

## **TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA**

Movimento de Terra e Pavimentação

### **NOTAS DE AULA - Pavimentação I**

Prof. Dr. Edson de Moura

Aula 06 - Dimensionamento de Pavimento Flexível

Método do DNER

## DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO PELO CBR

(texto extraído do livro Pavimentação Asfáltica, materiais, projeto e restauração, José Tadeu Balbo, 2007)

### 1 - Histórico

Uma estrutura de um dado pavimento deve suportar as cargas oriundas do tráfego, nas condições climáticas locais, de maneira a oferecer o desempenho desejável para as suas funções de conforto ao rolamento e segurança ao usuário.

Devido ao baixo número de veículos associado a baixa carga por eixo que solicitavam as vias no passado, inúmeros métodos de dimensionamento eram utilizados por engenheiros, de maneira relativamente fácil. Esses métodos trazem consigo certo grau de empirismo juntamente com experiência adquiridas pelos diversos órgãos rodoviários ao longo dos anos.

### 2 - Critério do CBR

Segundo Ahlvin (1991), atribui-se o desenvolvimento do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo uso do CBR ao engenheiro O.J.Porter do Departamento de Estradas da Califórnia - *California Division Highways* - (CDH), na década de 20. O critério básico utilizado é o de camadas granulares sobre o subleito de maneira a proteger esse de ruptura por cisalhamento. O método consiste basicamente em se obter a espessura da camada granular sobre o subleito conhecendo-se o CBR do subleito. Foram estudados diversos pavimentos que apresentavam tanto sucessos como insucesso, principalmente no que se refere a formação de deformação permanente em trilha de roda e como resultado foi possível traçar um modelo denominado de CURVA B, assim, foi determinada a primeira curva de dimensionamento de pavimento.

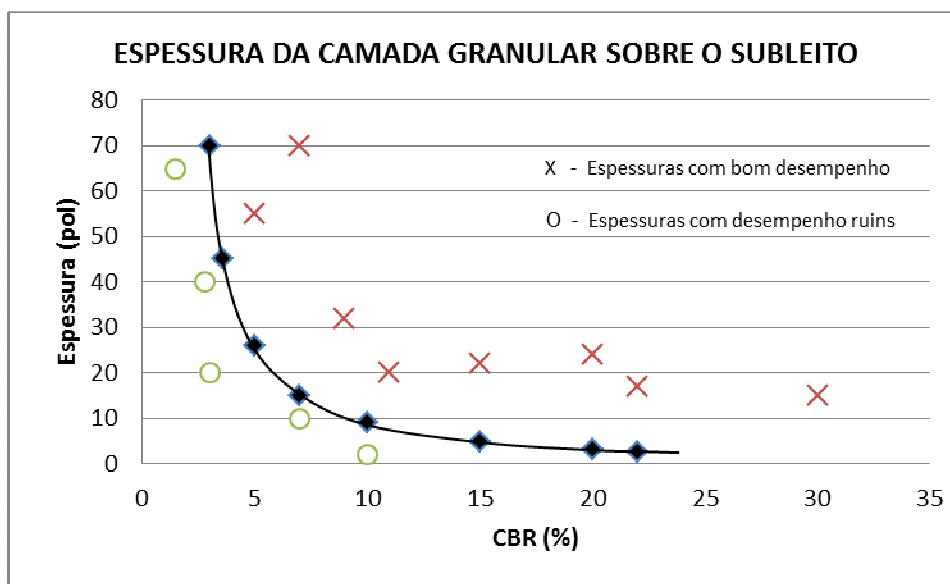


Figura 01 - Espessura da camada granular sobre o subleito em função do CBR - CURVA - B

Esse método foi baseado em correlações empíricas, entretanto, ainda em nossos dias é bastante difundido, como é o caso de uma variante, o método do extinto DNER, atual DNIT, critério normativo oficial para projetos de pavimentos flexíveis.

