

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS  
MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS  
RÍGIDOS**

**JOSÉ CAVALCANTE MOURA**

**Campinas, SP**

**1999**

UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS  
MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS  
RÍGIDOS**

**JOSÉ CAVALCANTE MOURA**

**Orientador: PROF. DR. ARAKEN SILVEIRA**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração em Transportes.

Campinas, SP

|                                                       |          |
|-------------------------------------------------------|----------|
| Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação. |          |
| Prof. Dr. <i>Araken Silveira</i>                      | 05/08/99 |
| Matrícula: 224731                                     |          |

1999

|           |                                     |
|-----------|-------------------------------------|
| NUMERO    | 100                                 |
| CHAMADA:  | UNICAMP                             |
|           | M865a                               |
| Ex        |                                     |
| NUMERO DO | 39172                               |
| DATA      | 22/01/99                            |
| C         | <input type="checkbox"/>            |
| D         | <input checked="" type="checkbox"/> |
| VALOR     | R\$ 11,00                           |
| DATA      | 22/01/99                            |
| CPD       |                                     |

CM-00136457-8

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M865a Moura, José Cavalcante  
Análise comparativa do desempenho dos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos. / José Cavalcante Moura.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Araken Silveira  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Pavimentos de concreto. 2. Rodovias – Projetos.  
I. Silveira, Araken. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

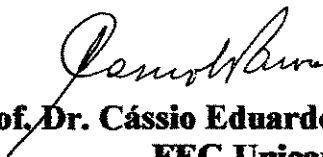
**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS  
MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS  
RÍGIDOS**

**José Cavalcante Moura**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



**Prof. Dr. Araken Silveira  
Presidente e Orientador/FEC-Unicamp**



**Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva  
FEC-Unicamp**



**Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória  
EESC-USP**

**Campinas, 28 de abril de 1999**

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a minha esposa Fátima, pelo permanente apoio, incentivo e compreensão, que tornaram mais suportável o longo período de viagens e estudos.

## **Agradecimentos**

- Ao professor Araken Silveira, pela compreensão e orientação fornecida.
- Ao professor Mário Luiz Ferreira Mello dos Santos, cujo incentivo e apoio encorajou-me ao ingresso na pós-graduação.
- Ao professor Cássio Eduardo L. de Paiva, pela amizade e colaboração.
- Aos colegas de pós-graduação e em especial aos colegas Marcos, Emiliana, Maria José e Ana Paula, pela amizade e companheirismo fizeram-me recordar dos bancos escolares.

## Sumário

|                                                                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>                                                                              | <b>ix</b>  |
| <b>LISTA DE QUADROS.....</b>                                                                              | <b>xii</b> |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>                                                             | <b>xvi</b> |
| <b>RESUMO.....</b>                                                                                        | <b>xix</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                | <b>1</b>   |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>                                                                                 | <b>2</b>   |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                                     | <b>3</b>   |
| <b>4. TENSÕES NOS PAVIMENTOS, CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SUB-BASES E AS<br/>PROPRIEDADES DO CONCRETO.....</b> | <b>11</b>  |
| 4.1. TENSÕES NOS PAVIMENTOS DE CONCRETO .....                                                             | 11         |
| 4.1.1. <i>Considerações sobre as tensões produzidas</i> .....                                             | 11         |
| 4.1.1.1. Cargas do tráfego .....                                                                          | 12         |
| 4.1.1.1.1. Impacto das cargas dinâmicas.....                                                              | 13         |
| 4.1.1.2. Influências do subleito .....                                                                    | 14         |
| 4.1.1.2.1. Suporte do subleito .....                                                                      | 14         |
| 4.1.1.2.2. Atrito do subleito .....                                                                       | 20         |
| 4.1.1.2.3. Variações volumétricas do subleito .....                                                       | 21         |

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.1.3. Influência da temperatura .....                                               | 22        |
| 4.1.2. <i>Tensões produzidas pela temperatura</i> .....                                | 23        |
| 4.1.2.1. Tensão x efeito variação da temperatura .....                                 | 23        |
| 4.1.2.2. Tensão de atrito .....                                                        | 24        |
| 4.1.2.3. Tensão do empenamento. ....                                                   | 26        |
| 4.1.3. <i>Tensões produzidas pelas cargas do tráfego</i> .....                         | 28        |
| 4.1.3.1. Posição relativa das cargas sobre as placas de concreto .....                 | 28        |
| 4.1.3.2. Análise matemática das tensões .....                                          | 30        |
| 4.1.3.2.1. Equações modificadas para o carregamento no canto .....                     | 33        |
| 4.1.3.2.2. Equações modificadas para o carregamento no interior e no bordo. ....       | 35        |
| 4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SUB-BASES E AS PROPRIEDADES DO CONCRETO .....              | 39        |
| 4.2.1. <i>Tipos de sub-base</i> .....                                                  | 39        |
| 4.2.1.1. Sub-bases granulares .....                                                    | 40        |
| 4.2.1.2. Sub-bases tratadas com cimento .....                                          | 42        |
| 4.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO .....                                                    | 44        |
| 4.3.1. <i>Resistência à tração na flexão</i> .....                                     | 45        |
| 4.3.2. <i>Resistência à fadiga do concreto</i> .....                                   | 47        |
| <b>5. OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS .....</b>                    | <b>51</b> |
| 5.1. GENERALIDADES .....                                                               | 51        |
| 5.1.1. <i>Características do tráfego</i> .....                                         | 51        |
| 5.1.1.1. Cálculo das solicitações por eixo para um período de projeto de 20 anos ..... | 53        |
| 5.1.2. <i>Características do subleito e do concreto</i> .....                          | 55        |
| 5.1.2.1. Características do subleito .....                                             | 55        |
| 5.1.2.2. Característica do concreto .....                                              | 56        |
| 5.1.3. <i>Metodologia usada no dimensionamento</i> .....                               | 56        |
| 5.2. O MÉTODO DA PCA-66 .....                                                          | 57        |
| 5.2.1. <i>Cálculo das espessuras</i> .....                                             | 58        |
| 5.3. O MÉTODO DA PCA-84 .....                                                          | 65        |
| 5.3.1. <i>Generalidades</i> .....                                                      | 65        |
| 5.3.1.1. Fadiga .....                                                                  | 65        |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1.2. Erosão .....                                                                                         | 66  |
| 5.3.1.3. Acostamentos de concreto .....                                                                       | 67  |
| 5.3.1.4. Distribuição do tráfego .....                                                                        | 67  |
| 5.3.2. <i>Roteiro de dimensionamento</i> .....                                                                | 68  |
| 5.3.2.1. Cálculo das espessuras.....                                                                          | 79  |
| 5.4. O MÉTODO DA AASHTO/86.....                                                                               | 85  |
| 5.4.1. <i>Determinação dos parâmetros de cálculo conforme o DNER</i> .....                                    | 85  |
| 5.4.1.1. Tráfego de projeto.....                                                                              | 85  |
| 5.4.1.2. Cálculo do coeficiente de recalque de projeto .....                                                  | 94  |
| 5.4.1.3. Resistência e módulo de elasticidade do concreto.....                                                | 97  |
| 5.4.1.4. Coeficiente de drenagem e o coeficiente de transferência de carga J.....                             | 97  |
| 5.4.1.4.1. Coeficiente de drenagem “C <sub>d</sub> ” .....                                                    | 97  |
| 5.4.1.4.2. Valores de coeficiente de transferência de carga “J” .....                                         | 98  |
| 5.4.1.5. Determinação das resistências de projeto .....                                                       | 98  |
| 5.4.2. <i>Cálculo das espessuras</i> .....                                                                    | 100 |
| 5.4.3. <i>Determinação das espessuras conforme o procedimento original</i> .....                              | 106 |
| 5.4.3.1. Determinação do módulo de reação de projeto .....                                                    | 107 |
| 5.4.3.2. Resultados obtidos para os módulos de reação do subleito de projeto, conforme DNER e AASHTO/86 ..... | 117 |
| 5.4.3.3. Variação da espessura em função da perda de suporte (P <sub>s</sub> ).....                           | 118 |
| 5.4.3.4. Cálculo das espessuras.....                                                                          | 118 |
| 5.5. PAVIMENTOS DE CONCRETO ESTRUTURALMENTE ARMADOS.....                                                      | 123 |
| 5.5.1. <i>Generalidades</i> .....                                                                             | 123 |
| 5.5.1.1. Comportamento mecânico dos aços e do concreto.....                                                   | 123 |
| 5.5.1.1.1. Comportamento mecânico dos aços .....                                                              | 123 |
| 5.5.1.1.2. Comportamento mecânico do concreto .....                                                           | 128 |
| 5.5.1.2. Hipóteses básicas do estágio III.....                                                                | 128 |
| 5.5.1.3. Determinação da posição da linha neutra .....                                                        | 131 |
| 5.5.1.2.1. Sub-domínio 2a .....                                                                               | 131 |
| 5.5.1.2.2. Sub-domínio 2b .....                                                                               | 132 |

|                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.1.2.3. Domínio 3 e 4 .....                                                                        | 133        |
| 5.5.2. <i>Determinação do momento atuante e da seção de armadura para uma placa de concreto</i> ..... | 134        |
| 5.5.2.1. Determinação do momento atuante .....                                                        | 134        |
| 5.5.2.1.1. Carga no interior da placa.....                                                            | 137        |
| 5.5.2.1.2. Carga na borda da placa.....                                                               | 138        |
| 5.5.2.2. Cálculo da armadura.....                                                                     | 139        |
| 5.5.3. <i>Dimensionamento do pavimento estruturalmente armado</i> .....                               | 141        |
| 5.5.3.1. Exemplos de dimensionamentos .....                                                           | 141        |
| <b>6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....</b>                                                         | <b>154</b> |
| 6.1. ANÁLISE INDIVIDUAL DE CADA MÉTODO .....                                                          | 154        |
| 6.1.1. <i>Os resultados obtidos pelo método da PCA-66</i> .....                                       | 154        |
| 6.1.2. <i>Os resultados obtidos pelo método da PCA-84</i> .....                                       | 156        |
| 6.1.2.1. Pavimentos sem barras de transferência .....                                                 | 156        |
| 6.1.2.2. Pavimentos com barras de transferência.....                                                  | 157        |
| 6.1.3. <i>Resultados obtidos pelo método da AASHTO</i> .....                                          | 159        |
| 6.1.3.1. Pavimentos sem barras de transferência .....                                                 | 159        |
| 6.1.3.2. Pavimentos com barras de transferência.....                                                  | 160        |
| 6.1.4. <i>Comentários sobre os pavimentos estruturalmente armados</i> .....                           | 161        |
| 6.2. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS .....                                                 | 162        |
| 6.2.1. <i>Pavimentos sem barras de transferência e sem acostamento de concreto</i> .....              | 162        |
| 6.2.2. <i>Pavimentos sem barras de transferência e com acostamento de concreto</i> .....              | 165        |
| 6.2.3. <i>Pavimentos com barras de transferência e sem acostamento de concreto</i> .....              | 167        |
| 6.2.4. <i>Pavimentos com barras de transferência e com acostamento de concreto</i> .....              | 169        |
| <b>7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....</b>                                                       | <b>171</b> |
| <b>8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>                                                                | <b>173</b> |
| <b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                            | <b>175</b> |
| <b>10. ABSTRACT .....</b>                                                                             | <b>178</b> |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 4.1.</b> Relação entre índice de suporte Califórnia (CBR) e coeficiente de recalque (k) do subleito. ....                                                      | 16 |
| <b>Figura 4.2.</b> Aumento de k devido à presença de sub-base granular.....                                                                                              | 17 |
| <b>Figura 4.3.</b> Aumento de k devido à presença de sub-base tratada com cimento. ....                                                                                  | 18 |
| <b>Figura 4.4.</b> Aumento de k devido à presença de sub-base de solo – cimento.....                                                                                     | 19 |
| <b>Figura 4.5.</b> Aumento de k devido à presença de sub-base de concreto rolado. ....                                                                                   | 20 |
| <b>Figura 4.6.</b> Efeito do comprimento e do peso da placa sobre as tensões causadas pelo resultado da expansão e contração de uma mudança de temperatura de 38°C. .... | 25 |
| <b>Figura 4.7.</b> Coeficientes para as tensões do empenamento devido a temperatura. ....                                                                                | 27 |
| <b>Figura 4.8.</b> Hipóteses de carregamento – Westergaard.....                                                                                                          | 28 |
| <b>Figura 4.9.</b> Posições de carga e distribuição de tráfego.....                                                                                                      | 29 |
| <b>Figura 4.10.</b> Comparação das tensões no canto calculadas por várias equações. ....                                                                                 | 34 |
| <b>Figura 4.11.</b> Comparação das tensões no interior calculadas por várias equações.....                                                                               | 36 |
| <b>Figura 4.12.</b> Comparação das tensões no bordo calculadas pelas equações 4.12 e 4.18. ....                                                                          | 37 |
| <b>Figura 4.13.</b> Consolidação da sub-base sob carregamento repetido. ....                                                                                             | 44 |
| <b>Figura 4.14.</b> Efeito do tipo da sub-base sobre a eficiência da transferência de carga.....                                                                         | 44 |
| <b>Figura 4.15.</b> Dispositivos de ensaios para a determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (ABCP).....                             | 45 |
| <b>Figura 4.16.</b> Relação entre os métodos de ensaios para determinação da resistência à tração na flexão. ....                                                        | 46 |
| <b>Figura 4.17.</b> Relação resistência à flexão – idade.....                                                                                                            | 47 |
| <b>Figura 4.18.</b> Curva de fadiga. ....                                                                                                                                | 48 |

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 4.19.</b> Resultados dos ensaios de flexotração cíclicos. ....                                                                        | 49  |
| <b>Figura 5.1.</b> Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos simples).....                   | 61  |
| <b>Figura 5.2.</b> Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos tandem duplos). ....            | 62  |
| <b>Figura 5.3.</b> Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos tandem triplos). ....           | 63  |
| <b>Figura 5.4.</b> Posições críticas de carga. ....                                                                                             | 66  |
| <b>Figura 5.5.</b> Análise de fadiga – número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga (com ou sem acostamento de concreto). .... | 77  |
| <b>Figura 5.6.</b> Análise de erosão – número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (sem acostamento de concreto). .... | 78  |
| <b>Figura 5.7.</b> Análise de erosão – número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (com acostamento de concreto).....  | 79  |
| <b>Figura 5.8.</b> Gráfico para estimar o valor de K no topo da sub-base. ....                                                                  | 110 |
| <b>Figura 5.9.</b> Gráfico para modificar o módulo de reação do subleito em função da fundação rígida.....                                      | 111 |
| <b>Figura 5.10.</b> Gráfico para estimar o dano relativo para os pavimentos rígidos em função da espessura da placa. ....                       | 112 |
| <b>Figura 5.11.</b> Correção do módulo efetivo de reação do subleito para a possível perda de suporte da sub-base. ....                         | 113 |
| <b>Figura 5.12.</b> Gráfico para determinação da espessura da placa (segmento I). ....                                                          | 114 |
| <b>Figura 5.13.</b> Gráfico para determinar a espessura da placa (segmento II).....                                                             | 115 |
| <b>Figura 5.14.</b> Diagrama tensão-deformação – Aço classe A.....                                                                              | 124 |
| <b>Figura 5.15.</b> Diagrama tensão-deformação – Aço classe B.....                                                                              | 124 |
| <b>Figura 5.16.</b> Diagrama simplificado – Aço classe A. ....                                                                                  | 125 |
| <b>Figura 5.17.</b> Diagrama simplificado – Aço classe B. ....                                                                                  | 125 |
| <b>Figura 5.18.</b> Diagramas tensão-deformação de cálculo – Aços CA50A e CA-50B.....                                                           | 127 |
| <b>Figura 5.19.</b> Diagramas de deformações. ....                                                                                              | 129 |
| <b>Figura 5.20.</b> Diagrama retangular-parabólico do concreto. ....                                                                            | 130 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 5.21.</b> Diagrama tensão-deformação do concreto.....                                                | 130 |
| <b>Figura 5.22.</b> Diagrama tensão-deformação de uma peça armada .....                                        | 132 |
| <b>Figura 5.23.</b> Número de Blocos $N_b$ para carga no interior da placa. ....                               | 135 |
| <b>Figura 5.24.</b> Número de Blocos $N_b$ para carga na borda livre longitudinal da placa. ....               | 136 |
| <b>Figura 5.25.</b> Configuração do semi-eixo tandem duplo. ....                                               | 138 |
| <b>Figura 5.26.</b> Configuração do semi-eixo tandem duplo. ....                                               | 139 |
| <b>Figura 6.1.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66) .....                                                  | 155 |
| <b>Figura 6.2.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66) .....                                                  | 155 |
| <b>Figura 6.3.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                  | 156 |
| <b>Figura 6.4.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                  | 156 |
| <b>Figura 6.5.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                  | 156 |
| <b>Figura 6.6.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                  | 156 |
| <b>Figura 6.7.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                  | 157 |
| <b>Figura 6.8.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                  | 157 |
| <b>Figura 6.9.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                  | 158 |
| <b>Figura 6.10.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84) .....                                                 | 158 |
| <b>Figura 6.11.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 60$ MPa/m<br>(pav.s/barras e s/acost.) .....  | 159 |
| <b>Figura 6.12.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 100$ MPa/m<br>(pav.s/barras e s/acost.) ..... | 159 |
| <b>Figura 6.13.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 60$ MPa/m<br>(pav.s/barras e c/acost.) .....  | 159 |
| <b>Figura 6.14.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 100$ MPa/m<br>(pav.s/barras e c/acost.) ..... | 159 |
| <b>Figura 6.15.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 60$ MPa/m<br>(pav.c/barras e s/acost.) .....  | 160 |
| <b>Figura 6.16.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 100$ MPa/m<br>(pav.c/barras e s/acost.) ..... | 160 |
| <b>Figura 6.17.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 60$ MPa/m<br>(pav.c/barras e c/acost.) .....  | 161 |

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 6.18.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86) $k = 100 \text{ MPa/m}$<br>(pav.c/barras e c/acost.) ..... | 161 |
| <b>Figura 6.19.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66, PCA-84 e AASHTO/86) .....                                     | 164 |
| <b>Figura 6.20.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66, PCA-84 e AASHTO/86) .....                                     | 164 |
| <b>Figura 6.21.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86) .....                                             | 166 |
| <b>Figura 6.22.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86) .....                                             | 166 |
| <b>Figura 6.23.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86) .....                                             | 168 |
| <b>Figura 6.24.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86) .....                                             | 168 |
| <b>Figura 6.25.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86) .....                                             | 170 |
| <b>Figura 6.26.</b> Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86) .....                                             | 170 |

## Lista de Quadros

|                     |                                                                                                                                                        |    |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Quadro 4.1.</b>  | Relação aproximada entre índice de plasticidade, porcentagem de inchamento e grau de expansibilidade.....                                              | 39 |
| <b>Quadro 4.2.</b>  | Tipos de sub-base para pavimentos de concreto .....                                                                                                    | 40 |
| <b>Quadro 4.3.</b>  | Faixas granulométricas recomendadas para sub-bases granulares de pavimentos de concreto.....                                                           | 40 |
| <b>Quadro 4.4.</b>  | Características usuais de sub-base estabilizadas com cimento. ....                                                                                     | 42 |
| <b>Quadro 5.1.</b>  | Cálculo da espessura de pavimentos de concreto .....                                                                                                   | 59 |
| <b>Quadro 5.2.</b>  | Relação de tensões e número admissível de repetições de carga .....                                                                                    | 60 |
| <b>Quadro 5.3.</b>  | Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-66.....                                                                                                  | 64 |
| <b>Quadro 5.4.</b>  | Cálculo da espessura de pavimentos de concreto .....                                                                                                   | 70 |
| <b>Quadro 5.5.</b>  | Tensão equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (MPa) PSAC (pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5).....                                 | 71 |
| <b>Quadro 5.6.</b>  | Tensão equivalente para Eixos Tandem Triplos (MPa) PSAC (pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5). ....                                        | 71 |
| <b>Quadro 5.7.</b>  | Tensão equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (MPa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto). DNER (5). ....                                | 71 |
| <b>Quadro 5.8.</b>  | Tensão equivalente para Eixos Tandem Triplos (MPa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto). DNER (5). ....                                        | 72 |
| <b>Quadro 5.9.</b>  | Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PSAC (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5)... | 73 |
| <b>Quadro 5.10.</b> | Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PSAC (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5).....        | 73 |

