 \times 2,00 + 10 \times 1,00 + 10 \times 0,77 + h_n \times 0,71 = 56$$
$$10 + 10 + 7,7 + 0,71 h_n = 56 \quad 0,71 h_n = 28,30 \quad h_n = 39,86 \rightarrow h_n = 40\text{cm (reforço)}$$

Espessura final: $H = R + B + h_{20} + h_n$

$$H = 5 + 10 + 10 + 40 \quad H = 65 \text{ cm}$$

Exercício 11: Dimensionar o pavimento para uma estrada em que $N = 10^6$ (já incluído FR), sabendo-se que o subleito apresenta um $IS = 8$, dispõe-se de material para sub-base e base.

1ª Solução: Adotar o concreto betuminoso como revestimento.

2ª Solução: Adotar concreto betuminoso como revestimento e base granular com 20 cm de espessura.

3ª Solução: Adotar revestimento e base de concreto betuminoso.

Exercício 12: Continuação do exercício 09:

Para a camada de	Jazida	Distância ao CG do trecho (km)	CBR (%)	IG	Expansão (%)	IS
Reforço	1 R	10	13	8	0,8	10
Reforço	2 R	15	18	4	0,5	15
Sub-base	S B	20	20	0	0,4	20

Pede-se:

* O dimensionamento do pavimento para base de macadame betuminoso e para base de solo-cimento de resistência à compressão a 7 dias, de 48 kgf/cm². O teor de cimento considerado ótimo é de 8%, em volume.

Camada	Alternativa			
	I	II	III	IV
	Macadame Betuminoso		Solo-cimento	
	Jazida 1 R	Jazida 2 R	Jazida 1 R	Jazida 2 R
Revestimento				
Base				
Sub-base				
Reforço				
TOTAL	cm	cm	cm	cm

As larguras das camadas deverão ser:

Revestimento = 7m, Base = 8m, Sub-base (se houver) = 9m e Reforço (se houver) = 10m.

- O consumo por km de camada acabada (m³).

Camada	I	II	III	IV
	Macadame Betuminoso		Solo-cimento	
	Jazida 1 R	Jazida 2 R	Jazida 1 R	Jazida 2 R
Revestimento				
Base				
Sub-base				
Reforço				