O CBR - *Califórnia Bearing Ratio*, é a relação de resistência à penetração de um pistão de 2" entre o solo propriamente dito e um corpo-de-prova de brita graduada, esse com valor correspondente a 100%. Observe-se que a brita graduada tomada com referência era o tipo de material utilizado em camadas de pavimentos que apresentavam um bom desempenho nos pavimentos característica Califórnia.

Com a chegada do engenheiro Hveen na direção do Departamento de Estradas da Califórnia, o método de dimensionamento do CBR foi arquivado, pois esse acreditava somente na coesão dos materiais como medida de resistência dos materiais.

### 3 - USACE

Com o advento da II Guerra Mundial houve a necessidade de se projetar pavimentos em pistas de aeroportos com capacidade de suportar cargas elevadas de aeronaves, principalmente nas ilhas do pacífico. O critério deveria ser de fácil assimilação, rápido e eficiente, condições que a ocasião impunha.

Baseado no mesmo princípio adotado por Porter na década de 20 na Califórnia, o USACE na década de 40 estabeleceu curvas de dimensionamento de pavimentos para cargas de 12.000 lbs, de trens de pouso individuais de aeronaves pesadas.

O critério de Porter era empírico através de observações de campo em pavimentos que apresentavam tanto sucesso como insucessos. Já a extrapolação adotada pelo USACE para cargas superiores implicou na associação do conhecimento das tensões de cisalhamento calculadas em função da profundidade do meio elástico, conforme estabelecido por Boussinesq. Para as condições de Boussinesq o meio elástico deve ser isotrópico, homogêneo e linear. Assim, foi possível se obter curvas de dimensionamento para diversos tipos de cargas, desde 12.000 lbs até 70.000 lbs. Constam na figura 02 a curva B obtida por observações em campo por Porter na década de 20 dos pavimentos californianos e a curva A obtida através dos conceitos de elasticidade.

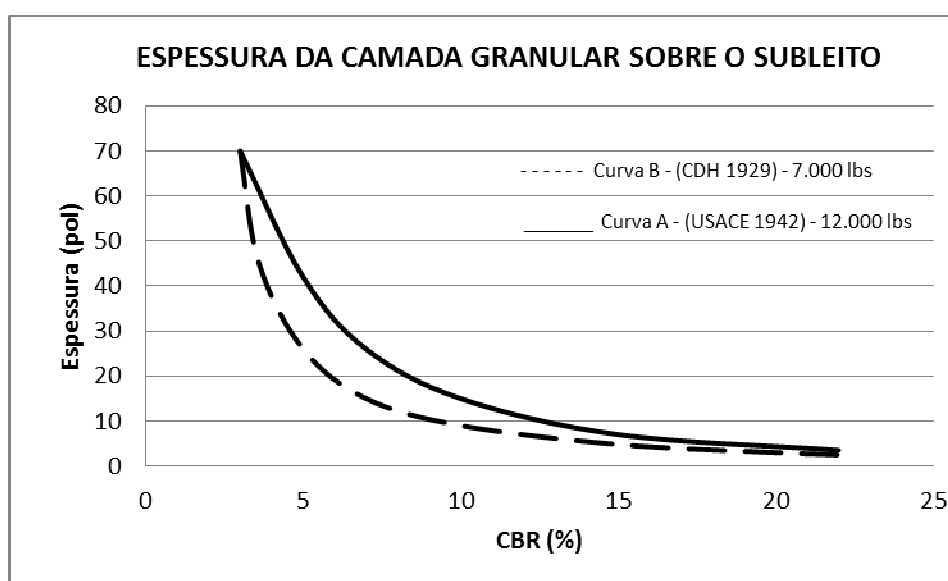


Figura 02 - Espessura da camada granular sobre o subleito em função do CBR - Curvas A e B