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Quadro 5.11.</b> Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5)...  | 74 |
| <b>Quadro 5.12.</b> Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5). ....        | 74 |
| <b>Quadro 5.13.</b> Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JCP e PSAC (Junta com barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5). .. | 75 |
| <b>Quadro 5.14.</b> Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JCP e PSAC (junta com barras de transferência e pavimentos sem acostamento de concreto). DNER (5). ....       | 75 |
| <b>Quadro 5.15.</b> Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JCP e PCAC (Junta com barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5)...  | 76 |
| <b>Quadro 5.16.</b> Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JCP e PCAC (Junta com barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5). ....        | 76 |
| <b>Quadro 5.17.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – sem barras e sem acostamento.....                                                                    | 81 |
| <b>Quadro 5.18.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – sem barras e com acostamento.....                                                                    | 82 |
| <b>Quadro 5.19.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – com barras e sem acostamento.....                                                                    | 83 |
| <b>Quadro 5.20.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – com barras e com acostamento.....                                                                    | 84 |
| <b>Quadro 5.21.</b> Valores recomendados pela AASHTO para a confiabilidade.....                                                                                             | 86 |
| <b>Quadro 5.22.</b> Fatores de segurança de tráfego, segundo o nível de confiabilidade R. AASHTO/86. ....                                                                   | 87 |
| <b>Quadro 5.23.</b> Faixa de valores da perda de suporte para diferentes tipos de materiais de sub-base AASHTO/86. ....                                                     | 87 |
| <b>Quadro 5.24.</b> Valores recomendados pela AASHTO para o coeficiente de drenagem $C_d$ . ....                                                                            | 87 |
| <b>Quadro 5.25.</b> Valores típicos do coeficiente de transferência de carga “J”, segundo a AASHTO/86. ....                                                                 | 88 |
| <b>Quadro 5.26.</b> Fatores de equivalência de carga por eixo simples, para índice de serventia final igual a 2,0. Espessura de placa (cm) - DNER (5). ....                 | 89 |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Quadro 5.27.</b> Fatores de equivalência de carga por eixo tandem duplo, para índice de serventia final igual a 2,0. Espessura placa (cm) - DNER (5).....  | 90  |
| <b>Quadro 5.28.</b> Fatores de equivalência de carga por eixo tandem triplo, para índice de serventia final igual a 2,0. Espessura placa (cm) - DNER (5)..... | 91  |
| <b>Quadro 5.29.</b> Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 1. ....                                                                            | 92  |
| <b>Quadro 5.30.</b> Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 2 .....                                                                            | 92  |
| <b>Quadro 5.31.</b> Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 3. ....                                                                            | 93  |
| <b>Quadro 5.32.</b> Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 4. ....                                                                            | 93  |
| <b>Quadro 5.33.</b> Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 5. ....                                                                            | 94  |
| <b>Quadro 5.34.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – sem barras e sem acostamento.....                                                | 102 |
| <b>Quadro 5.35.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – sem barras e com acostamento.....                                                | 103 |
| <b>Quadro 5.36.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – com barras e sem acostamento.....                                                | 104 |
| <b>Quadro 5.37.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – com barras e com acostamento.....                                                | 105 |
| <b>Quadro 5.38.</b> Exemplo de aplicação do método para estimar o módulo de reação efetivo do subleito 116                                                    |     |
| <b>Quadro 5.39.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – sem barras e sem acostamentos .....                                     | 119 |
| <b>Quadro 5.40.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – sem barras e com acostamentos.....                                      | 120 |
| <b>Quadro 5.41.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – com barras e sem acostamentos .....                                     | 121 |
| <b>Quadro 5.42.</b> Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – com barras e com acostamentos.....                                      | 122 |
| <b>Quadro 5.43.</b> Flexão normal simples – seção retangular. ....                                                                                            | 151 |
| <b>Quadro 5.44.</b> Flexão normal simples – seção retangular. ....                                                                                            | 152 |
| <b>Quadro 5.45.</b> Telas soldadas tipos Q e L.....                                                                                                           | 153 |

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

### Abreviaturas:

AASHTO → American Association of State Highway and Transportation Officials

DNER → Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

PCA → Portland Cement Association

### Símbolos:

$a$  → Raio da área de contato

$a_1$  → Expoente definido pela equação (5.12)

$A_s$  → Área de seção de ferro

$b$  → Raio equivalente de distribuição de pressão

$b_1$  → Largura da seção da placa

$B$  → Constante definida pela equação (5.13)

$C$  → Comprimento da placa de concreto

$C_d$  → Coeficiente de drenagem

CH → Amostras curadas em câmara úmida

CM → Amostras curadas com produto químico

CT → Amostras extraídas do campo

$C_x$  e  $C_y$  → Coeficientes para as tensões do empenamento devido a temperatura

$d$  → Distância entre os conjuntos de rodas dos semi-eixos tandem duplo ou tandem triplo

$d_1$  → Altura útil da seção da placa

$e$  → Coeficiente de dilatação térmica do concreto

$E$  → Módulo de elasticidade do concreto

EE → Eixos equivalentes totais de 8,2 t (AASHTO)

- $E_s$  → Módulo de deformação longitudinal do aço  
 $f$  → Coeficiente de atrito entre a placa e o subleito ou sub-base  
 $F$  → Fator de segurança de tráfego  
 $F_{SC}$  → Fator de segurança de carga  
 $f_{cd}$  → Resistência de cálculo do concreto  
 $f_{ck}$  → Resistência característica do concreto à compressão  
 $f_{yd}$  → Tensão de escoamento de cálculo  
 $f_{yk}$  → Tensão de escoamento característico  
 $h$  → Espessura da placa de concreto  
 $IP$  → Índice de plasticidade  
 $J$  → Coeficiente de transferência de carga  
 $k$  → Módulo de reação do subleito  
 $k_0$  → Módulo de reação do subleito (AASHTO) conforme DNER  
 $k_1$  → Módulo de reação do sistema subleito sub-base (AASHTO)  
 $k_2$  → Módulo de reação corrigido pela presença do estrato rígido  
 $k_3$  → Coeficiente de recalque efetivo em função do dano relativo  
 $k_d$  → Coeficiente de recalque de projeto (AASHTO)  
 $K_3$  e  $K_6$  → Coeficientes adimensionais  
 $\ell$  → Raio de rigidez relativo da placa  
 $L$  → Máximo valor do raio da área circular, dentro da qual a redistribuição da reação do subleito é feita  
 $LL$  → Limite de liquidez  
 $L_P$  → Comprimento da impressão do pneu  
 $L_x$  e  $L_y$  → Comprimento e largura da placa utilizado para a determinação dos coeficientes  $C_x$  e  $C_y$   
 $M$  → Momento solicitante não majorado  
 $M_b$  → Momento atuante na borda da placa de concreto  
 $M_i$  → Momento atuante no interior da placa de concreto  
 $M_R$  → Módulo de ruptura do concreto  
 $M_{R_1}$  → Módulo resiliente do subleito  
 $N$  → Número de repetições de carga  
 $N_b$  → Número de blocos determinados pelas cartas de influência  
 $N_{cm}$  → Número de solicitações dos caminhões médios  
 $N_{cp}$  → Número de solicitações dos caminhões pesados

- $N_R \rightarrow$  Número de solicitações dos semi-reboques  
 $P \rightarrow$  Carga de roda  
 $P_i$  e  $P_f \rightarrow$  Índice de serventia inicial e final, respectivamente  
 $P_S \rightarrow$  Perda de suporte da sub-base (AASHTO)  
 $q \rightarrow$  Pressão de enchimento dos pneus  
 $R \rightarrow$  Nível de confiabilidade  
 $R_E \rightarrow$  Resistência equivalente de projeto (AASHTO)  
 $R_T \rightarrow$  Relação de tensões  
 $S_{max} \rightarrow$  Nível de tensão máximo  
 $S_0 \rightarrow$  Desvio padrão do tráfego  
 $t \rightarrow$  Diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior da placa  
 $T \rightarrow$  Tráfego de projeto (AASHTO)  
 $u \rightarrow$  Fator de dano relativo (AASHTO)  
 $x \rightarrow$  Distância entre as rodas do semi-eixo simples ou distância entre os semi-eixos tandem duplo ou triplo  
 $x_1 \rightarrow$  Distância da superfície superior da peça até a linha neutra  
 $W \rightarrow$  Largura da impressão do pneu  
 $Z \rightarrow$  Razão da redução da deflexão máxima  
 $Z_1 \rightarrow$  Profundidade do estrato rígido (AASHTO)  
 $Z_r \rightarrow$  Coeficiente de student  
 $\sigma_b \rightarrow$  Tensão máxima de tração na superfície inferior da placa sob a carga na borda da placa  
 $\sigma_c \rightarrow$  Tensão máxima de tração no topo da placa na direção da bissetriz do ângulo do canto, devido a carga no canto  
 $\sigma_i \rightarrow$  Tensão máxima de tração na superfície inferior da placa devido a carga no interior da placa  
 $\sigma_x \rightarrow$  Tensão máxima da fibra extrema no interior da placa na direção do comprimento, devido a temperatura  
 $\sigma_{xb} \rightarrow$  Tensão máxima da fibra extrema na borda da placa na direção do comprimento  
 $\sigma_y \rightarrow$  Tensão máxima da fibra extrema no interior da placa na direção da largura da placa, devido a temperatura  
 $\varepsilon_c \rightarrow$  Encurtamento do concreto  
 $\varepsilon_s \rightarrow$  Deform. específica do aço  
 $\varepsilon_{sd} \rightarrow$  Deform. específica de cálculo  
 $\mu \rightarrow$  Coeficiente de Poisson

## **Resumo**

O trabalho trata da análise comparativa do desempenho dos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos, onde foram considerados os da PCA, AASHTO/86 e o dimensionamento dos pavimentos estruturalmente armados, tendo como objetivo principal analisar as variações de cada um quando se faz mudanças em alguns parâmetros.

Para atender aos objetivos previstos, foram feitas variações do tráfego, coeficiente de recalque “k” e do módulo de ruptura do concreto, visando observar a sensibilidade de cada um deles.

Após toda essa análise, constatou-se que, de um modo geral e atendo-se aos procedimentos prescritos pelos respectivos métodos, existem parâmetros que têm maior influência na redução da espessura do pavimento, como por exemplo, as barras de transferência para os da PCA-84 e AASHTO e o acostamento de concreto para o PCA-84, como também, existem outros parâmetros que apresentam pouca sensibilidade no dimensionamento do pavimento.

## 1. INTRODUÇÃO

Pavimentos de concreto, freqüentemente chamados de pavimentos rígidos, são constituídos por placas de concreto de cimento Portland, podendo ter ou não uma camada de sub-base entre elas e o subleito.

O pavimento rígido, por causa da sua alta rigidez e alto módulo de elasticidade, tende a distribuir a carga aplicada sobre uma ampla área do solo, dessa maneira, a maior parte das solicitações é suportada pela própria placa de concreto. No projeto de pavimentos rígidos o fator mais importante é a resistência estrutural do concreto; portanto, teoricamente pequenas variações na resistência do subleito têm pouca influência sobre a capacidade estrutural do pavimento. Na prática, tem-se observado que, variações localizadas no suporte do subleito têm provocado recalques diferenciais no pavimento. Assim, é prática internacionalmente consagrada a utilização de uma camada delgada de sub-base, com a função principal de proporcionar suporte uniforme e de evitar o bombeamento dos finos do subleito.

Quanto aos métodos de dimensionamento, cada país utiliza o que melhor se adapta as suas condições de solo e clima, e por isso, ao se importar uma metodologia internacional é necessário que se façam algumas adaptações, visando adequar essa metodologia as nossas condições.

São tratadas neste trabalho metodologias reconhecidas em outros países e aqui em nosso país, como os métodos da PCA, AASHTO e os pavimentos estruturalmente armados bem utilizados em estradas e aeroportos da Suécia.

## **2. OBJETIVOS**

O trabalho de pesquisa que está sendo apresentado tem como objetivo principal comparar o desempenho de cada um desses métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos, com a intenção de saber se os mesmos oferecem resultados próximos e em que situações apresentam ou não sensibilidade às mudanças dos seus principais parâmetros.

Visando buscar tais observações, fez-se variações do tráfego, do coeficiente de recalque “k” e do módulo de ruptura do concreto, com a intenção de analisar o comportamento de cada método em relação à variação desses parâmetros.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos clássicos de dimensionamento de pavimentos rígidos baseiam-se na consideração das propriedades mecânicas do concreto, sendo a mais importante a resistência à tração na flexão, o suporte da fundação do pavimento medido pelo módulo de reação do subleito e nas características do carregamento, onde são considerados a magnitude das cargas, sua posição em relação à geometria das placas e o efeito do número de repetições de eixos solicitantes durante o período de projeto.

Em 1919, Goldbeck apud Kelley (8) sugeriu fórmulas aproximadas para o cálculo das tensões nas placas de concreto, sob certas condições de carregamento e suporte do subleito. Entre estas fórmulas aproximadas, uma delas tornou-se conhecida como a fórmula do canto, cuja expressão é:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \quad (3.1)$$

Esta fórmula é derivada da consideração de que a carga é aplicada em um ponto do canto extremo da placa e de que o canto não recebe apoio do subleito, agindo como uma viga em balanço.

Depois de alguns anos, nas análises dos dados dos testes da pista de Bates, conforme afirma PCA (15), foi verificado que havia uma razoável concordância entre as cargas de roda que causavam as falhas no canto da placa e as cargas calculadas pela fórmula do canto. Porém, concluíram que a fórmula do canto produzia tensões maiores do que as tensões efetivas nas placas do pavimento, até mesmo sob condições extremas do empenamento.

Em 1925, Westergaard (23) apresentou pela primeira vez uma base lógica e científica para a avaliação das tensões nos pavimentos de concreto. Esta análise apresentada preocupou-se com a determinação das tensões máximas nas placas de espessura uniforme, considerando três condições do carregamento:

- 1- A carga aplicada no interior de uma placa a uma considerável distância dos bordos;
- 2- A carga aplicada no canto da placa;
- 3- A carga aplicada no bordo da placa a uma considerável distância do canto.

Para a aplicação das fórmulas propostas, ele considerou as seguintes hipóteses simplificadoras:

- 1- Que a placa de concreto atua como um sólido homogêneo, isotrópico, elástico e em equilíbrio;
- 2- Que as reações do subleito são somente verticais e que elas são proporcionais às deflexões da placa;
- 3- Que a reação do subleito por unidade de área em qualquer ponto é igual a uma constante  $k$ , chamada de módulo de reação do subleito, proporcional à deflexão no ponto;
- 4- Que a espessura da placa é uniforme;
- 5- Que a carga no interior e no canto da placa são distribuídas uniformemente sobre uma área de contato circular. Para o carregamento no canto, a circunferência da área circular é tangente aos bordos da placa;
- 6- Que a carga no bordo da placa é distribuída uniformemente sobre uma área de contato semicircular, sendo o bordo da placa o centro do círculo.

Aplicando a teoria da elasticidade, Westergaard (24) desenvolveu fórmulas que permitiam calcular a máxima tensão de tração na fibra inferior da placa para os carregamentos no bordo e no interior, bem como medir a tensão de tração na fibra superior para o carregamento no canto da placa. As fórmulas são as seguintes:

– Tensão no canto da placa:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k} \right)^{-0,15} (a\sqrt{2})^{0,6} \right]; \quad (3.2.)$$

– Tensão no interior da placa:

$$\sigma_i = \frac{0,316P}{h^2} [\log(h^3) - 4 \log b - \log k + 6,478]; e, \quad (3.3.)$$

– Tensão no bordo da placa:

$$\sigma_b = \frac{0,572P}{h^2} [\log(h^3) - 4 \log b - \log k + 5,767]. \quad (3.4.)$$

Estas fórmulas são válidas para valores de  $E = 210900 \text{ kgf/cm}^2$  e  $\mu = 0,15$ .

Em 1933, Westergaard (26) apresentou novas fórmulas que tornaram a sua teoria com aplicação geral, ou seja, fórmulas válidas para quaisquer valores de “E” e “μ”, cujas fórmulas são:

– Tensão no canto da placa:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{12(1-\mu^2)k}{Eh^3} \right)^{0,15} (a\sqrt{2})^{0,6} \right]; \quad (3.5.)$$

– Tensão no interior da placa:

$$\sigma_i = 0,275(1+\mu) \frac{P}{h^2} \log \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right); e, \quad (3.6.)$$

– Tensão no bordo da placa:

$$\sigma_b = 0,529(1 + 0,54\mu) \frac{P}{h^2} \left[ \log\left(\frac{Eh^3}{kb^4}\right) - 0,71 \right]. \quad (3.7.)$$

Nas fórmulas de 1948, Westergaard (27) considerou a área de contato das rodas como elipse, em várias posições, e também a possibilidade de transferência de carga nas juntas. O seu último trabalho tem formado a base do projeto racional dos pavimentos de concreto, tanto para estradas como para aeroportos.

Em 1951, Pickett e Ray (12) desenvolveram as cartas de influência para a solução das equações gerais de Westergaard, que possibilitaram o estudo de qualquer configuração virtual da carga. A aplicação direta das cartas de influência é perfeitamente substituída por ábacos de utilização simples, desenvolvidos pelos mesmos autores. Estes ábacos fornecem a tensão de tração para o caso da carga tangente à junta transversal livre, como eles se referem aos eixos simples e tandem duplo; baseando-se nisso, o engenheiro Márcio Rocha, da ABCP, desenvolveu ábaco semelhante para o caso do eixo tandem triplo.

Em 1961, Losberg (9) apresentou um trabalho considerado pioneiro em abordar apenas os pavimentos de concreto estruturalmente armados, a metodologia empregada em seu trabalho tem sido utilizada em diversas estradas e aeródromo da Suécia.

A determinação dos momentos também é baseada nas equações de Westergaard e nas cartas de influência, embora Losberg tenha feito algumas adaptações em função de ensaios de laboratório e de campo. Hoje em dia, embora pouco divulgado, o método de Losberg é o mais conhecido para este tipo de dimensionamento.

Em 1966, a PCA (15) publicou um método de dimensionamento fundamentado nos estudos teóricos de Westergaard (23, 24, 25, 26, 27), nos trabalhos de Pickett e Ray (12) e em vários outros trabalhos, como por exemplo, Bradbury (2) e Kelley (8). Para a utilização do método algumas premissas deverão ser analisadas, como por exemplo:

- a resistência característica à tração na flexão do concreto avaliada na idade de 28 dias, no mínimo, ou de 90 dias, no máximo;
- o suporte do subleito avaliado através de uma prova de carga estática, ou através de

- uma correlação entre o CBR do subleito e o módulo de reação do subleito;
- o estudo do tráfego, onde se determina as cargas dos diversos eixos e o número de repetições dos mesmos;
- o consumo de resistência à fadiga considerado, no máximo, igual a 100%.

Após 18 anos de utilização do PCA - 66, a PCA lançou, no ano de 1984, um novo método denominado de PCA - 84 (16). Além de utilizar os critérios anteriores, introduziu o conceito de ruína por erosão da fundação do pavimento, como também, modificou a curva de fadiga que passou a ter um prolongamento na parte correspondente a relação de tensões igual a 0,5 onde cessava a de 66, passando a ser expressa por três segmentos conforme Pitta (14) :

| Relação de tensões ( $R_T$ ) | Repetições admissíveis                                   |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| menor que 0,45               | $N = \text{ilimitado}$                                   |
| 0,45 a 0,55                  | $N = \left( \frac{4,2577}{R_T - 0,4325} \right)^{3,268}$ |
| maior que 0,55               | $\log N = \frac{0,9718 - R_T}{0,0828}$                   |

Este método pode ser utilizado nos seguintes tipos de pavimentos:

- pavimentos de concreto simples, que não dispõem de nenhuma espécie de aço e que têm a entrosagem de agregados como única maneira de transferência de carga entre placas;
- pavimentos de concreto simples com barras de transferência, dotados de sistema artificial de transmissão de carga, formados por barras curtas de aço liso;
- pavimentos de concreto com armadura distribuída descontínua, que contam com aço sob a forma de armadura distribuída, que se detêm antes de cada junta transversal e não têm função estrutural;
- pavimentos de concreto com armadura distribuída contínua, nos quais não há juntas transversais de retração e a armadura é bastante pesada.

Faz-se interessante observar também que este método leva em consideração a existência

ou não de acostamento de concreto.

O método de dimensionamento de pavimentos rígidos da AASHTO é um método empírico que nasceu da pista experimental da então AASHTO, nos Estados Unidos, entre 1959 e 1961. Foram publicadas versões provisórias do método em 1962, 1971 e 1981.

Em 1986, a AASHTO publicou o método de dimensionamento definitivo de placas de concreto, cujo modelo empírico somente é válido nas condições de clima, materiais e projeto do local das observações. Como afirma Motta e Rabello (10), “para expandir para outras situações foi incluída a equação de tensões de canto de Spangler e com isto levou-se em conta as propriedades do concreto e da fundação”.