#### 4 - Espessura X CBR

O USACE em 1956 apresentou a 1ª. equação 1 de dimensionamento de espessuras de pavimento em função do valor de CBR da camada inferior que correlaciona a espessura necessária de material sobre o subleito, levando-se em conta o CBR do solo de fundação, a carga de roda e a pressão de contato (pressão da roda equivalente). A equação só seria válida para valores de CBR não superiores 12% (faixa de observação empírica).

$$t = \sqrt{P \left( \frac{1}{8,1CBR} - \frac{1}{p_e \pi} \right)} \quad (1)$$

Onde:  $t$  = espessura de material granular sobre o subleito  
 $P$  = carga de simples equivalente  
 $p_e$  = pressão de contato

#### 5 - Critério de Cobertura utilizado pelo USACE

Porter na década de 20 utilizou o critério empírico de observação de campo para estabelecer o método de espessuras em função do CBR. Já o USACE monitorou a degradação de pavimentos de aeroportos militares e civis, verificou que as curvas de dimensionamento originais eram suficientes para determinar as espessuras de pavimentos necessárias para a passagem de aproximadamente 5.000 coberturas (C) de aeronaves na época, sem a formação de deformação permanente em trilha de roda importantes.

Yoder e Wictzak (1975) apresentam a fórmula (2) enunciada por Turnbull et al. (1962) que corrige a espessura em função de um número de coberturas diferente de 5.000, considerado no método original do USACE.

$$\%t = 0,144 + 0,231 * \log C \quad (2)$$

##### 5.1 - Conceito de cobertura

O estudo acima exposto considerou 5.000 coberturas, ou seja, nos pousos e decolagens de aeronaves a área que ocorrem os toques, são necessários cerca de 5.000 ocorrência para que toda a área seja solicitada pelo menos uma vez.

Souza (1978), mostra que trazendo para uma rodovia o conceito de coberturas estipulado pelo USACE, o número de 5.000 coberturas em aeroportos equivale a 13.200 coberturas para uma dada rodovia. Existe uma relação de 2,64 vezes considerado um ESRD.

Observe-se que esse número impôs ao método do USACE um conceito de durabilidade de um dado pavimento atrelado a um número relativamente pequeno de cobertura. Assim, o dimensionamento de pavimentos pelo método do CBR tende a super-dimensionar pavimentos de baixo volume de tráfego e sub-dimensiona pavimentos com elevado volume de tráfego, por conta do conceito de coberturas adotado.

## 6 - Coeficiente de equivalência Estrutural

Coeficiente de equivalência estrutural de um material é um índice que indica uma relação empírica entre o número estrutural (SN) e a espessura da própria camada, sendo uma media da capacidade relativa do material para atuar como componente estrutural de dado pavimento, dissipando pressões sobre as camadas inferiores, Balbo (2007). A AASHTO apresenta diversas formas de se obter o valor do coeficiente estrutural, em geral por meio de correlações com outras propriedades mecânicas dos materiais (CBR, módulo de resiliência, etc.).

Estão apresentados na tabela 03, os coeficientes estruturais dos materiais normalmente empregados como camada de pavimento.

Tabela 03 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais

| Coeficiente de Equivalência Estrutural dos Materiais                    |                            |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Tipo de Material                                                        | Coeficiente Estrutural (K) |
| Base ou revestimento de concreto asfáltico                              | 2,0                        |
| Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa          | 1,7                        |
| Base ou revestimento pré-misturado a frio de graduação densa            | 1,4                        |
| Base ou revestimento asfáltico por penetração                           | 1,2                        |
| Camadas Granulares                                                      | 1,0                        |
| Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior a 4,5MPa (compressão)  | 1,7                        |
| Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,8 a 4,5MPa (compressão) | 1,4                        |
| Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,1 a 4,5MPa (compressão) | 1,2                        |
| Bases de solo-cal                                                       | 1,2                        |

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

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

A espessura da camada de revestimento asfáltico é por sua vez 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 apresentadas na tabela 04 a seguir recomendadas, visam, especialmente, as bases de comportamento puramente granular e são ditadas pelo que se tem podido observar.