Neste método foram introduzidos fatores empíricos:

- o conceito de confiabilidade que leva em conta a deterioração estrutural;
- o coeficiente de drenagem, função da porcentagem do tempo, que o pavimento passa próximo da saturação, admitindo que o coeficiente de drenagem da pista da AASHTO era igual a 1,0;
- fator de transferência de carga na junta, levando em conta vários tipos de acostamentos e de sub-bases;
- correlação entre o módulo resiliente do subleito e o tradicional  $k$ , coeficiente de recalque do subleito; além de considerar um fator de perda de suporte por eventual erosão. A pista da AASHTO tinha um  $k = 25 \text{ pci} = 0,7 \text{ kgf} / \text{cm}^2 / \text{cm}$ .

Em 1993, a AASHTO apresentou um novo guia de dimensionamento de pavimentos, no entanto, conserva as mesmas equações da versão de 1986 para o dimensionamento de pavimentos rígidos; mudanças maiores foram feitas para os pavimentos flexíveis com valorização do módulo resiliente.

Na Europa, segundo Springenschmid (19), o dimensionamento dos pavimentos rígidos, onde a espessura necessária do pavimento de concreto é dada como uma função do módulo de ruptura, da carga máxima do eixo e do módulo de reação do subleito, não é em geral utilizados. Em geral, a espessura da placa de concreto é especificada como uma função da frequência de tráfego e da importância da rodovia. É interessante notar que, a espessura das placas de concreto dos novos pavimentos das auto-estradas na Áustria e Alemanha tem sido conservada constante

em 22 cm ao longo dos últimos 40 anos. Cada país europeu tem as suas próprias especificações para execução e, quanto às espessuras, leva em conta o tráfego e tipo de material do subleito.

Nos Estados Unidos, cada estado utiliza o método que melhor se adapta às suas próprias características. Segundo Jiang (7), 84% das agências estaduais de estrada utilizam o método da AASHTO, cerca de 4% (dois estados) usam o método da Portland Cement Association e os 12% restante usam os seus próprios métodos, tal como o procedimento mecanístico de Illinois. Os pavimentos de concreto simples com ou sem barras de transferência são utilizados por 36 estados; os pavimentos de concreto com armadura descontínua são utilizados por 9 estados e os pavimentos de concreto continuamente armados são utilizados por 7 estados.

Atualmente, existem programas de elementos finitos que analisam os pavimentos rígidos, utilizando os princípios de viga (laje) sobre subleito elástico, ou laje sobre o subleito representado pela hipótese de Winkler.

Dentre estes programas, destaca-se o Illi-Slab, desenvolvido, em 1977, pela Universidade de Illinois, que considera o sistema de transferência nas juntas, os vários tipos de camada de apoio, as cargas posicionadas no interior, canto, bordo e nas juntas transversais e longitudinais.

Conforme Motta e Rabello (10), Tia e outros apresentaram, em 1987, um programa computacional denominado Feacons III ( Finite Element Analysis of Concrete Slabs), que foi desenvolvido na Universidade da Flórida. Neste programa, são considerados os seguintes fatores:

- o peso próprio das lajes de concreto;
- vazios no subleito (erosão);
- efeito das juntas (são simuladas 3 lajes contíguas por vez);
- frouxidão das barras de ligação;
- efeito dos bordos;
- efeito dos diferenciais de temperatura entre o topo e o fundo das lajes;
- subleito de Winkler.

Este programa foi utilizado na análise de vários pavimentos em serviço na Flórida, bem como utilizado para analisar medições feitas com defletômetro de impacto (FWD), o que permite estimar por retroanálise o módulo elástico do subleito e da laje, comparando-se as bacias de

deformação medidas e calculadas. Estes tipos de programas não serão abordados neste trabalho, foram apenas citados como informação.

Conforme DNER (5), existem três métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos propostos para uso no Brasil: os da PCA, edição 1966 e 1984 e o método da AASHTO, versão 1986.

Neste trabalho será tratado além destes métodos, o método de dimensionamento de pavimentos estruturalmente armados conforme proposto pelas referências ( 9 e 17).

Nesta revisão bibliográfica, procuramos mostrar a evolução dos procedimentos utilizados no dimensionamento dos pavimentos rígidos, começando com os estudos básicos propostos por Westergaard até os dias de hoje.

## **4. TENSÕES NOS PAVIMENTOS, CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SUB-BASES E AS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

### **4.1. Tensões nos pavimentos de concreto**

#### ***4.1.1. Considerações sobre as tensões produzidas***

Um pavimento de concreto consiste essencialmente em uma placa relativamente fina apoiada sobre um subleito preparado. Imediatamente, após a sua colocação, o concreto é cuidadosamente protegido através da cura até que atinja um estado endurecido. Mas, depois deste breve período inicial, o pavimento está exposto, não somente à aplicação periódica das cargas impostas pelo tráfego, mas também às mudanças cíclicas da umidade e da temperatura produzidas pelas variações climáticas. Desse modo, fica evidente que as tensões nos pavimentos de concreto podem ser produzidas por um grande número de causas diferentes. As cargas do tráfego, variações na umidade e temperatura e variações volumétricas no subleito tendem a deformar a placa, induzindo tensões internas de caráter irregular e de intensidade amplamente variada. As forças externas e as condições climáticas tendem a produzir tensões na placa do pavimento de concreto, as quais podem ser divididas em três categorias:

- 1- Tráfego veicular;
- 2- Influências do subleito;
- 3- Influência da temperatura.

Na tentativa de determinar matematicamente as tensões produzidas por qualquer causa, torna-se necessário avaliar aquela causa como um sistema de forças externas tendo localização, direção e magnitude definida, ou transformar os seus efeitos em termos de deformação elástica da placa. Obviamente, isto não pode ser facilmente feito para todas as condições possíveis, particularmente para aquelas que envolvem as distorções do subleito, tais como apoio não uniforme ou pontos fracos localizados. Nas situações das distorções do subleito não se pode antecipar com certeza o cálculo da tensão, devido a dificuldade de se caracterizar tais situações; portanto, devemos nos preocupar com as tensões produzidas pelas cargas do tráfego e mudanças na temperatura, uma vez que elas são de avaliação mais fáceis.

#### 4.1.1.1. Cargas do tráfego

Sob a ação do tráfego veicular, uma placa do pavimento está submetida a uma série de muitas forças concentradas representando as cargas aplicadas através das rodas do veículo. Portanto, o número e a posição relativa das cargas aplicadas para um dado veículo são governadas pelo número e espaçamento de suas rodas, enquanto que a magnitude de cada carga aplicada depende do peso total do veículo e da distribuição do peso através das diversas rodas. Por isso, o peso total do veículo não é necessariamente indicativo da magnitude da carga de roda concentrada, desde que duas unidades veiculares, cada uma tendo exatamente o mesmo peso total, pode diferir substancialmente com respeito a máxima carga de roda pela razão da diferença do número e arranjo das rodas. Na consideração do efeito da tensão das cargas do tráfego, a pergunta é se a máxima intensidade da tensão produzida numa placa do pavimento para um dado veículo resulta da ação combinada de algumas ou de todas as suas cargas de roda, ou simplesmente da ação separada da maior concentração da carga de roda que o veículo produz.

Segundo as referências (2 e 20), tem sido provado, teórica e experimentalmente, que se um grupo de cargas de roda é aplicado sobre a superfície do pavimento de concreto a uma distância entre os centros maior do que 92 cm, a intensidade máxima da tensão produzida pela ação combinada do grupo inteiro não excederá apreciavelmente aquela causada pela carga

máxima atuando separadamente. Esta condição resulta do fato de que a intensidade da tensão produzida por uma carga simples diminui tão rapidamente, à medida que a distância da carga é aumentada, não havendo superposição das tensões causadas pelas rodas adjacentes, contanto que a distância entre as cargas seja maior do que 92 cm.

#### *4.1.1.1.1. Impacto das cargas dinâmicas*

No passado, os fatores de impacto da carga foram usados para projeto de espessura de pavimentos de concreto. Algumas instituições, entre elas o Instituto Americano do Concreto sugeria a utilização 10% para o fator de impacto da carga estática e outras propuseram 20% para tal fator.

Conforme Pitta (13) e PCA (15), há agora evidência substancial para mostrar que as cargas em movimento causam menores tensões do que a tensão produzida pelas cargas estáticas. Nos testes realizados em Maryland, as tensões foram medidas no bordo externo e na junta transversal do pavimento para velocidades compreendidas entre 0 e 65 Km/h. No bordo externo, as tensões decresceram 30% quando a velocidade foi aumentada da velocidade inicial para 65 Km/h e, no bordo da junta transversal, as tensões foram 15% menor na velocidade de 65 Km/h.

Como podemos observar, as cargas em movimento produzem tensões menores do que as cargas estáticas, no entanto, as referências citadas afirmam que, para compensar as possíveis deficiências de avaliação da grandeza das cargas solicitantes e da projeção do tráfego, são recomendados os seguintes níveis de fator de segurança de carga ( $F_{sc}$ ):

- a) Auto-estradas, rodovias com mais de duas faixas por pista, ou em qualquer projeto para tráfego ininterrupto ou de grande volume de caminhões pesados:  $F_{sc} = 1,2$ ;
- b) Rodovias e vias urbanas, submetidas à tráfego moderado de caminhões pesados:  $F_{sc} = 1,1$ ;
- c) Estradas rurais, ruas residenciais e vias em geral, submetidas a pequeno tráfego de caminhões:  $F_{sc} = 1,0$ .

Observa-se que o termo fator de impacto é transformado em fator de segurança de carga,

cuja variação será verificada no cálculo da espessura do pavimento quando se utilizar os métodos da PCA-66 e PCA-84.

#### 4.1.1.2. Influências do subleito

##### *4.1.1.2.1. Suporte do subleito*

A capacidade de um dado subleito de exercer uma reação contra uma placa é medida pela sua rigidez, ou seja, o grau para o qual o material do subleito resiste quando está sendo comprimido pela pressão aplicada. Este índice da força de reação do subleito é chamado de módulo de reação do subleito e o seu valor numérico não é somente dependente das características físicas do material do subleito, mas é também afetado pelo teor de umidade contido e pelo estado da compactação.

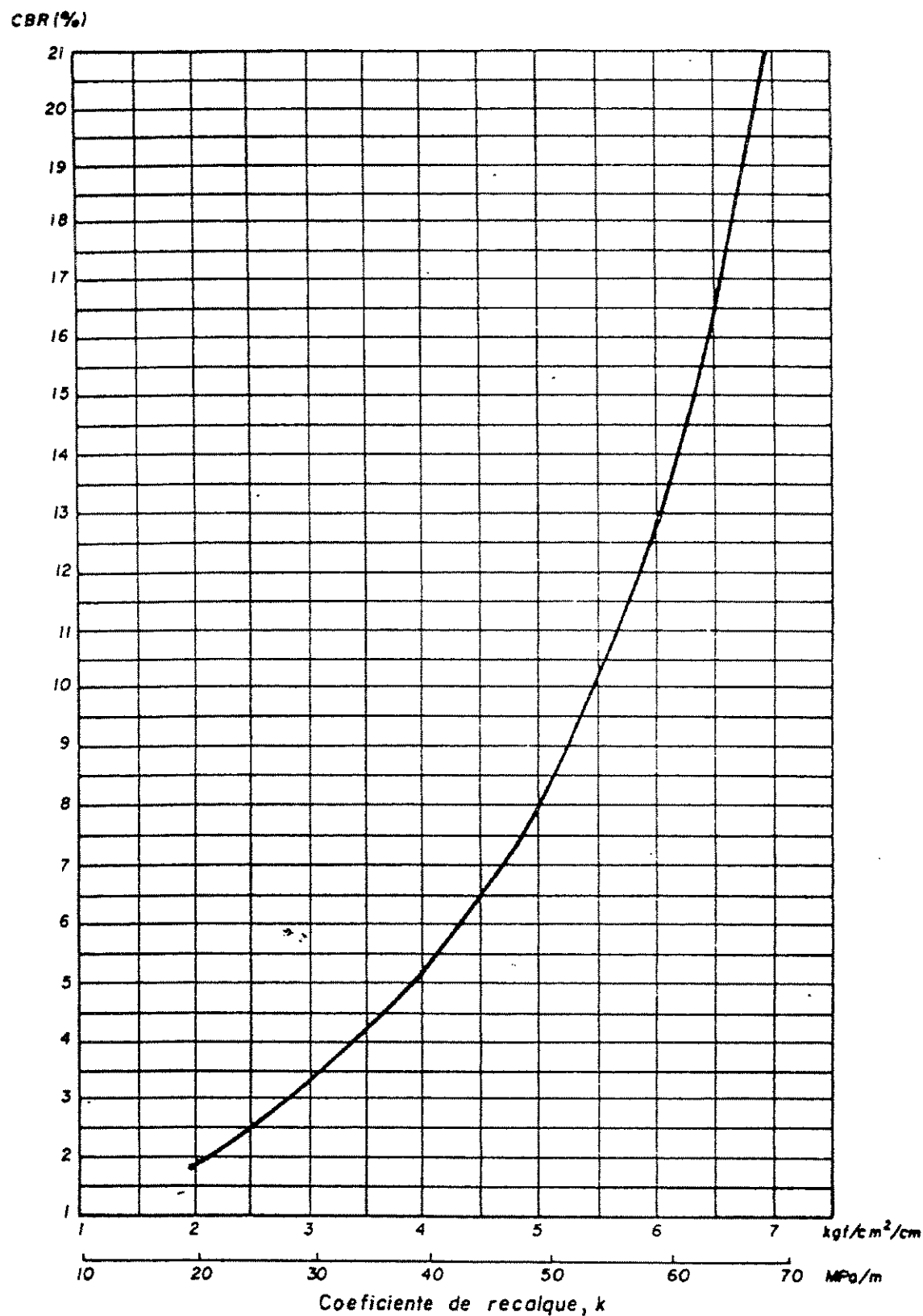
Uma placa com diâmetro de 76,2 cm é usado para a determinação do módulo de reação do subleito,  $k$ , que é calculado através do resultado do carregamento da placa. A PCA define “ $k$ ” como a razão da carga aplicada (em PSI) e o deslocamento sofrido pela placa (em polegadas). A PCA sugere que a determinação de “ $k$ ” seja feita para um deslocamento de 0,127cm. O procedimento do corpo de engenheiros americanos utiliza o deslocamento para uma pressão aplicada de 0,703 kgf/cm<sup>2</sup> (10 PSI).

O DNER (5) utiliza os dois procedimentos, um para subleito e sub-base não tratada que corresponde ao procedimento da PCA e outro para sub-base tratada com cimento, que corresponde ao procedimento do corpo de engenheiros americanos. No entanto, pode-se dispensar tais procedimentos e fazer uso das figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 para essas determinações.

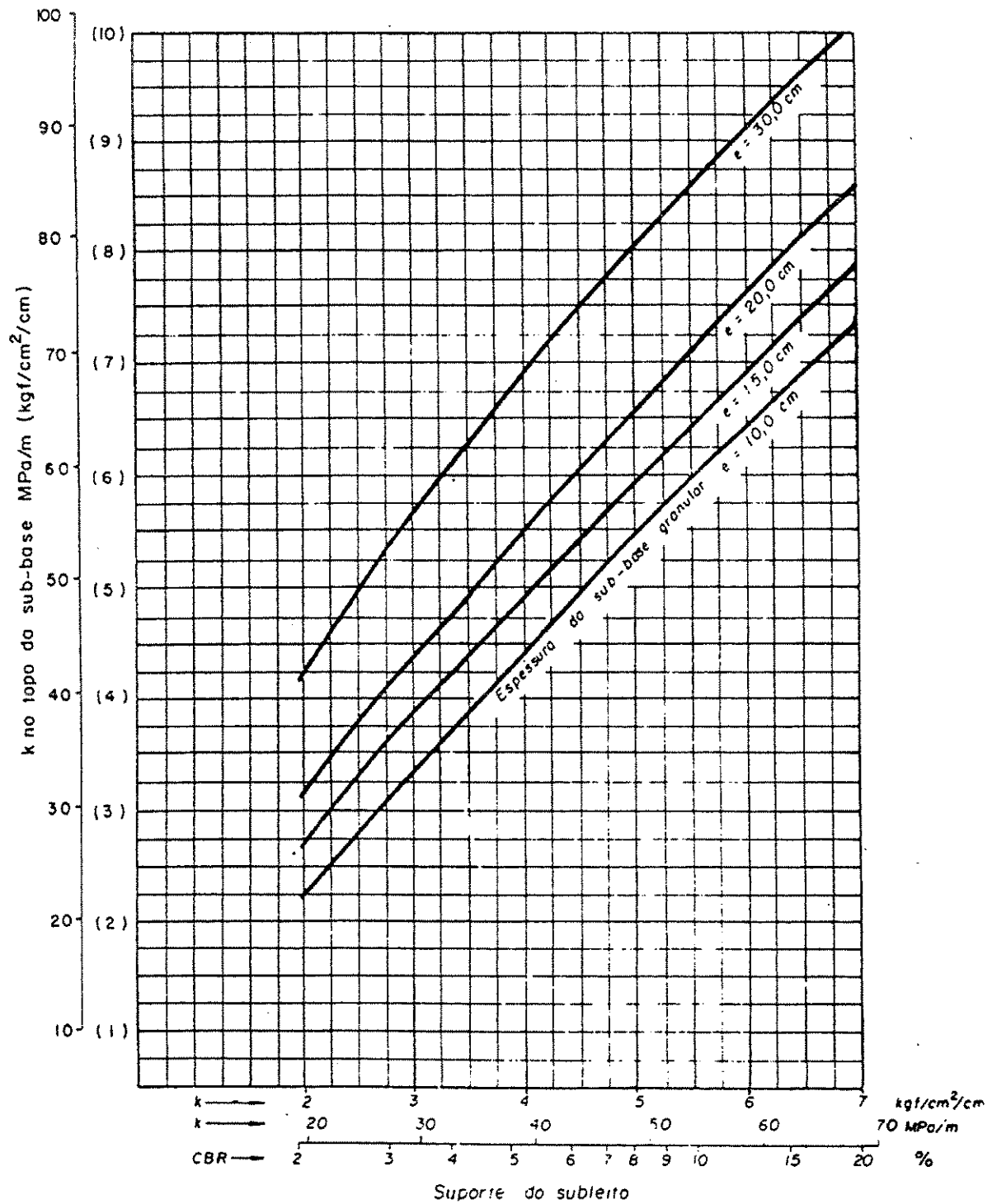
O subleito tem grande efeito na construção e na eficiência dos pavimentos de concreto. Subleitos instáveis apresentam recalques diferenciais elevados, produzindo altas tensões na placa do pavimento de concreto. Segundo Thompson (21), para um pavimento rígido bem projetado, as tensões no subleito são muito pequenas, todavia, é importante reconhecer que:

1. Basicamente toda a deformação num pavimento rígido ocorre no subleito;

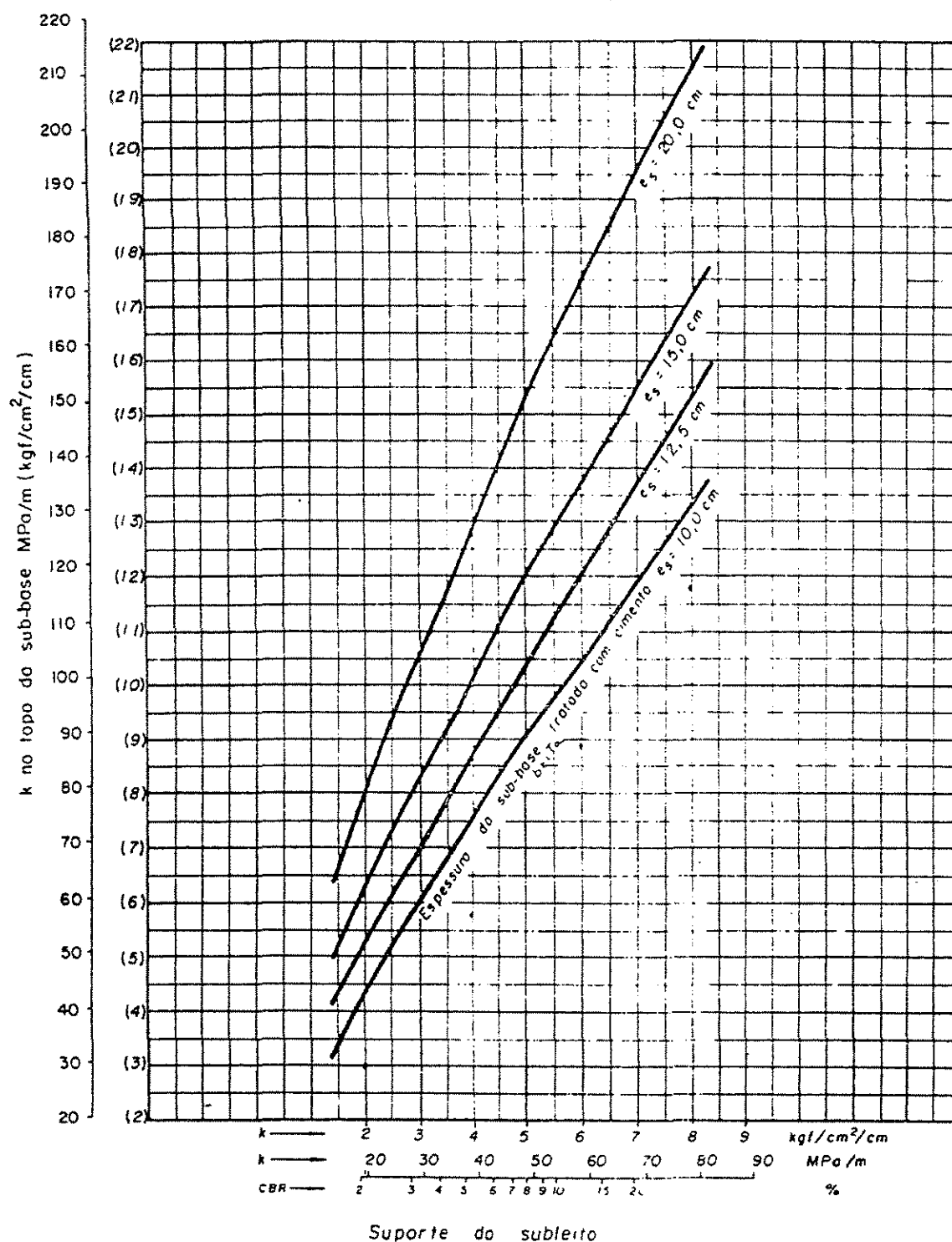
2. O acúmulo de pequenas parcelas da deformação diferencial permanente contribui para as condições de suporte não uniforme;
3. O suporte do subleito não é constante, variando com o estado de tensão no qual o subleito está submetido.