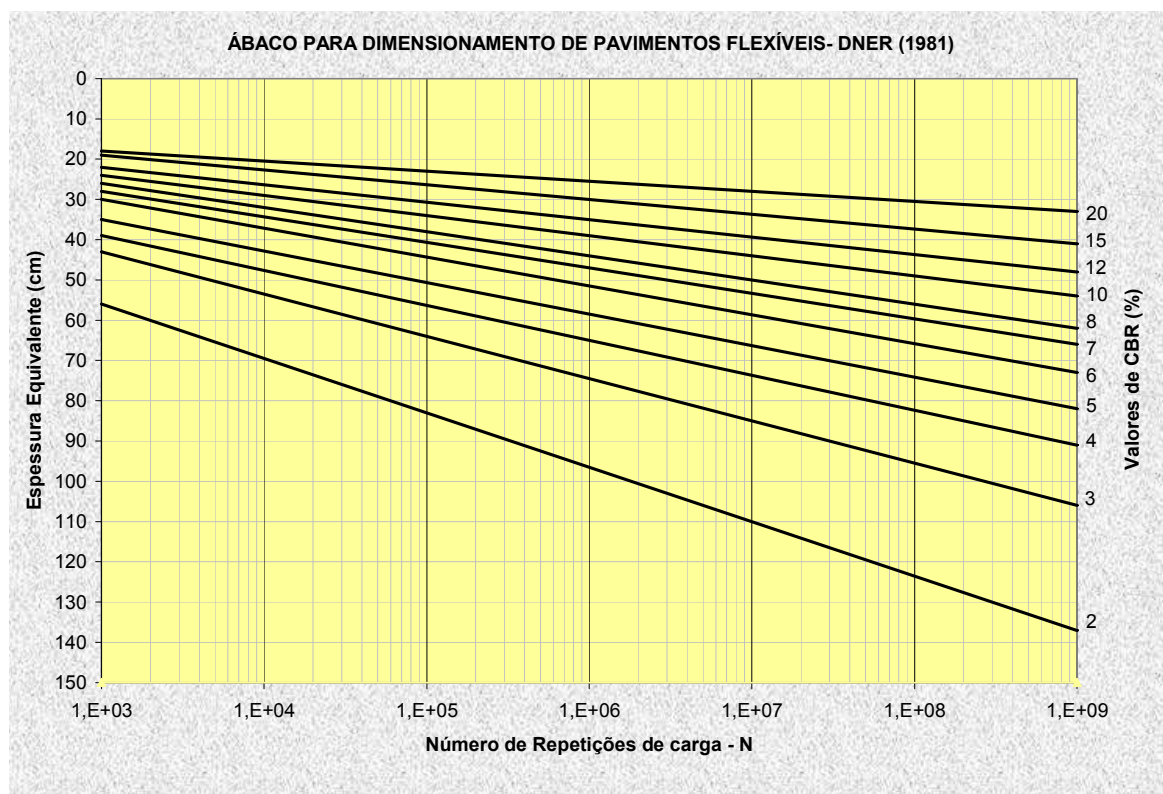
Tabela 04 - Espessuras de revestimento

| Espessuras Mínimas de Revestimentos Asfálticos |                          |                |
|------------------------------------------------|--------------------------|----------------|
| N (repetições) do ESRD de 80 kN                | Tipo de Revestimento     | Espessura (mm) |
| $\leq 10^6$                                    | Tratamentos superficiais | 15 a 30        |
| $10^6 < N \leq 5 \times 10^6$                  | CA, PMQ, PMF             | 50             |
| $5 \times 10^6 < N \leq 10^7$                  | Concreto asfáltico       | 75             |
| $10^7 < N \leq 5 \times 10^7$                  | Concreto asfáltico       | 100            |
| $N \leq 5 \times 10^7$                         | Concreto asfáltico       | 125            |

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

## 7 - Determinação das Espessuras das Camadas

O gráfico 03 dá a espessura total do pavimento, em função de N e do CBR; a espessura fornecida por esse 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 - CBR em causa e, procedendo-se horizontalmente, então, encontra-se, em ordenadas a espessura total do pavimento.



**Gráfico 03 - Ábaco para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis- DNER (1981).**

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

É apresentado na figura 01 a simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento, onde:

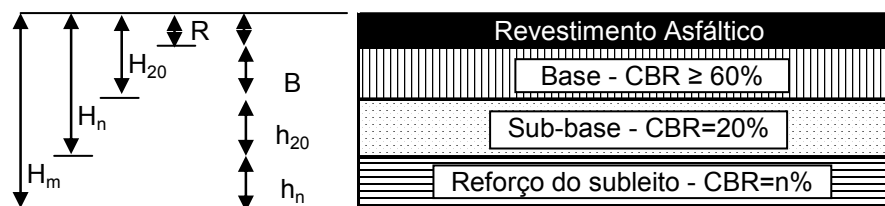


Figura 01 – simbologia das camadas

- $H_m$  = espessura total do pavimento necessária para proteger um material com CBR = n%

$$\left. \begin{array}{l} \text{CBR} = \quad \quad n\% \\ \text{Tráfego} = \quad \quad N \end{array} \right\} \quad \text{ábaco} = H_m$$

- $H_n$  = espessura necessária acima do reforço, ou seja, a espessura da sub-base + base + revestimento, para materiais com  $K = 1,00$ .

$$\left. \begin{array}{l} \text{CBR} = \quad \quad 20\% \\ \text{Tráfego} = \quad \quad N \end{array} \right\} \quad \text{ábaco} = H_{20}$$

Mesmo que o CBR 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 essa razão, usamos 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, são respectivamente as espessuras da base e do revestimento

Uma vez determinadas as espessuras  $H_m$ ,  $H_n$  e  $H_{20}$  pelo gráfico 03 e a espessura de R pela tabela 04, as espessuras da base (B), sub-base ( $h_{20}$ ) e reforço do subleito são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

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

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

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

Quando o CBR da sub-base for maior ou igual a 40% e para  $N \leq 10^6$ , admite-se substituir na inequação (1),  $H_{20}$ , por  $0,8 * H_{20}$ . Para  $N > 10^7$ , recomenda-se substituir, na inequação (1),  $H_{20}$  por  $1,2 * H_{20}$ .

### Exemplos de dimensionamento

1) dimensionar o pavimento em que o  $N = 10^3$ , sabendo-se que o subleito tem um CBR = 3% e dispondo-se de material para o reforço do subleito, com CBR = 9%. Tem-se um material para sub-base com CBR = 20% e material para base com CBR = 60%.

**Solução:** Devido ao N, conforme tabela 04 o tipo de revestimento asfáltico é o tratamento superficial, logo pode-se desprezar a espessura.

Os coeficientes estruturais de cada material (nesse caso)  $K = 1,00$ , assim:

$$o \quad K_B = 1,00, \quad K_S = 1,00 \quad e \quad K_{Ref} = 1,00$$

Pelo ábaco do gráfico 03

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

$$\begin{aligned} H_9 &= 26 \text{ cm} \\ H_3 &= 43 \text{ cm} \\ B &= 18 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$RK_R + BK_B + h_{20} \geq H_n \quad \text{como} \quad R = 0, \quad K_B = 1,00 \text{ e } K_S = 1,00 \text{ temos,}$$

$$B + h_{20} \geq H_n$$

$$18 \text{ cm} + h_{20} \geq 26 \text{ cm} \quad h_{20} = 8 \text{ cm} \quad \mathbf{h_{20} = 10 \text{ cm}}$$

Note-se - adota-se espessura mínima para camadas granulares de base mínima = 15 cm e demais camadas granulares mínima = 10 cm