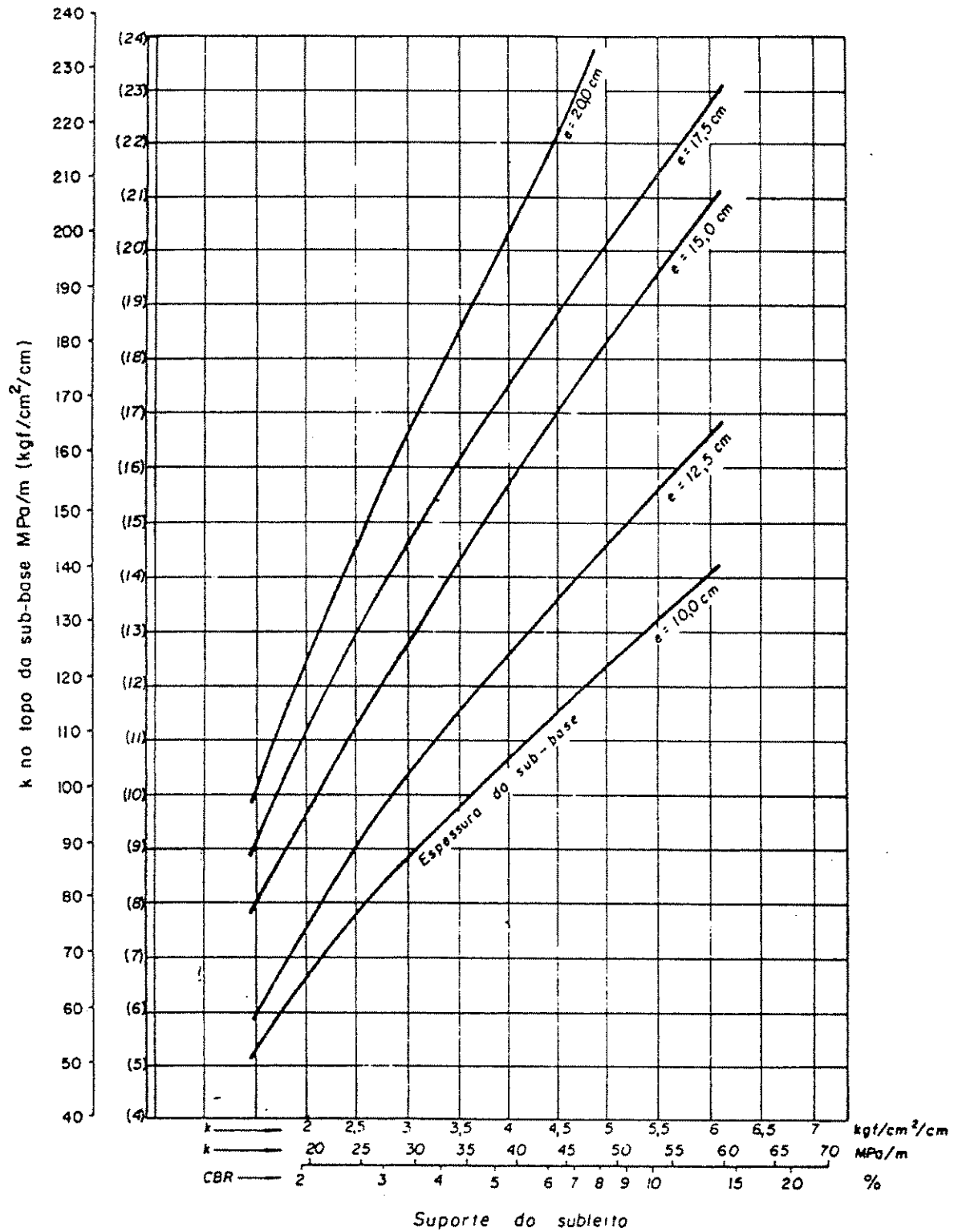
**Figura 4.1.** Relação entre índice de suporte Califórnia (CBR) e coeficiente de recalque ( $k$ ) do subleito.  
Fonte: DNER (5).



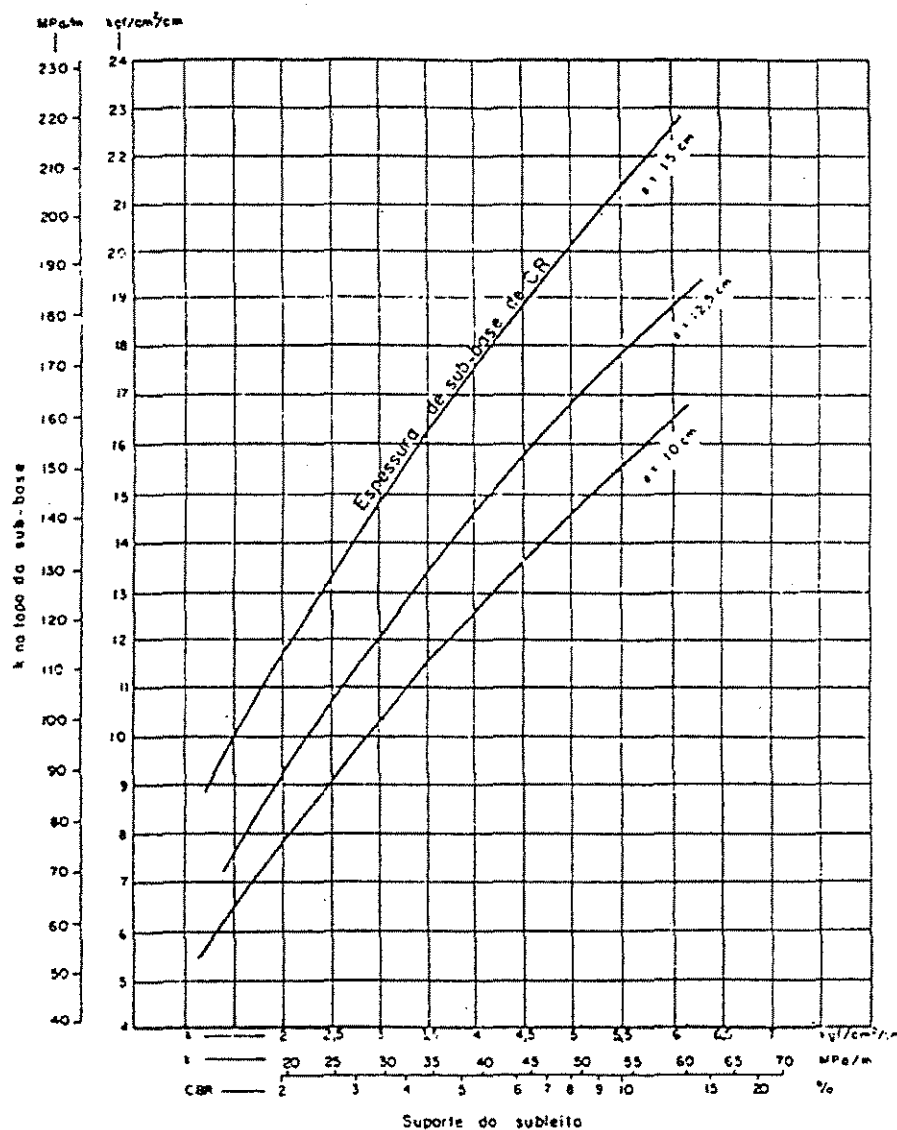
**Figura 4.2.** Aumento de k devido à presença de sub-base granular.  
Fonte: DNER (5).



**Figura 4.3.** Aumento de  $k$  devido à presença de sub-base tratada com cimento.  
Fonte: DNER (5).



**Figura 4.4.** Aumento de  $k$  devido à presença de sub-base de solo – cimento.  
Fonte: DNER (5).



**Figura 4.5.** Aumento de  $k$  devido à presença de sub-base de concreto rolado.  
Fonte: DNER (5).

#### 4.1.1.2.2. Atrito do subleito

O contato friccional que existe entre uma placa de concreto e o seu suporte possibilita ao material do subleito exercer uma força de reação, tendendo a resistir ao movimento lateral da placa, quando ela está sofrendo expansão ou contração. Pesquisas têm mostrado que o valor da reação de atrito pode, para toda finalidade prática, ser expresso por um coeficiente multiplicado

pelo peso da placa. O valor numérico do citado coeficiente depende das características e das condição do material do subleito, bem como do movimento total da placa. Testes indicam que para subleitos que geralmente existem sob os pavimentos de concreto e dentro dos limites dos movimentos das placas de comprimentos entre 4 e 6 m, o valor do coeficiente de atrito está compreendido entre 1,0 e 2,0.

O American Concrete Institute, recomenda os seguintes coeficientes de atrito para os pavimentos de concreto reforçados:

| <b>Tipo de Sub-base</b>                 | <b>Coefficiente de atrito</b> |
|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Estabilizada com cal, cimento e asfalto | 1,8                           |
| Com pedra britada                       | 1,5                           |
| De arenito                              | 1,2                           |
| Subleito natural                        | 0,9                           |

De um modo geral, o valor de 1,5 é comumente usado para finalidade geral de projeto. No entanto, para os pavimentos continuamente reforçados a referência citada recomenda valores 1,8 para as sub-bases estabilizadas e 1,5 para as sub-bases e subleito não estabilizadas.

Segundo Teller (20), a resistência oferecida pelo subleito ao movimento lateral da placa de concreto é composto por dois elementos:

1. A resistência causada pela deformação elástica dentro do solo;
2. A resistência que se forma quando da simples deformação.

A primeira é totalmente independente do peso da placa, dependendo exclusivamente das propriedades físicas do solo, enquanto que a segunda varia diretamente com o peso da placa.

#### *4.1.1.2.3. Variações volumétricas do subleito*

O subleito sob um pavimento é essencialmente susceptível as variações volumétricas, as quais podem ser manifestadas por um grande número e com graus diferentes, dependendo

sobretudo das características físicas do material do subleito, da sua manipulação durante a construção e das condições climáticas subsequente. Variações volumétricas no subleito podem provocar alterações importantes nas condições originais do suporte do pavimento de concreto. Sob certas condições, o subleito pode desenvolver pontos fracos, ou possivelmente afundamentos sob a placa, produzindo tensões cujo valor é impossível de se calcular antecipadamente como é feito no caso da consideração do subleito uniforme.

Obviamente, estas distorções irregulares do subleito não podem ser avaliadas quantitativamente para a finalidade do cálculo da tensão, desde que sua exata localização e possível extensão pode ser não mais do que uma adivinhação. Enquanto elas não podem ser avaliadas para qualquer base de análise racional da tensão, estas distorções devem, todavia, ser reconhecidas como condições de tensão de pouco potencial de ocorrência, que pode ser empregada somente para certas características de projeto, cuja experiência tenha comprovado o seu efeito destrutivo.

#### 4.1.1.3. Influência da temperatura

As temperaturas nas quais os pavimentos de concreto estão naturalmente expostos diferem largamente em diferentes localidades. Isto é especialmente verdadeiro com respeito a variação máxima anual que é representada pela diferença entre a temperatura mais alta do dia de verão e aquela mais fria do dia de inverno. Em algumas localidades, a mudança máxima anual pode chegar a 65 °C, enquanto que em outros lugares ela pode ser somente uma pequena fração deste total. As temperaturas anuais máxima e mínima que prevalecem em uma dada localidade determinam o total do movimento linear da placa e, por conseguinte, são importantes na previsão das juntas de expansão e contração. Todavia, o critério essencial não é necessariamente a diferença real entre os extremos da temperatura, mas de preferência a relação entre as temperaturas extremas e a temperatura na qual o concreto está submetido.

Mas as variações de temperatura, como elas ocorrem, não são sempre de intensidade uniforme através da seção inteira da placa. Às vezes, a temperatura da superfície da placa do pavimento pode ser muito diferente da temperatura da superfície inferior da placa. Quando esta

condição existe, a placa está submetida a um diferencial de temperatura, cujo valor numérico é a diferença entre as temperaturas do topo e do fundo da placa. Todo pavimento de concreto está constantemente submetido a um certo diferencial de temperatura, sendo influenciado, principalmente, em ocorrência e magnitude e pela intensidade dos raios solares; os diferenciais de temperatura são extremamente transitórios no tipo, as ocorrências se invertendo em ciclos diários e a mudança na magnitude quase de hora em hora em todo o dia.

Desde que o diferencial de temperatura seja principalmente uma função do intervalo da temperatura devido ao efeito isolante da espessura da placa, a magnitude do diferencial produzido por uma dada variação na temperatura da superfície exposta aumenta com a espessura da placa. Também, para uma dada espessura da placa, a magnitude do diferencial aumenta com o total e a rapidez da variação na temperatura da superfície exposta. Mas, a temperatura da superfície exposta é mais influenciada pela intensidade dos raios solares do que pela temperatura do ar existente. Portanto, para uma dada estação do ano, o maior diferencial tendendo produzir o empenamento convexo ocorre no momento em que o efeito direto do calor do sol é maior, isto é, durante o final da manhã e o início da tarde, enquanto que o maior diferencial tendendo a produzir o empenamento côncavo obviamente ocorre durante a noite.

Portanto, as variações da temperatura produzem nas placas de concreto, alongamento no período quente e encurtamento no período frio, por isso, estes efeitos deverão ser considerados no dimensionamento dos pavimentos de concreto.

#### ***4.1.2. Tensões produzidas pela temperatura***

##### **4.1.2.1. Tensão x efeito variação da temperatura**

O concreto como a maioria dos outros materiais, tende a expandir-se ou contrair-se quando sua temperatura é aumentada ou diminuída; desse modo, se uma placa está livre para assumir uma deformação produzida pela mudança da temperatura, então não será produzida ne-

nhuma tensão na placa. Mas, se a placa está, de algum modo, impedida da livre deformação, em virtude do seu peso próprio ou pela aplicação de forças externas, então tensões são produzidas e sua intensidade é medida pelo total da restrição encontrada. Desse modo, um pavimento de concreto está quase constantemente sendo submetido a tensões provocadas pelas variações periódicas da temperatura e também, porque no pavimento de concreto existe sempre um certo grau de restrição à deformação criada pelo peso próprio e pelo atrito do subleito. A importância relativa das tensões provocadas pela temperatura nos pavimentos de concreto pode ser estimada quando ela acontece e que,, sob certas condições prevalecentes, podendo exceder em magnitude as tensões produzidas pelas cargas do tráfego.

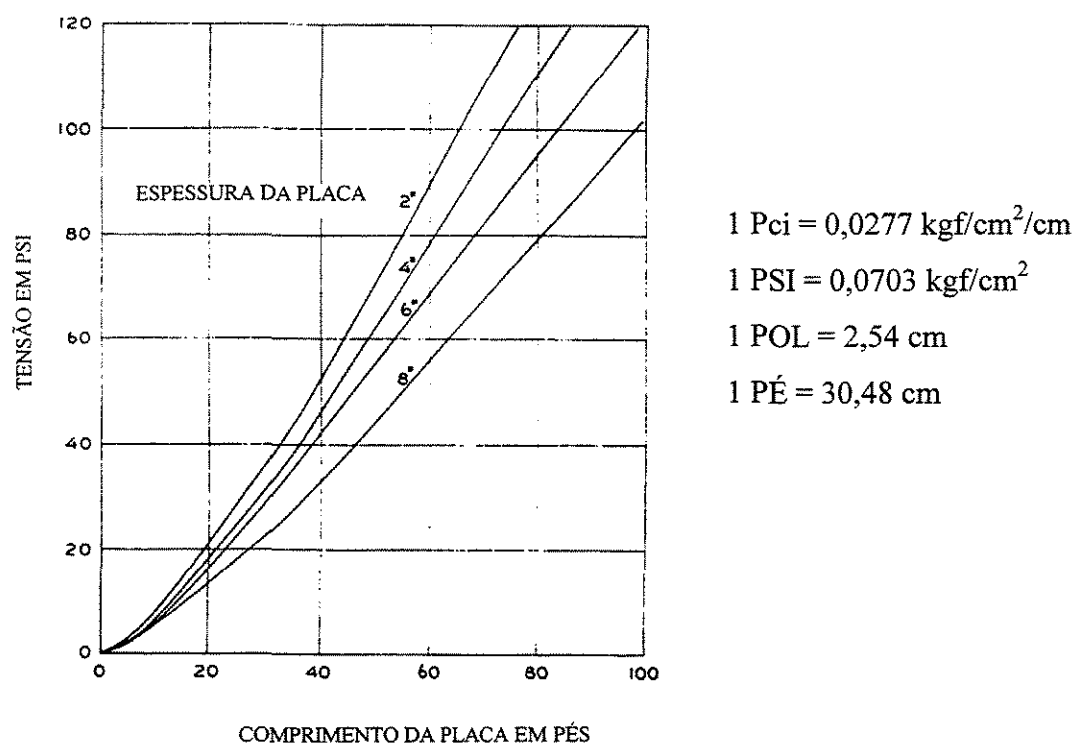
A intensidade da tensão produzida por uma dada variação de temperatura e também o tipo de sua distribuição sobre uma determinada seção da placa de concreto não envolvem somente o total da mudança da temperatura, mas também as condições ambientais. O concreto é um material que apresenta pouca capacidade de transmissão de calor, portanto, qualquer mudança que ocorre na temperatura da superfície exposta da placa de concreto não é imediatamente transmitida por toda a sua espessura. Se a temperatura da superfície exposta permanece constante durante um certo tempo, as condições da temperatura tendem a tornar-se gradualmente a mesma em toda a placa, e depois que uma condição uniforme da temperatura é atingida, a deformação resultante é simplesmente um alongamento ou encurtamento linear da placa como um todo. Mas, durante o intervalo de tempo de equalização da temperatura, as superfícies superior e inferior da placa, temporariamente, têm diferentes temperaturas e, conseqüentemente, estão tentando ao mesmo tempo o alongamento e a contração em diferentes intensidades, portanto tendendo produzir uma deformação de empenamento ou curvatura da placa. Por isso, pode se dizer que a temperatura produziu dois tipos de tensão na placa do pavimento, cada uma exigindo uma base de análise um pouco diferente pela razão dos tipos das deformações produzidas, as quais podem ser, por conveniência, designadas, respectivamente, como tensões de atrito e do empenamento.

#### 4.1.2.2. Tensão de atrito

As mudanças de temperatura que ocorrem nas placas de concreto tendem a produzir uma

expansão ou contração da placa. Na tentativa de mudar o seu comprimento, cada metade da placa tende a mover-se em relação ao subleito, a direção do movimento é sempre do centro da placa para cada extremidade livre quando em expansão e, através de cada extremidade livre, em direção ao centro quando em contração. Em qualquer dos dois casos, o movimento, enquanto não necessariamente impedido, é apesar de tudo resistido pelas forças do atrito do subleito. Estas forças, representando as reações produzidas, atuam no sentido oposto do movimento da placa e, por conseguinte, produz na placa uma tensão de compressão quando ocorre a expansão ou uma tensão de tração quando ocorre a contração.

Segundo Teller (20), a tensão desenvolvida por uma dada mudança de temperatura sobre uma placa de concreto diminui com o aumento da espessura da placa, como podemos observar no gráfico (fig. 4.6).



**Figura 4.6.** Efeito do comprimento e do peso da placa sobre as tensões causadas pelo resultado da expansão e contração de uma mudança de temperatura de 38°C.

Fonte: TELLER (20).

#### 4.1.2.3. Tensão do empenamento.

Mudanças na temperatura do concreto produzem mudanças correspondentes no seu volume. Um aumento na temperatura causa expansão no concreto e uma redução na temperatura causa nele uma contração. A temperatura do pavimento de concreto está constantemente mudando devido as variações da temperatura do ar e durante estas mudanças, as quais acontecem em proporções relativamente rápidas, a temperatura da placa não permanece constante em toda a sua espessura. Durante o calor do dia, o topo da placa está mais aquecido do que a face inferior, enquanto que a noite ocorre o inverso. Este diferencial de temperatura entre as duas superfícies da placa causa empenamento e, desde que o empenamento livre seja impedido pelo seu peso próprio, tensões são produzidas.

J. Eisenhann, apud Springenschmid (19), tem demonstrado que as altas tensões do empenamento se desenvolvem quando a placa alcança o comprimento crítico. Para as placas quadradas o comprimento crítico é  $37h$  ( $h$  é a espessura da placa). Usando placas de comprimento de  $25h$ , as tensões do empenamento são reduzidas a cerca de 40%.

Em 1926, Westergaard, apud Kelley (8), apresentou uma análise teórica das tensões produzidas pelo empenamento devido a temperatura, mas a sua importância não foi reconhecida, possivelmente pelo fato de que nos cálculos da tensão ele considerou um pouco baixo o valor do diferencial da temperatura. Ficou demonstrado nos testes de Arlington que estas tensões podem ser tão grandes quanto aquelas produzidas pelas cargas pesadas do tráfego.

Sobre a base desta análise Bradbury (2) desenvolveu equações gerais para o cálculo das tensões do empenamento na borda e no interior das placas de concreto, cujas expressões são as seguintes:

—Tensão na borda da placa:

$$\sigma_{xb} = \frac{C_x E \epsilon t}{2} \quad (4.1)$$

–Tensão no interior da placa

$$\sigma_x = \frac{Eet(C_x + \mu C_y)}{2(1 - \mu^2)} \quad (4.2)$$

$$\sigma_y = \frac{Eet(C_y + \mu C_x)}{2(1 - \mu^2)} \quad (4.3)$$

$\sigma_{xb} \rightarrow$  Tensão máxima da fibra extrema na borda da placa na direção do comprimento, em  $\text{kgf/cm}^2$ .

$\sigma_x \rightarrow$  Tensão máxima da fibra extrema no interior da placa na direção do comprimento, em  $\text{kgf/cm}^2$ .

$\sigma_y \rightarrow$  Tensão máxima da fibra extrema no interior da placa na direção da largura.

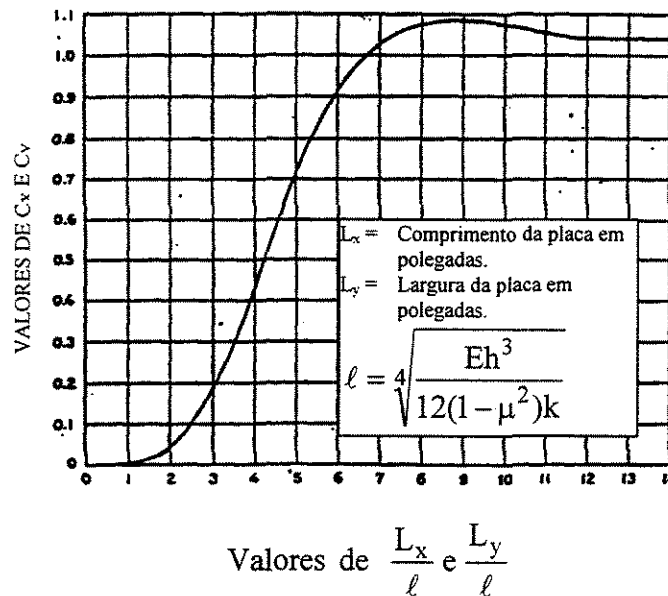
$e \rightarrow$  Coeficiente de dilatação térmica do concreto.

$E \rightarrow$  Módulo de elasticidade do concreto, em  $\text{kgf/cm}^2$ .

$t \rightarrow$  Diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior da placa.

$\mu \rightarrow$  Coeficiente de Poisson.

Os valores de  $C_x$  e  $C_y$  são coeficientes determinados através do gráfico da Fig. 4.7 e  $C_x$  corresponde ao valor  $L_x/\ell$  e  $C_y$  ao valor  $L_y/\ell$ .



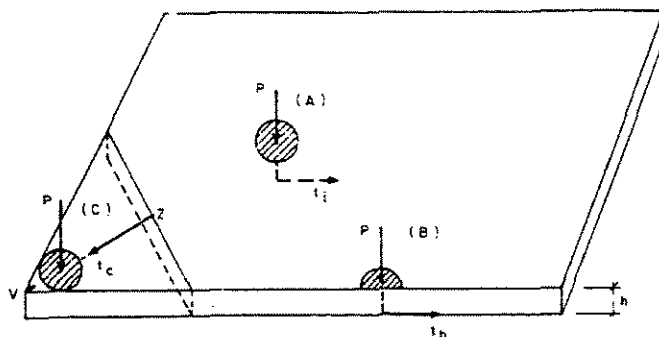
**Figura 4.7.** Coeficientes para as tensões do empenamento devido a temperatura.  
 Fonte: KELLEY (8).

A direção do empenamento da placa é determinada pela relação entre a temperatura do topo e do fundo da placa e esta direção determina se a tensão resultante é tração no topo ou no fundo. Naturalmente, em qualquer um dos dois casos, uma tensão de compressão é criada na superfície oposta. Por conveniência, o diferencial de temperatura será considerado positivo quando o topo da placa estiver com uma temperatura maior do que o fundo e negativo quando ocorrer o contrário. Um diferencial positivo cria tensão de tração no fundo da placa e de compressão no topo, e um diferencial negativo cria tensões inversas.

#### 4.1.3. Tensões produzidas pelas cargas do tráfego.

##### 4.1.3.1. Posição relativa das cargas sobre as placas de concreto

Quando, em 1925, Westergaard (23) estabeleceu as bases teóricas para o cálculo das tensões nas placas dos pavimentos de concreto, ele considerou a carga atuando em três posições: (1) A carga atua no interior da placa; (2) a carga atua no bordo; e, (3) a carga atua no canto da placa, conforme fig. 4.8.

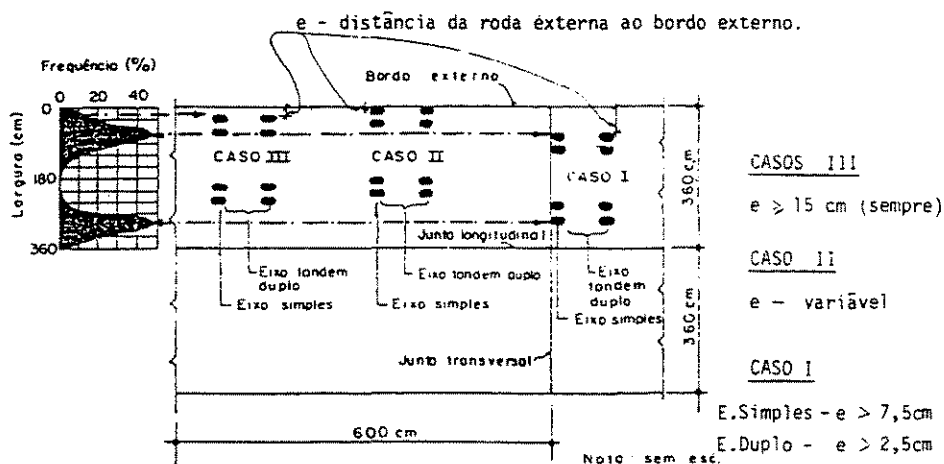


**Figura 4.8.** Hipóteses de carregamento – Westergaard.

Quando a carga está nas posições (A) e (B) é produzida uma tensão de tração na parte inferior da placa e, quando a carga está na posição (C) é produzida uma tensão de tração no topo da placa.

A largura da pista de rolamento tem uma importância muito grande sobre as tensões causadas pelo tráfego e sobre o projeto da espessura do pavimento para o controle destas tensões. As pistas dos pavimentos construídas a partir de 1920 apresentavam sempre larguras de 2,75m e virtualmente todo o tráfego movia-se ao longo do bordo externo do pavimento. As tensões críticas ocorriam quando as rodas do caminhão moviam-se sobre os cantos formados pela junta transversal e pelo bordo externo do pavimento. Sob este carregamento, a placa funciona como uma viga em balanço de forma triangular, com a máxima tensão de flexão ao longo do ângulo bisetor do canto da placa. O cálculo das tensões para esse caso de solicitação, chamado de canto livre ou desprotegido, teve diversas fórmulas apresentadas, e os trabalhos básicos sobre o assunto são de autoria de Westergaard (23) e outros estudiosos tratariam de solucionar o problema, entre eles Bradbury (2) e Kelley (8). Estas fórmulas do canto têm sido usadas com resultados satisfatórios por muitos anos para a espessura dos pavimentos em serviço normal. Todavia, com o aumento da largura da pista de 2,75m para 3,60m, o tráfego se deslocou para o interior da placa. Com praticamente todo o tráfego movendo-se ao longo do interior da placa, a posição da tensão crítica mudou do canto externo da placa para o bordo da junta transversal.

A fig. 4.9 mostra as relações das tensões da carga para a distribuição do tráfego através da largura das pistas do pavimento com 3,60m.



**Figura 4.9.** Posições de carga e distribuição de tráfego.  
Fonte: DNER (5).

O caso I mostra as cargas de eixo simples e tandem tangenciando a junta transversal. As

tensões máximas de tração na flexão ocorrem na parte inferior da placa e são paralelas ao bordo da junta.

O caso II é para os eixos simples e tandem no bordo externo do pavimento. Os eixos são perpendiculares ao bordo do pavimento e a roda externa tangencia a borda longitudinal do pavimento. As tensões máximas de tração na flexão ocorrem na parte inferior da placa e são paralelas ao bordo externo. Estas tensões são um pouco maiores do que a posição do caso I, especialmente para as cargas de eixo simples. No entanto, como mostrado pelo diagrama de frequência do tráfego na fig. 4.9, as aplicações da carga na posição do caso II são muito raras.

O caso III é semelhante ao caso II, estando as rodas externas dos eixos afastados de 15 cm da borda longitudinal.

As tensões para os eixos simples e tandem nas posições da carga para o caso I, II e III foram determinadas por meio das cartas de influência desenvolvidas por Pickett e Ray (12), baseadas nas equações teóricas desenvolvidas por Westergaard.

Os resultados da tensão calculada pela carta de influência para as três posições da carga foram apresentados pela comissão de projeto da AASHO no 49º encontro anual. Estes cálculos, também com os dados sobre a distribuição apresentada na fig. 4.9, mostram que:

1. O caso I fornece tensões maiores do que o caso II quando o eixo simples estiver a mais de 7,5 cm do bordo e quando o eixo tandem estiver a mais de 2,5 cm do bordo. Como resultado, o caso I fornece tensão máxima para 99,8% do tráfego de eixo simples e 99,9% para o tráfego de eixo tandem.
2. Isto significa que apenas 0,2% dos veículos com eixo simples trafegam com menos de 7,5 cm do bordo, e que apenas 0,1% dos veículos com eixo duplo trafegam com menos de 2,5 cm do bordo. Fica então justificada a metodologia que faz o dimensionamento da placa de concreto para o caso I.

#### 4.1.3.2. Análise matemática das tensões

Em 1919, Goldbeck apud Kelley (8), sugeriu a fórmula aproximada para o cálculo das tensões nas placas de concreto, considerando o carregamento no canto da placa, cuja expressão é:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \quad (4.4)$$

Em 1925, as análises de Westergaard (23) tornaram utilizáveis pela primeira vez as bases lógica e científica para a avaliação das tensões nos pavimentos de concreto. Estas análises dizem respeito à determinação das tensões máximas nas placas de espessura uniforme resultando nas três condições seguintes do carregamento:

1. A carga é aplicada próximo ao canto retangular de uma grande placa;
2. A carga é aplicada no interior de uma grande placa a uma distância considerável dos bordos;
3. A carga aplicada no bordo da placa a uma distância considerável de qualquer canto.

Para as três posições da carga, as análises resultaram nas equações que podem ser escritas como segue:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{12(1-\mu^2)k}{Eh^3} \right)^{0.15} \cdot (a\sqrt{2})^{0.6} \right] \quad (4.5)$$

$$\sigma_i = 0,275(1+\mu) \frac{P}{h^2} \log \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right) \quad (4.6)$$

$$\sigma_b = 0,529(1+0,54\mu) \frac{P}{h^2} \left[ \log \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,71 \right] \quad (4.7)$$

$a \rightarrow$  Raio da área de contato.

$b \rightarrow$  Raio equivalente de distribuição de pressão.

$h \rightarrow$  Espessura da placa de concreto.

$k \rightarrow$  Módulo de reação do subleito ou do sistema subleito – sub-base.

$\ell \rightarrow$  Raio de rigidez relativo da placa.

$P \rightarrow$  Carga de roda em kgf.

$\sigma_b \rightarrow$  Tensão máxima de tração na superfície inferior da placa sob a carga na borda da

placa, em  $\text{kgf/cm}^2$ .

$\sigma_c \rightarrow$  Tensão máxima de tração no topo da placa na direção da bissetriz do ângulo do canto, devido a carga no canto, em  $\text{kgf/cm}^2$ .

$\sigma_i \rightarrow$  Tensão máxima de tração na superfície inferior da placa devido a carga no interior da placa, em  $\text{kgf/cm}^2$ .

Nas equações anteriores  $b$  e  $\ell$  são iguais a:

$$b = \sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad \text{quando } a < 1,724h \quad (4.8)$$

$$b = a \quad \text{quando } a > 1,724h$$

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (4.9)$$

A equação 3.5 pode ser escrita em função de  $\ell$ , obtendo a seguinte forma:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right)^{0,6} \right] \quad (4.10)$$

E Bradbury(2) tem mostrado que, quando  $\mu = 0,15$ , as equações 4.6 e 4.7 tomam a seguinte forma:

Carregamento no interior:

$$\sigma_i = 0,31625 \frac{P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\ell}{b} \right) + 1,0693 \right] \quad (4.11)$$

Carregamento no bordo:

$$\sigma_b = 0,57185 \frac{P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\ell}{b} \right) + 0,3593 \right] \quad (4.12)$$

#### 4.1.3.2.1. Equações modificadas para o carregamento no canto

A dedução da fórmula do canto equação 4.4 envolve duas hipóteses, sendo que uma é evidentemente incorreta e a outra é muito discutível. A primeira hipótese considera que a carga de roda atua de forma pontual - o que é impossível; a segunda considera que não existe nenhum contato entre o canto da placa e o subleito. A combinação destas duas hipóteses tem resultado em cálculo de tensões que são muito maiores do que aquelas observadas em testes cuidadosamente realizados.

Quando o canto da placa é arqueado para cima, ali possivelmente exista um completo vazio do suporte do subleito abaixo do canto da placa, tornando a análise original de Westergaard (23) incorreta, pois considerava o suporte do subleito uniforme. Westergaard reconheceu isto e sugeriu uma modificação da análise que leva em conta esta condição. Alguns pesquisadores observaram em testes realizados que as tensões no canto foram maiores do que aquelas calculadas pela equação de Westergaard.

Como resultado destas observações, Bradbury (2) sugeriu a equação modificada

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a}{\ell} \right)^{0,6} \right] \quad (4.13)$$

Esta equação representa a suposição de que o módulo de reação do subleito nas proximidades do canto é somente  $\frac{1}{4}$  do módulo do subleito que está atuando nas outras partes da placa.

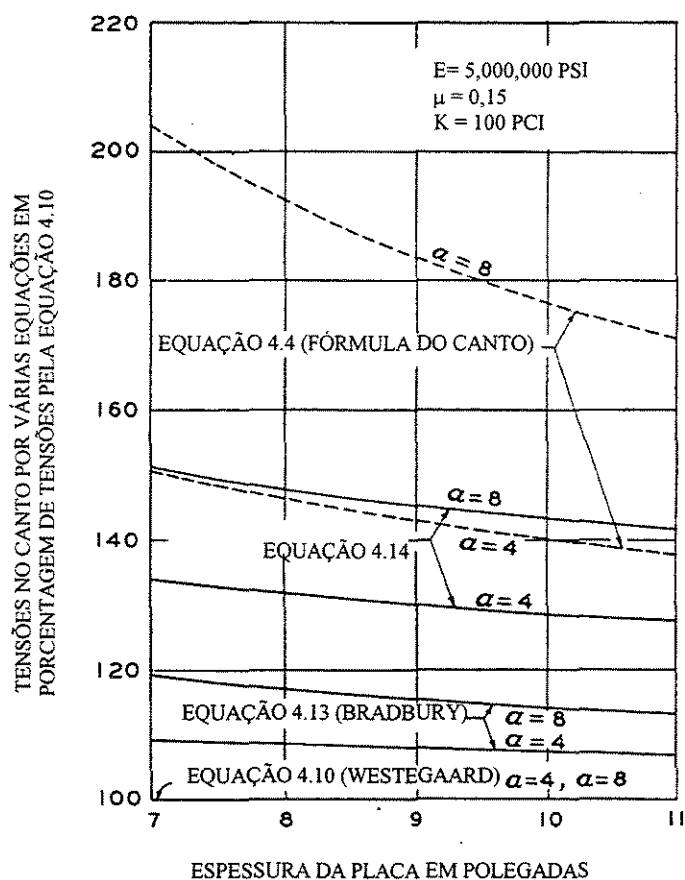
Nos testes de Arlington (20), em que as placas foram expostas às condições normais do tempo, foi encontrada durante o dia, quando o canto está arqueado para baixo e tem contato com o subleito, há uma boa aproximação entre as tensões observadas e aquelas calculadas pela fórmula de Westergaard equação 4.10. Todavia, à noite, quando o canto está arqueado para cima, as tensões observadas foram menores do que aquelas fornecidas pelas equações 4.10 e 4.13.

Westergaard mostrou que, para as condições consideradas em sua análise, a tensão máxima no canto ocorre a uma distância do canto, medida ao longo da diagonal do canto, igual a  $X_1 = 2,38 \sqrt{a\ell}$

Em função daqueles testes, foi sugerida uma nova fórmula para as tensões no canto da placa:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right)^{1,2} \right] \quad (4.14)$$

Fazendo-se um comparativo entre as equações 4.4, 4.10, 4.13 e 4.14 e tomando como base a equação 4.10, podemos observar a fig. 4.10 e concluir que:



**Figura 4.10.** Comparação das tensões no canto calculadas por várias equações.  
Fonte: KELLEY (8).

1. As tensões calculadas pela eq. 4.10 são excedidas por aquelas calculadas pela eq. 4.13 entre 7 e 20%
2. Que as calculadas pela eq. 4.14 são maiores do que as calculadas pela eq. 4.10 entre 27 e 51%

3. E que no comparativo entre eq. 4.4 e eq. 4.10 os valores calculados pela eq. 4.4 são maiores entre 38 e 104%.

4.1.3.2.2. *Equações modificadas para o carregamento no interior e no bordo.*

Para o carregamento no interior da placa, Westergaard propôs a equação 4.6 para o cálculo das tensões; posteriormente, em função dos testes realizados para o carregamento no interior da placa, foi observado que as tensões calculadas pela equação 4.6 produzem tensões maiores do que as observadas nos testes realizados, então Westergaard (26) modificou a eq. 4.6 e a nova equação tomou a forma:

$$\sigma_i = 0,275(1+\mu) \frac{P}{h^2} \left[ \log \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 54,54 \left( \frac{\ell}{L} \right)^2 Z \right] \quad (4.15)$$

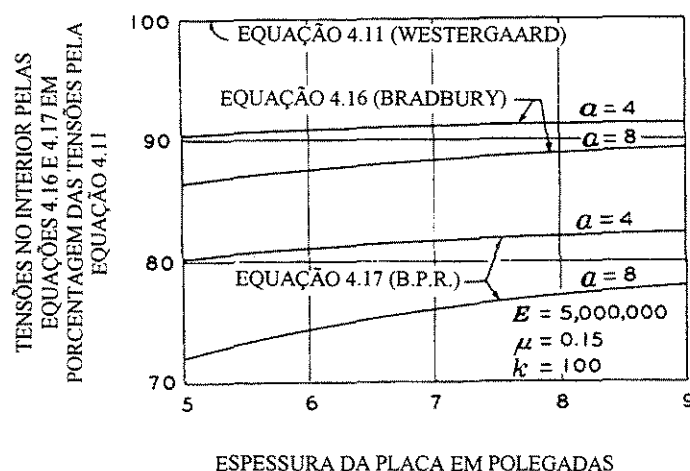
Considerando  $\mu = 0,15$ ,  $Z = 0,20$  e  $L = 5\ell$ , a equação 4.15 transforma-se na seguinte equação:

$$\sigma_i = 0,31625 \frac{P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\ell}{b} \right) + 0,6330 \right] \quad (4.16)$$

Os valores de  $L$  e  $Z$  obtidos nos testes de Arlington foram  $L = 1,75\ell$  e  $Z = 0,05$  e considerando  $\mu = 0,15$ , a equação 4.15 toma a seguinte forma:

$$\sigma_i = 0,31625 \frac{P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\ell}{b} \right) + 0,1788 \right] \quad (4.17)$$

Fazendo-se um comparativo entre as equações 4.11, 4.16 e 4.17 e tomando como base a equação 4.11, podemos observar a fig. 4.11 e concluir que:



**Figura 4.11.** Comparação das tensões no interior calculadas por várias equações.  
Fonte: KELLEY (8).

1. Comparando-se o cálculo das tensões pela equação 4.16 e equação 4.11, podemos observar que as tensões calculadas pela equação 4.16 estão entre 86 a 91% das calculadas pela equação 4.11;
2. Fazendo a mesma comparação entre as equações 4.17 e 4.11, as tensões calculadas pela equação 4.17 estão em torno de 72 a 82% das calculadas pela equação 4.11.