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S + h_n K_{Ref} \geq H_n$$

$$\text{Como } R = 0, \quad K_B = 1,00, \quad K_S = 1,00 \text{ e } K_{Ref} = 1,00 \text{ temos,}$$

$$B + h_{20} + h_3 \geq H_m$$

$$18 \text{ cm} + 10 \text{ cm} + h_3 \geq 43 \text{ cm} \quad h_3 \geq 15 \text{ cm} \quad \mathbf{h_3 = 15 \text{ cm}}$$

Resultado  $R = 0 \text{ cm}$   
 $B = 18 \text{ cm}$   
 Sub-base = 10 cm  
 Subleito = 15 cm

Resumo

| Camada              | Espessura (cm) |
|---------------------|----------------|
| Revestimento        | 0              |
| Base                | 18             |
| Sub-base            | 10             |
| Reforço do Subleito | 15             |
| <b>Total</b>        | <b>43</b>      |

2) dimensionar um pavimento de uma estrada em que o  $N = 10^6$  sabendo-se que o subleito possui um CBR = 12%, material de sub-base com CBR = 40% e para base um material com CBR = 80%

Solução: devido ao N temos um tratamento superficial como revestimento asfáltico, logo a espessura = 0 cm,  $K_B = 1,00$  e  $K_S = 1,00$

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

Devido a sub-base com CBR = 40% pode reduzir em 20% a espessura de  $H_{20}$ ,

$$\text{Logo, } H_{20} = 0,8 * 25 \text{ cm} = 20 \text{ cm} \quad \mathbf{H_{20} = 20 \text{ cm}}$$

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

$$RK_R + BK_B + h_{20} \geq H_n \quad \text{como} \quad R = 0 \text{ e } K_B = 1,00 \text{ temos,}$$

$$B + h_{20} \geq H_n$$

$$20 \text{ cm} + h_{20} \geq 34 \text{ cm}$$

$$h_{20} = 14 \text{ cm}$$

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

Resultado      R = 0 cm  
                     B = 20 cm  
                     Sub-base = 15 cm

Resumo

| Camada              | Espessura (cm) |
|---------------------|----------------|
| Revestimento        | 0              |
| Base                | 20             |
| Sub-base            | 15             |
| Reforço do Subleito | -              |
| <b>Total</b>        | <b>35</b>      |

(não temos reforço do subleito, assim, não existe essa camada)

3) Dimensionar o pavimento de uma estrada em que  $N = 7 * 10^6$ , sabendo-se que:

- Subleito com CBR = 12%
- Sub-base com CBR = 20% e,
- Base com CBR = 80%

Solução: devido ao  $N = 7 * 10^7$  pela tabela 04 temos como especificação da espessura do revestimento = 7,5 cm.  $K_R = 2,0$  (tabela 03- coeficiente estrutural)  
 $K_B = 1,00$  e  $K_S = 1,00$

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

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

$$RK_R + BK_B \geq H_{20}$$

$$7,5 * 2,0 + 1,0 * B \geq 28 \text{ cm}$$

$$B = 13 \text{ cm}$$

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

$$RK_R + BK_B + h_{20} K_S \geq H_n$$

$$2,0 * 7,5 \text{ cm} + 1,0 * 15 \text{ cm} + h_{20} 1,0 \geq 38 \text{ cm}$$

$$h_{20} * 1,0 \geq 38 \text{ cm} - 30 \text{ cm}$$

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

$$h_{20} = 10 \text{ cm}$$

Resumo

| Camada       | Espessura (cm) |
|--------------|----------------|
| Revestimento | 7,5            |
| Base         | 15             |
| Sub-base     | 10             |

|                     |             |
|---------------------|-------------|
| Reforço do Subleito | -           |
| <b>Total</b>        | <b>32,5</b> |

Ex 4 N =  $5 \times 10^7$  solicitações, subleito CBR = 7%, reforço do subleito = 10%, sub-base (solo cal) = 40%, base (solo cimento > 4,5 MPa) = 60%.