Como as equações 4.15, 4.16 e 4.17 dependem das características do subleito e da placa, e também de uma reação entre eles, devemos continuar usando a equação 4.11 para o cálculo das tensões no interior da placa.

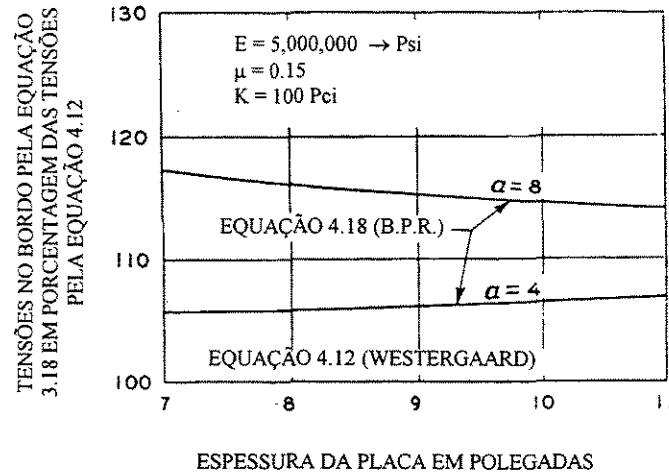
Para o carregamento no bordo da placa, Westergaard propôs a equação 4.12, cuja validade é para as placas sem empenamento, comparando-se as tensões por esta equação e pelos testes observados, conclui-se que há uma boa aproximação para valores médios do raio de contato “a”. Para pequenos valores de “a”, as tensões observadas são um pouco menores do que as calculadas pela equação 4.12 e, para maiores valores de “a”, as tensões observadas são um pouco maiores que aquelas calculadas pela equação 4.12. Todavia, as diferenças não são grandes e não resultam em sérios erros com o uso da equação 4.12 para o cálculo das tensões no bordo numa placa que não esteja empenada. A mesma equação é também aplicável quando os bordos da placa estão arqueados para baixo, o que ocorre durante o dia.

Quando os bordos da placa estão arqueados para cima, à noite, as tensões observadas

excedem as calculadas pela equação 4.12; portanto, foi observado que as tensões sob as condições do empenamento noturno estão em razoável acordo com a equação empírica.

$$\sigma_b = 0,57185 \frac{P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\ell}{b} \right) + \log b \right] \quad (4.18)$$

Fazendo-se um comparativo entre as equações 4.12 e 4.18, e tomando como base a equação 4.12, podemos observar a fig. 4.12 e concluir que as tensões calculadas pela equação 4.18 excedem aquelas calculadas pela equação 4.12 entre 6 e 17%.



**Figura 4.12.** Comparação das tensões no bordo calculadas pelas equações 4.12 e 4.18.  
Fonte: KELLEY (8).

Em 1947, Westergaard (27) apresentou as novas fórmulas para os cálculos das tensões no interior e no bordo das placas de concreto, as quais são indicadas pelas seguintes expressões:

$$\sigma_i = 0,275(1+\mu) \frac{P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\ell}{a} \right) + 1,069 \right] \quad (4.19)$$

$$\sigma_b = \left( \frac{1+\mu}{3+\mu} \right) \frac{P}{h^2} \left[ 8,80 \log \left( \frac{\ell}{a} \right) - \frac{4\mu}{\pi} - 0,290 + \frac{3}{\pi} \left( \frac{1-\mu}{2} + 1,18(1+2\mu) \frac{a}{\ell} \right) \right] \quad (4.20)$$

Estas equações estão escritas de modo simplificado conforme indicadas por Childs (4).

Este pesquisador apresentou, em 1958, um estudo comparativo entre as tensões calculadas pelas fórmulas teóricas e aquelas obtidas no campo, levando em conta o carregamento no interior, bordo e canto das placas.

Neste estudo comparativo ele incluiu a fórmula proposta em 1946, por Pickett, para o carregamento no canto da placa:

$$\sigma_c = 4,20 \frac{P}{h^2} \left( 1 - \frac{\sqrt{\frac{a}{\ell}}}{0,925 + 0,22 \frac{a}{\ell}} \right) \quad (4.21)$$

Carregamento no interior: Para esta situação do carregamento, ele comparou as equações 4.11 e 4.15 com os resultados obtidos, e concluiu que a equação 4.11 é a que melhor se aproxima dos dados obtidos, enquanto que, a equação 4.15 apresentou menores valores do que os obtidos experimentalmente.

Carregamento no bordo: Para esta situação do carregamento, ele comparou as equações 4.12, 4.18 e 4.20 com os resultados obtidos experimentalmente, e concluiu que a equação 4. 20 é a que melhor se aproxima dos dados obtidos com os testes de campo.

Carregamento no canto: Para esta situação do carregamento, ele comparou a equação 4.10 e a fórmula proposta por Pickett 4.21 com os resultados obtidos experimentalmente, e conclui que, para valores de k até 50 MPa/m, a equação 4.10 fornece valores menores do que os obtidos no campo e que a equação proposta por Pickett fornece valores sempre maiores; e para valores de k, maiores ou iguais a 60 MPa/m a equação 4.10 se aproxima muito dos resultados obtidos experimentalmente, enquanto que os valores fornecidos pela equação de Pickett continuou fornecendo valores maiores do que os encontrados no campo.

Portanto, apresentamos uma síntese do estudo das tensões nos pavimentos de concreto, onde abordamos diversos fatores que têm muitas influências no dimensionamento destes pavimentos.

## 4.2. Considerações sobre as sub-bases e as propriedades do concreto

Por causa da rigidez dos pavimentos de concreto, as cargas são distribuídas sobre grandes áreas do subleito e as pressões sobre ele são muito baixas. Como resultado, os pavimentos de concreto não necessitam de alto suporte abaixo deles. No entanto, é importante que o suporte seja razoavelmente uniforme para que não haja mudanças bruscas na sua resistência.

Para projetar e construir razoavelmente um subleito e sub-base uniforme, será necessário controlar as duas maiores causas que provocam um suporte não uniforme: (1) solos expansivos e (2) bombeamento.

O controle efetivo dos solos expansivos é realizado através de técnicas apropriadas de preparação do subleito; para a prevenção do bombeamento será necessária a utilização de uma camada de sub-base granular ou estabilizada. Embora uma sub-base também ofereça algum controle sob solos expansivos, o uso de espessas camadas de sub-base para um substancial controle não é mais efetivo do que uma preparação adequada do subleito e geralmente custa mais.

Segundo Packard (11), pode ser feita uma verificação da capacidade expansiva de um solo através da quadro 4.1:

**Quadro 4.1.** Relação aproximada entre índice de plasticidade, porcentagem de inchamento e grau de expansibilidade

| Índice de Plasticidade | Porcentagem de Inchamento | Grau de Expansibilidade |
|------------------------|---------------------------|-------------------------|
| até 10                 | até 2                     | não expansivo           |
| 10 a 20                | 2 a 4                     | moderadamente expansivo |
| acima de 20            | acima de 4                | altamente expansivo     |

### 4.2.1. Tipos de sub-base

Os tipos de sub-base para pavimentos de concreto podem ser classificados conforme o quadro 4.2. Fonte: DNER (5).

**Quadro 4.2.** Tipos de sub-base para pavimentos de concreto

| Sub-bases para pavimentos de concreto | Sub-bases Granulares | Granulometria Fechada<br>Granulometria Aberta |                                                                                         |
|---------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | Sub-bases Tratadas   | Com cimento                                   | Solo-cimento<br>Solo melhorado<br>Brita graduada tratada com cimento<br>Concreto rolado |
|                                       |                      | Com outros aditivos                           | Asfalto<br>Cal                                                                          |

## 4.2.1.1. Sub-bases granulares

Conforme DNER (5), as sub-bases a serem utilizadas nos pavimentos de concreto deverão atender as seguintes faixas granulométricas, conforme o quadro 4.3.

**Quadro 4.3.** Faixas granulométricas recomendadas para sub-bases granulares de pavimentos de concreto.

| Peneiras (mm) | Porcentagem passando em massa (%) |         |         |          |          |          |
|---------------|-----------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
|               | A                                 | B       | C       | D        | E        | F        |
| 50,0          | 100                               | 100     | -       | -        | -        | -        |
| 25,0          | -                                 | 75 - 95 | 100     | 100      | 100      | 100      |
| 9,5           | 30 - 65                           | 40 - 75 | 50 - 85 | 60 - 100 | -        | -        |
| 4,75          | 25 - 55                           | 30 - 60 | 35 - 65 | 50 - 85  | 55 - 100 | 70 - 100 |
| 2,0           | 15 - 40                           | 20 - 45 | 25 - 50 | 40 - 70  | 40 - 100 | 55 - 100 |
| 0,425         | 8 - 20                            | 15 - 30 | 15 - 30 | 25 - 45  | 20 - 50  | 30 - 70  |
| 0,075         | 2 - 8                             | 5 - 20  | 5 - 15  | 5 - 20   | 6 - 20   | 8 - 25   |

Além da utilização das faixas granulométricas, os materiais utilizados deverão atender aos seguintes requisitos:

- Deverão apresentar  $IP \leq 6\%$  e  $LL \leq 25\%$ ;
- Porcentagem passando peneira nº 200  $\leq 35\%$ ;
- Deverão apresentar diâmetro máximo do agregado igual ou inferior a 1/3 da espessura da sub-base;
- A granulometria do material deverá permitir que, após executada a sub-base e sob ação do tráfego, a consolidação do pavimento seja a menor possível.

Segundo Packard (11), o estudo da sub-base mostra que três fatores são necessários para prevenir o bombeamento:

- 1) Evitar solo do subleito que tenha tendência a entrar em suspensão;
- 2) Evitar a água livre entre o pavimento e o subleito ou a saturação do subleito;
- 3) Tomar muito cuidado com a passagem freqüente de cargas pesadas.

Para os pavimentos de aeroportos, segundo Packard, a experiência tem mostrado que o bombeamento não é um problema sob condições de cargas leves e moderadas freqüências de operação. Estudos realizados sobre pavimentos de estradas têm mostrado que para 100 a 200 veículos comerciais pesados, não haverá necessidade de sub-base para impedir o dano do bombeamento. Para rodovias com maior volume de tráfego, foi observado que não ocorreu bombeamento onde os pavimentos tinham um material de sub-base com menos de 45%, passando na peneira nº 200, e um índice de plasticidade no máximo de 6%. Para grandes volumes de tráfego, foi observado que o material de sub-base que apresentou no máximo 15%, passando na peneira nº 200, um  $IP \leq 6\%$  e um  $LL \leq 25\%$ , efetivamente impediu o bombeamento.

Para impedir a consolidação sob tráfego, as sub-bases deverão ser compactadas a um mínimo de 100% da densidade do proctor normal para médio volume de tráfego e, para grandes volumes de tráfego, a densidade especificada será de 98 a 100% do proctor modificado.

Segundo Childs (3), as tensões produzidas no bordo e no canto livre de uma placa de 15 cm sobre 15 cm de uma sub-base de granulometria fechada foram as mesmas de uma placa de 16,5 cm apoiada diretamente no subleito; e, a tensão produzida numa placa de 15 cm sobre 30 cm de uma sub-base foi a mesma que seria esperado de uma placa de 18 cm sem qualquer sub-base.

As deflexões no bordo de uma placa de 15 cm sobre 15 cm de uma sub-base foram as mesmas que seriam esperadas de uma placa de 19 cm apoiada diretamente no subleito; e as deflexões no canto livre de uma placa de 15 cm sobre 15 cm de uma sub-base foram as mesmas que seriam esperadas de uma placa de 21,5 cm apoiada diretamente no subleito; e as deflexões de uma placa de 15 cm sobre 30 cm de uma sub-base foram as mesmas que seriam esperadas de uma placa de 25 cm apoiada diretamente no subleito.

Portanto, sobre subleitos de baixo suporte, as tensões podem ser reduzidas, efetiva e economicamente, com pequenos acréscimos na espessura da placa e que as deflexões podem ser reduzidas substancialmente pelo uso de uma sub-base de granulometria fechada bem compactada.

As pressões diretamente abaixo da carga na interface placa-sub-base aumentam com o aumento da espessura do material granular e as pressões na interface subleito-sub-base decrescem com o aumento da espessura da sub-base granular.

Como podemos observar pelos estudos das referências (3 e 11), a utilização das sub-bases granulares tem uma substancial influência sobre as reduções das pressões no subleito e na prevenção do bombeamento. A referência (11) sugere que para pavimentos de aeroportos de tráfego pesado, a utilização de 15 cm de sub-base granular evita o bombeamento. Para valores de espessuras maiores do que 15 cm há um grande risco no desempenho do pavimento devido a consolidação.

#### 4.2.1.2. Sub-bases tratadas com cimento

O desempenho dos pavimentos, que suportam altos volumes de tráfego e de cargas pesadas, tem mostrado os benefícios da utilização das sub-bases tratadas com cimento. O quadro 4.4 mostra os requisitos de dosagem e os tipos de estabilização.

**Quadro 4.4.** Características usuais de sub-base estabilizadas com cimento.

| <i>Tipos de Estabilização</i> | <i>Requisitos de dosagem</i>                                                                                                          | <i>Espessuras usuais</i> |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Solo-cimento                  | 1) Resistência mínima à compressão simples, aos 7 dias, entre 1,4 e 2,1 MPa<br>2) Consumo mínimo de cimento igual a 5% em massa       | 10 cm a 20 cm            |
| Brita tratada com cimento     | 1) Resistência à compressão simples aos 7 dias, entre 3,5 e 5,0 MPa<br>2) Consumo mínimo de cimento igual a 3% em massa               | 10 cm a 20 cm            |
| Concreto pobre rolado         | 1) Resistência característica à compressão simples, aos 7 dias, entre 3,2 e 7,0 MPa<br>2) Relação cimento: agregado entre 1:15 e 1:22 | 7,5 cm a 15 cm           |
| Solo melhorado com cimento    | 1) Índice de suporte Califórnia igual ou maior que 30% conf. DNER ES-P 09-71<br>2) Consumo mínimo de cimento igual a 3% em massa      | 10 cm a 20 cm            |

As principais características com relação a utilização das sub-bases tratadas são:

- 1) Fornece um impermeável, uniforme e resistente suporte ao pavimento;
- 2) Elimina a consolidação da sub-base;
- 3) Melhora muito a transferência de cargas nas juntas;
- 4) Aumenta muito o módulo de reação do sistema subleito-sub-base, produzindo com isto uma redução na espessura da placa.

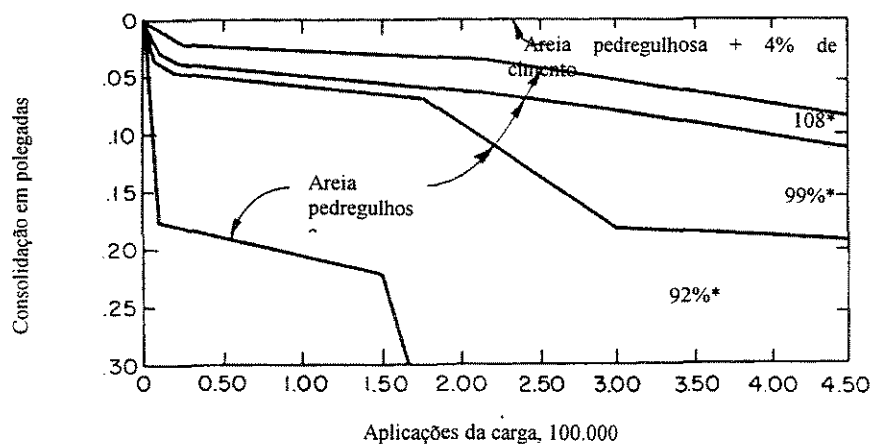
A figura 4.13 mostra o efeito da densidade sobre a consolidação para 15 cm de espessura de sub-base granular não tratada. Como esperado, a consolidação aumentou com o decréscimo da densidade da sub-base. Para a sub-base tratada foi aplicado 450.000 repetições da carga e não se observou qualquer consolidação.

Uma outra pesquisa foi realizada sobre as propriedades das sub-bases tratadas com relação a eficácia na transferência de carga através das juntas, considerando apenas o intertravamento do agregado.

Os resultados estão mostrados na figura 4.14 como se pode observar, as cargas foram aumentando sobre a placa com sub-base granular, a eficácia gradualmente decresceu, se aproximando de 20% a 1.000.000 de aplicações da carga. Sobre a sub-base tratada, a perda ocorreu com menor proporção e após 1.000.000 de aplicações da carga, a eficácia permaneceu a um nível de quase 60%.

O relativo desempenho indica que o uso das sub-bases tratadas fornecerá um maior grau de transferência de carga na vida de serviço do pavimento.

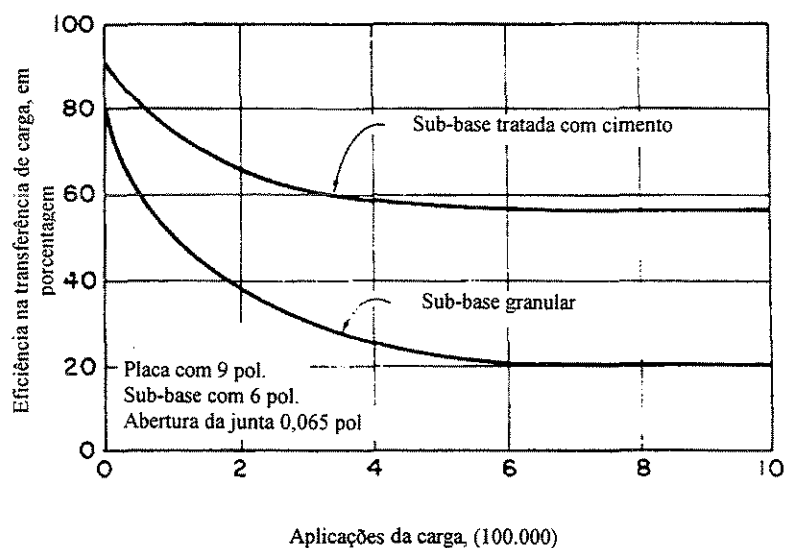
Portanto, cabe ao projetista escolher a melhor alternativa de sub-base para um melhor desempenho do pavimento projetado.



\* Porcentagem da densidade padrão, AASHTO T-99

**Figura 4.13.** Consolidação da sub-base sob carregamento repetido.

Fonte: PACKARD (11).



**Figura 4.14.** Efeito do tipo da sub-base sobre a eficiência da transferência de carga.

Fonte: PACKARD (11).

### 4.3. Propriedades do concreto

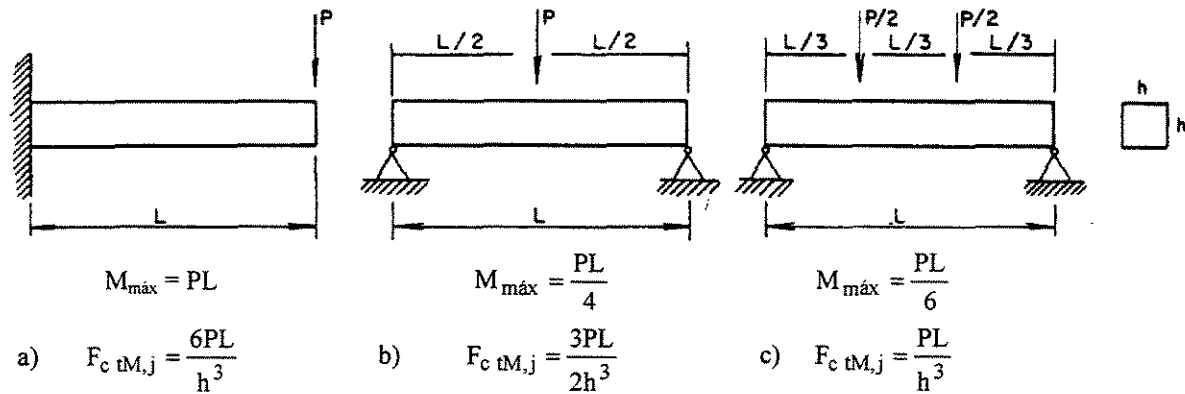
Sendo o concreto o principal material utilizado, faremos considerações sobre a fadiga e a resistência à tração na flexão, as quais são utilizadas no dimensionamento dos pavimentos de concreto.

#### 4.3.1. Resistência à tração na flexão

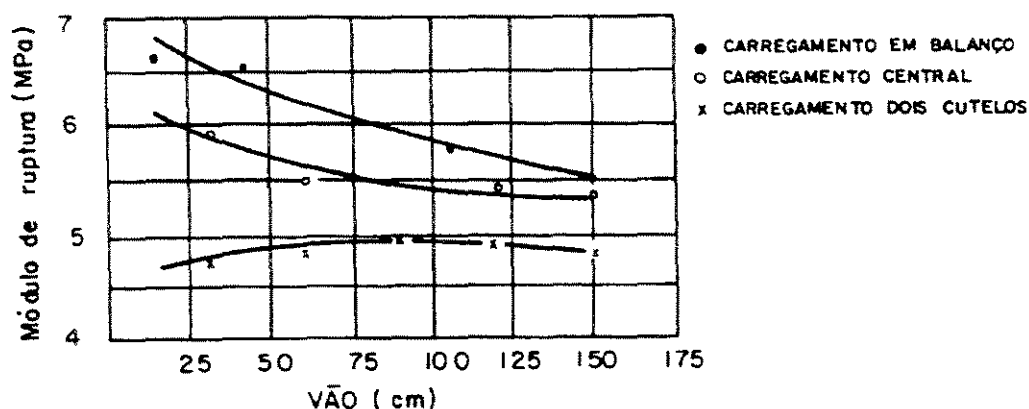
A medida da resistência à tração na flexão do concreto é feita pela determinação do módulo de ruptura de corpos de prova prismáticos.

O módulo de ruptura pode ser encontrado através dos seguintes métodos: (1) Viga em balanço, (2) Ponto central e (3) Dois cutelos. Uma diferença importante nesses métodos é que, o de dois cutelos conduz a valores de resistência mais representativos e a favor da segurança do que os fornecidos pelos métodos, cujo carregamento é feito através de um único ponto, como o da carga central e o da viga em balanço.

Os dispositivos de ensaios para a determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos estão mostrados na figura 4.15 e os resultados dos ensaios para a determinação do módulo de ruptura pelos três métodos estão mostrados na figura 4.16.



**Figura 4.15.** Dispositivos de ensaios para a determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (ABCP).

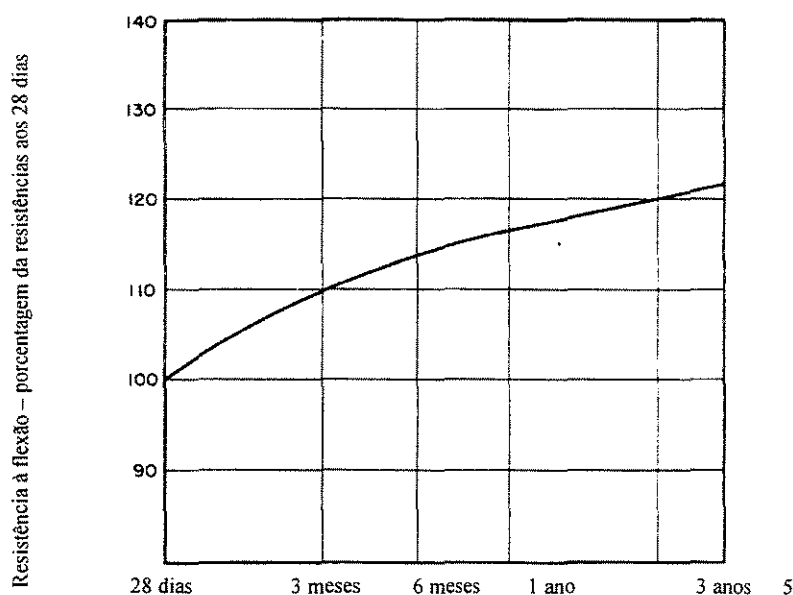


**Figura 4.16.** Relação entre os métodos de ensaios para determinação da resistência à tração na flexão.  
Fonte: PCA (15).

Os ensaios para determinação do módulo de ruptura são comumente feitos aos 7, 14, 28 e 90 dias. Os resultados dos ensaios aos 7 e 14 dias são utilizados nas especificações para o controle da obra e para determinar quando o pavimento pode ser aberto ao tráfego. Os resultados dos ensaios aos 28 e 90 dias são usados para projeto de espessura de pavimentos de estradas, ruas e aeroportos. O uso das resistências aos 28 e 90 dias é justificado porque há muito pouca repetição de carga durante os primeiros 28 ou 90 dias, comparada com os milhões de repetições de carga que ocorrem depois.

Outra razão para o uso das resistência dos ensaios aos 28 e 90 dias para determinar a espessura é que o concreto continua ganhando resistência após os 90 dias, como mostra a figura 4.17. Como o concreto continua ganhando resistência, é prática corrente usar a resistência à tração na flexão aos 90 dias para o projeto de espessura dos pavimentos de aeroportos. Quando os dados dos ensaios de 90 dias não estão disponíveis, é seguro usar 110% do valor de 28 dias.

O valor do módulo de ruptura aos 28 dias é correntemente usado para projeto de espessura de ruas e estradas. No entanto, as relações idade-resistência na figura 4.17 mostra ser esta prática conservativa.



**Figura 4.17.** Relação resistência à flexão – idade.

Fonte: PACKARD (11).

Segundo a PCA (15), um procedimento corrente é usar a resistência aos 28 dias para os primeiros 5 anos de vida de projeto e 110% da resistência dos 28 dias para o restante da vida de projeto.

#### 4.3.2. Resistência à fadiga do concreto

A resistência da fadiga do concreto é um fator importante no projeto de muitas estruturas. No entanto, o problema do comportamento do concreto sob cargas repetidas é tão complexo que até hoje existem muitas divergências sobre o assunto .

As pesquisas sobre o assunto têm concluído que o número admissível de aplicações de carga que produza uma relação de tensões igual ou inferior a 0,56 é, praticamente, ilimitado

No método de projeto da PCA - 66, o valor adotado para que o número de repetições seja considerado ilimitado é 0,50. Já no método da PCA - 84, são apresentadas três equações para a determinação do número admissível de repetições de carga, conforme PITTA(14):

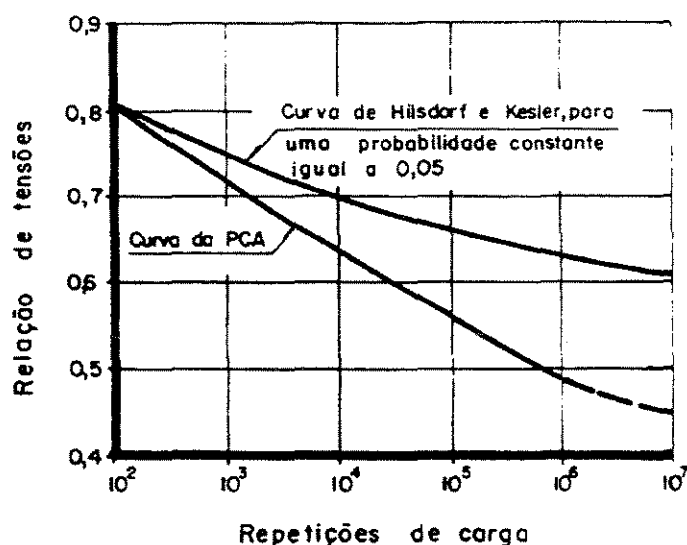
1) Para  $R_T < 0,45$

$N = \text{ilimitado};$

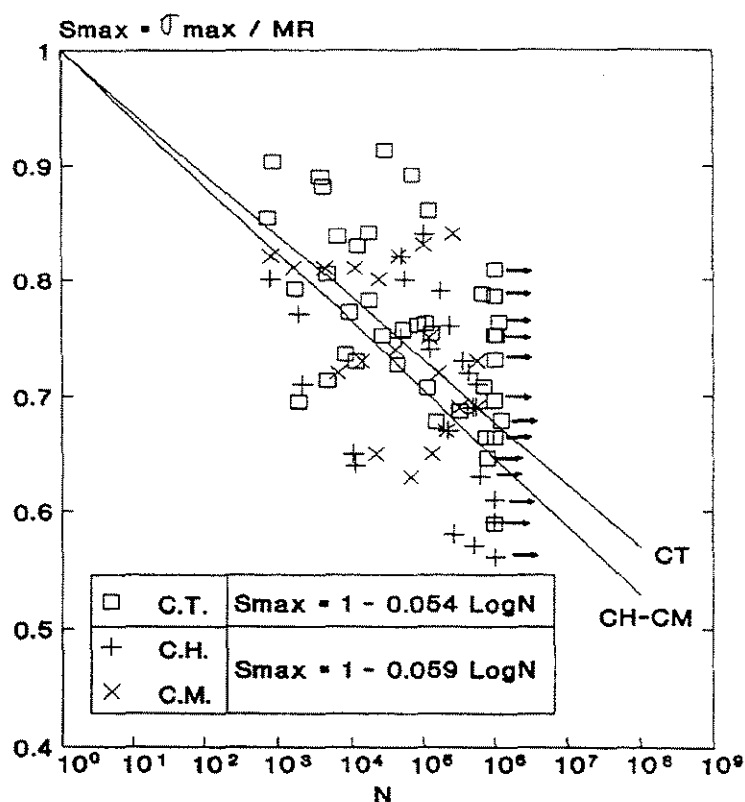
$$2) \text{ Para } 0,45 \leq R_T \leq 0,55 \quad N = \left( \frac{4,2577}{R_T - 0,4325} \right)^{3,268};$$

$$3) \text{ Para } R_T > 0,55 \quad \log N = \frac{0,9718 - R_T}{0,0828}$$

Sobre o assunto, Hilsdorf (6) realizou uma série de pesquisas cujos objetivos principais foram os de investigar o comportamento do concreto sob repetições de carga quando esta variava durante o teste ou quando os ciclos de repetições de carga eram interrompidos por período de descanso. O resultado deste estudo está na figura 4.18, junto com a curva proposta pela PCA.



**Figura 4.18.** Curva de fadiga.  
Fonte: PITTA (14).



**Figura 4.19.** Resultados dos ensaios de flexotração cíclicos.  
Fonte: VALENZUELA (22).

Ainda sobre o assunto, temos o trabalho apresentado por Valenzuela (22) que apresenta os resultados dos ensaios realizados a flexotração cíclica, tanto em amostras preparadas em laboratório como de amostras retiradas do campo.

Para representar as diferenças entre o controle da obra e a realidade de campo, foram preparados dois grupos de amostras, a única diferença estabelecida foi o método de cura. O primeiro grupo de amostras foi curado em câmara úmida (amostras CH) enquanto que no segundo grupo foi aplicado um produto químico e, em seguida, as amostras foram submetidas às condições ambientais (amostras CM).

Para estudar o comportamento dos pavimentos em serviço, retiraram-se amostras que foram transformadas em vigotas de (0,15 x 0,15 x 0,53)m (amostras CT). Do total de amostras, 25% se destinou a ensaios estáticos, 50% a ensaios cíclicos e os 25% restantes foi guardado para utilização posterior.

Com as amostras ensaiadas de forma estática, se obteve a resistência à tração na flexão

ou módulo de ruptura (MR) do concreto. Os ensaios cíclicos se realizaram até a ruptura da amostra ou até completar 1.000.000 de ciclos de carga.

A figura 4.19 mostra os resultados obtidos nos ensaios cíclicos com os três tipos de amostra, e que, para uma relação de tensão de 0,56, o número de repetições de carga é ilimitado.

Como se pode notar, a curva de fadiga apresentada pela PCA é a que está em desacordo com os resultados obtidos por Hilsdorf e Valenzuela, visto que, para uma repetição de carga de  $10^7$  é necessário uma relação de tensões de 0,45 pela curva da PCA e, de 0,60 pelas curvas apresentadas por Hilsdorf e Valenzuela.

Neste capítulo tivemos a oportunidade de apresentar algumas considerações importantes, cuja compreensão é de vital importância para o dimensionamento dos pavimentos de concreto.

## 5. OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

### 5.1. GENERALIDADES

Dimensionar um pavimento rígido consiste na determinação da espessura da placa de concreto, de forma que essa placa seja suficiente para resistir aos esforços provenientes das cargas do tráfego e das condições climáticas, que agem sobre o pavimento.

Os métodos de dimensionamento abordados neste capítulo, são os recomendados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER (5), assim como é também utilizado o dimensionamento de pavimentos estruturalmente armados.

#### *5.1.1. Características do tráfego*

O tráfego a ser considerado, para efeito da determinação das espessuras dos pavimentos de concreto, terá as seguintes características:

A) Tipo de veículos e peso máximo por eixo

|                          |   |                            |         |
|--------------------------|---|----------------------------|---------|
| caminhões médios<br>(2C) | { | eixo dianteiro             | : 5 tf  |
|                          |   | eixo traseiro (roda dupla) | : 10 tf |

$$\begin{array}{l} \text{caminhões pesados} \left\{ \begin{array}{ll} \text{eixo dianteiro} & : 5 \text{ tf} \\ \text{eixo traseiro (tandem duplo)} & : 17 \text{ tf} \end{array} \right. \\ (3C) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{semi - reboques} \left\{ \begin{array}{ll} \text{eixo dianteiro} & : 5 \text{ tf} \\ \text{eixo intermediário (rodas dupla)} & : 10 \text{ tf} \\ \text{eixo traseiro (tandem triplo)} & : 25,5 \text{ tf} \end{array} \right. \\ (2S_3) \end{array}$$

## B) Classificação e distribuição

Tráfego 1: 30 veículos comerciais por dia por faixa de tráfego.

$$\begin{array}{ll} \text{caminhões médios (2C)} & : 25 \\ \text{caminhões pesados (3C)} & : \frac{5}{30} \end{array}$$

Tráfego 2: 100 veículos comerciais por dia por faixa de tráfego.

$$\begin{array}{ll} \text{caminhões médios (2C)} & : 60 \\ \text{caminhões pesados (3C)} & : 30 \\ \text{semi - reboques (2S}_3\text{)} & : \frac{10}{100} \end{array}$$

Tráfego 3: 300 veículos comerciais por dia por faixa de tráfego

$$\begin{array}{ll} \text{caminhões médios (2C)} & : 170 \\ \text{caminhões pesados (3C)} & : 100 \\ \text{semi - reboques (2S}_3\text{)} & : \frac{30}{300} \end{array}$$

Tráfego 4: 1.000 veículos comerciais por dia por faixa de tráfego.

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| caminhões médios (2C)              | : 450        |
| caminhões pesados (3C)             | : 350        |
| semi - reboques (2S <sub>3</sub> ) | : <u>200</u> |
|                                    | 1000         |

Tráfego 5: 2000 veículos comerciais por dia por faixa de tráfego.

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| caminhões médios (2C)              | : 900        |
| caminhões pesados (3C)             | : 700        |
| semi - reboques (2S <sub>3</sub> ) | : <u>400</u> |
|                                    | 2000         |

#### 5.1.1.1. Cálculo das solicitações por eixo para um período de projeto de 20 anos

##### Tráfego 1

Sejam  $N_{cm}$  ;  $N_{cp}$  os números de solicitações dos caminhões médios e pesados, respectivamente.

$$N_{cm} = 365 \times 20 \times 25 = 182.500 \text{ (1)}$$

$$N_{cp} = 365 \times 20 \times 5 = 36.500 \text{ (2)}$$

Resumo das solicitações por eixo.

$$\text{Eixo simples dianteiro } 5 \text{ tf} = 219.000 \text{ (1 + 2)}$$

$$\text{Eixo simples traseiro } 10 \text{ tf} = 182.500 \text{ (1)}$$

$$\text{Eixo tandem duplo } 17 \text{ tf} = 36.500 \text{ (2)}$$

### Tráfego 2

Sejam  $N_{cm}$ ,  $N_{cp}$  e  $N_R$  os números de solicitações dos caminhões médios, pesados e semi-reboques, respectivamente.

$$N_{cm} = 365 \times 20 \times 60 = 438.000 \text{ (1)}$$

$$N_{cp} = 365 \times 20 \times 30 = 219.000 \text{ (2)}$$

$$N_R = 365 \times 20 \times 10 = 73.000 \text{ (3)}$$

Resumo das solicitações por eixo.

$$\text{Eixo simples} \quad 5 \text{ tf} = 730.000 \text{ (1 + 2 + 3)}$$

$$\text{Eixo simples} \quad 10 \text{ tf} = 511.000 \text{ (1 + 3)}$$

$$\text{Eixo tandem duplo} \quad 17 \text{ tf} = 219.000 \text{ (2)}$$

$$\text{Eixo tandem triplo} \quad 25,5 \text{ tf} = 73.000 \text{ (3)}$$

### Tráfego 3

$$N_{cm} = 365 \times 20 \times 170 = 1.241.000 \text{ (1)}$$

$$N_{cp} = 365 \times 20 \times 100 = 780.000 \text{ (2)}$$

$$N_R = 365 \times 20 \times 30 = 219.000 \text{ (3)}$$

Resumo das solicitações por eixo.

$$\text{Eixo simples} \quad 5 \text{ tf} = 2.190.000 \text{ (1 + 2 + 3)}$$

$$\text{Eixo simples} \quad 10 \text{ tf} = 1.460.000 \text{ (1 + 3)}$$

$$\text{Eixo tandem duplo} \quad 17 \text{ tf} = 730.000 \text{ (2)}$$

$$\text{Eixo tandem triplo} \quad 25,5 \text{ tf} = 219.000 \text{ (3)}$$

### Tráfego 4

$$N_{cm} = 365 \times 20 \times 450 = 3.285.000 \text{ (1)}$$

$$N_{cp} = 365 \times 20 \times 350 = 2.555.000 \text{ (2)}$$

$$N_R = 365 \times 20 \times 200 = 1.460.000 \text{ (3)}$$

#### Resumo das solicitações por eixo

|                    |           |           |             |
|--------------------|-----------|-----------|-------------|
| Eixo simples       | 5 tf =    | 7.300.000 | (1 + 2 + 3) |
| Eixo simples       | 10 tf =   | 4.745.000 | (1 + 3)     |
| Eixo tandem duplo  | 17 tf =   | 2.555.000 | (2)         |
| Eixo tandem triplo | 25,5 tf = | 1.460.000 | (3)         |

#### Tráfego 5

$$N_{cm} = 365 \times 20 \times 900 = 6.570.000 \text{ (1)}$$

$$N_{cp} = 365 \times 20 \times 700 = 5.110.000 \text{ (2)}$$

$$N_R = 365 \times 20 \times 400 = 2.920.000 \text{ (3)}$$

#### Resumo das solicitações por eixo.

|                    |           |            |             |
|--------------------|-----------|------------|-------------|
| Eixo simples       | 5 tf =    | 14.600.000 | (1 + 2 + 3) |
| Eixo simples       | 10 tf =   | 9.490.000  | (1 + 3)     |
| Eixo tandem duplo  | 17 tf =   | 5.110.000  | (2)         |
| Eixo tandem triplo | 25,5 tf = | 2.920.000  | (3)         |

### 5.1.2. Características do subleito e do concreto

#### 5.1.2.1. Características do subleito

Para efeito do dimensionamento foram considerados os valores de 40 MPa/m, 80 MPa/m, 100 MPa/m e 150 MPa/m para os módulos de reação do sistema subleito – sub-base, assim obtidos:

|                         |                                                                                                                                                                              |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $k = 40 \text{ MPa/m}$  | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Subleito com CBR} = 5\% \text{ e sub-base} \\ \text{granular com espessura de } 10 \text{ cm;} \end{array} \right.$                          |
| $k = 60 \text{ MPa/m}$  | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Subleito com CBR} = 8,5\% \text{ e sub-base} \\ \text{granular com espessura de } 15 \text{ cm;} \end{array} \right.$                        |
| $k = 80 \text{ MPa/m}$  | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Subleito com CBR} = 5,0\% \text{ e sub-base} \\ \text{tratada com cimento com espessura} \\ \text{de } 12,5 \text{ cm;} \end{array} \right.$ |
| $k = 100 \text{ MPa/m}$ | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Subleito com CBR} = 5\% \text{ e sub-base} \\ \text{tratada com cimento com espessura} \\ \text{de } 15,0 \text{ cm;} \end{array} \right.$   |
| $k = 150 \text{ MPa/m}$ | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Subleito com CBR} = 8\% \text{ e sub-base} \\ \text{tratada com cimento com espessura} \\ \text{de } 20,0 \text{ cm;} \end{array} \right.$   |

#### 5.1.2.2. Característica do concreto

Para o dimensionamento dos pavimentos rígidos, a principal característica do concreto é a resistência característica à tração na flexão ( $F_{ctM,k}$ ), ou módulo de ruptura ( $M_R$ ). No entanto, com a intenção de observar o efeito desta característica no dimensionamento dos pavimentos, adotou-se, para os módulos de ruptura, os valores de 4,1 MPa, 4,5 MPa e 5,0 MPa.

#### 5.1.3. Metodologia usada no dimensionamento

Visando analisar os resultados obtidos através dos diversos métodos, foi necessário proceder-se variações dos parâmetros que estão diretamente ligados a cada método e, em seguida, comparar os resultados obtidos.

A metodologia utilizada para a verificação da sensibilidade de cada método foi realizada

pela combinação dos parâmetros tráfego, módulo de reação do subleito ( $k$ ) e do módulo de ruptura ( $M_R$ ). As combinações foram feitas conforme o esquema:

Por exemplo:

Para o tráfego 1.

|           |                         |                         |
|-----------|-------------------------|-------------------------|
| Tráfego 1 | $k = 40 \text{ MPa/m}$  | $M_R = 4,1 \text{ MPa}$ |
|           |                         | $M_R = 4,5 \text{ MPa}$ |
|           |                         | $M_R = 5,0 \text{ MPa}$ |
|           | $k = 60 \text{ MPa/m}$  | $M_R = 4,1 \text{ MPa}$ |
|           |                         | $M_R = 4,5 \text{ MPa}$ |
|           |                         | $M_R = 5,0 \text{ MPa}$ |
|           | $k = 150 \text{ MPa/m}$ | $M_R = 4,1 \text{ MPa}$ |
|           |                         | $M_R = 4,5 \text{ MPa}$ |
|           |                         | $M_R = 5,0 \text{ MPa}$ |

Para os demais tráfegos o procedimento foi o mesmo.

## 5.2. O método da PCA-66

Este método foi publicado no ano de 1966, pela “Portland Cement Association (PCA)”, baseado nos estudos teóricos de Westergaard, Pickett e Ray e outros pesquisadores.

Para o dimensionamento através deste método, são levados em consideração as propriedades do concreto, o suporte da fundação, fatores de segurança de carga e as tensões produzidas pelas cargas, assuntos tratados no item 4. O método leva também em consideração o consumo de resistência à fadiga ( $C_{RF}$ ), que é a relação porcentual entre o número previsto de repetições de uma dada carga e o número admissível de repetições da mesma carga. Somando todos os  $C_{RF}$  individuais, em todas as categorias de eixo, obtém-se o consumo total de resistência à fadiga para uma certa espessura; para que esta espessura seja adequada, é necessário que o  $C_{RF}$  total seja igual ou inferior a 125%. No entanto, o DNER e a ABCP consideram nos seus projetos

um valor máximo de 100%.

As seqüências que devem ser seguidas no dimensionamento são:

- 1 – Definição das variáveis de dimensionamento.
  - Resistência característica à tração na flexão aos 28 dias, no mínimo, ou de 90 dias, no máximo;
  - Coeficiente de recalque do sistema subleito – sub-base;
  - O tráfego esperado para cada nível de carga e de acordo com a vida de projeto da estrada.
- 2 – Adoção de uma espessura-tentativa e o preenchimento dos dados do quadro 5.1;
- 3 – Determinar as tensões na placa devido às cargas por eixos simples, tandem duplos e tandem triplo, através das figuras 5.1, 5.2 e 5.3;
- 4 – Determinar a relação de tensões;
- 5 – Determinar o número admissível de repetições de carga através do quadro 5.2 e lançar na coluna 5 do quadro 5.1;
- 6 – Lançar na coluna 6 do quadro 5.1 o número de repetições previstas para cada tipo de eixo;
- 7 – Calcular o consumo de resistência à fadiga para cada carga, em porcentagem, dividindo a coluna 6 pela 5, colocando os valores obtidos na coluna 7;
- 8 – A soma da coluna 7 é o consumo total de resistência à fadiga; se o consumo for no máximo 100% adota-se a espessura considerada, caso contrário, aumenta-se a espessura e os cálculos são reiniciados a partir do item 2.

### ***5.2.1. Cálculo das espessuras***

As espessuras foram calculadas levando-se em conta dois fatores de carga,  $F_{SC} = 1,0$  e  $F_{SC} = 1,2$ . As cargas por eixo e o número de solicitações são os considerados, respectivamente nos itens 5.1.1 e 5.1.1.1 deste capítulo. Os resultados obtidos estão no quadro 5.3.

**Quadro 5.1.. Cálculo da espessura de pavimentos de concreto**

PROJETO \_\_\_\_\_

SUBLEITO: K subl. \_\_\_\_\_ MPa/m TIPO DE SUB-BASE \_\_\_\_\_ ESPESSURA \_\_\_\_\_ cm

SISTEMA SUBLEITO SUB-BASE: Ksist. \_\_\_\_\_ MPa/m Fsc: \_\_\_\_\_

| (1)                          | (2)                     | (3)                | (4)                      | (5)                                | (6)                              | (7)                                                            |
|------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| CARGA<br>POR<br>EIXO         | CARGA POR<br>EIXO x Fsc | TENSÃO NA<br>PLACA | RELAÇÃO<br>DE<br>TENSÕES | Nº DE<br>REPETIÇÕES<br>ADMISSÍVEIS | Nº DE<br>REPETIÇÕES<br>PREVISTAS | CONSUMO DE<br>RESISTÊNCIA A<br>FADIGA COL6:<br>COL5x100<br>(%) |
| (tf)                         | (tf)                    | (MPa)              | (nº)                     | (nº)                               | (nº)                             | (%)                                                            |
| ESPESSURA TENTATIVA _____ cm |                         |                    |                          | F <sub>ctM,k</sub> _____ MPa       |                                  |                                                                |

**EIXOS SIMPLES**

|  |  |  |  |  |          |  |
|--|--|--|--|--|----------|--|
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  | Subtotal |  |

**EIXOS TANDEM DUPLOS**

|  |  |  |  |  |          |  |
|--|--|--|--|--|----------|--|
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  | Subtotal |  |

**EIXOS TANDEM TRIPLOS**

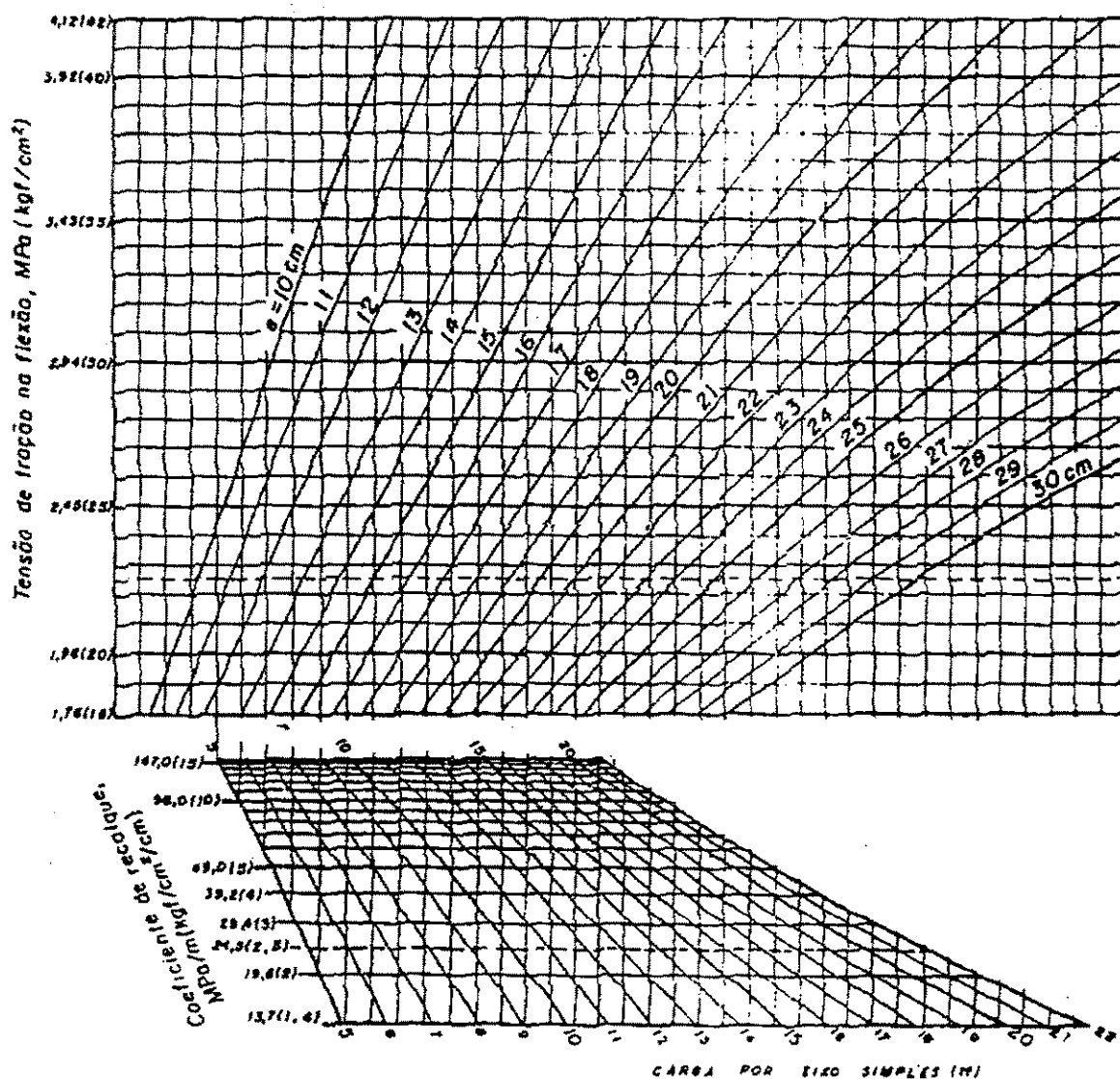
|  |  |  |  |  |          |  |
|--|--|--|--|--|----------|--|
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  |          |  |
|  |  |  |  |  | Subtotal |  |
|  |  |  |  |  | TOTAL    |  |

**Quadro 5.2.** Relação de tensões e número admissível de repetições de carga.

| Relação de Tensões<br>(*) | Nº admissível de<br>repetições de carga | Relação de tensões | Nº admissível de<br>repetições de carga |
|---------------------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| 0,50                      | Ilimitado                               | 0,68               | 3.500                                   |
| 0,51                      | 400.000                                 | 0,69               | 2.500                                   |
| 0,52                      | 300.000                                 | 0,70               | 2.000                                   |
| 0,53                      | 240.000                                 | 0,71               | 1.500                                   |
| 0,54                      | 180.000                                 | 0,72               | 1.100                                   |
| 0,55                      | 130.000                                 | 0,73               | 850                                     |
| 0,56                      | 100.000                                 | 0,74               | 650                                     |
| 0,57                      | 75.000                                  | 0,75               | 490                                     |
| 0,58                      | 57.000                                  | 0,76               | 360                                     |
| 0,59                      | 42.000                                  | 0,77               | 270                                     |
| 0,60                      | 32.000                                  | 0,78               | 210                                     |
| 0,61                      | 24.000                                  | 0,79               | 160                                     |
| 0,62                      | 18.000                                  | 0,80               | 120                                     |
| 0,63                      | 14.000                                  | 0,81               | 90                                      |
| 0,64                      | 11.000                                  | 0,82               | 70                                      |
| 0,65                      | 8.000                                   | 0,83               | 50                                      |
| 0,66                      | 6.000                                   | 0,84               | 40                                      |
| 0,67                      | 4.500                                   | 0,85               | 30                                      |

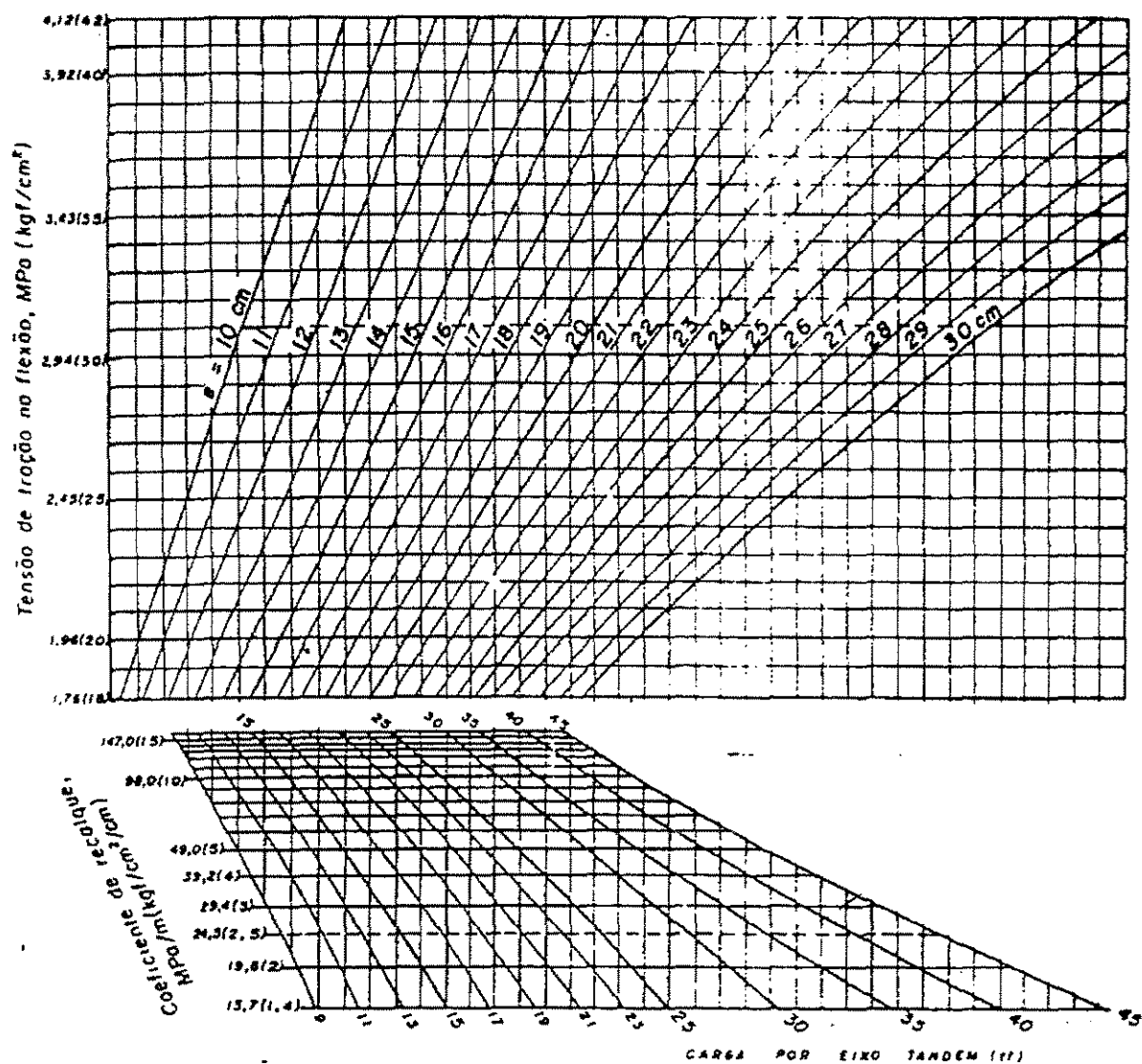
(\*) Igual à tensão de tração na flexão devida à carga dividida pela resistência característica à tração na flexão do concreto.

Fonte: DNER (5).



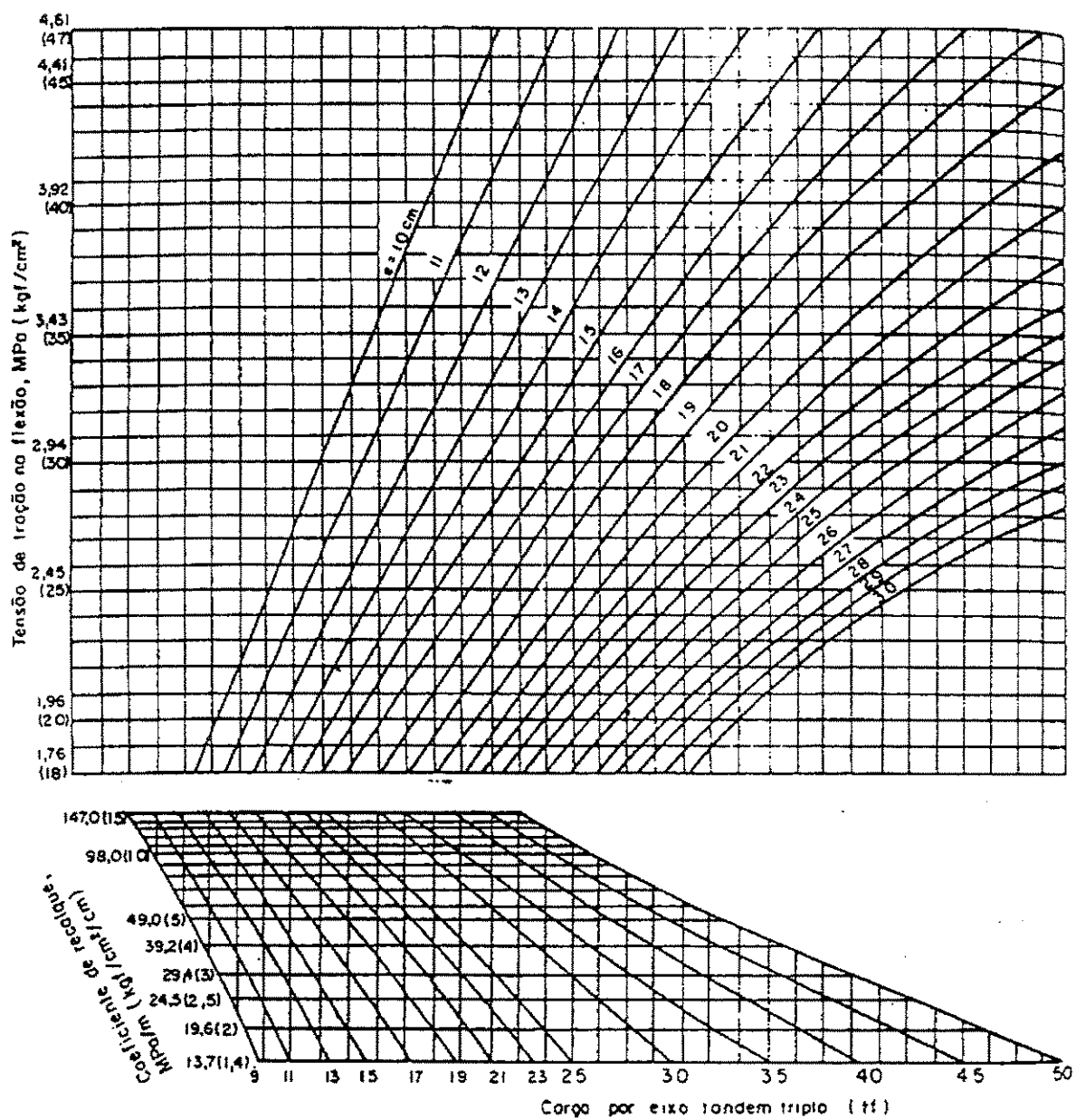
**Figura 5.1.** Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos simples).

Fonte: DNER (5).



**Figura 5.2.** Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos tandem duplos).

Fonte: DNER (5)



**Figura 5.3.** Ábaco para dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (caso de eixos tandem triplos).

Fonte: DNER (5).

**Quadro 5.3. Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-66**

| MR      | 4.1                 |                     |                     |                     |                     | 4.5                 |                     |                     |                     |                     | 5.0                 |                     |                     |                     |                     |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Tráfego | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   |
| k       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| 40      | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> |
| 60      | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 17,0 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> |
| 80      | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 17,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> |
| 100     | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 14,0 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 15,5 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> |
| 150     | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 14,0 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 13,0 <sup>(1)</sup> | 13,5 <sup>(1)</sup> | 13,5 <sup>(1)</sup> | 13,5 <sup>(1)</sup> | 13,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 16,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 15,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 14,5 <sup>(2)</sup> | 15,0 <sup>(2)</sup> | 15,0 <sup>(2)</sup> | 15,0 <sup>(2)</sup> | 15,0 <sup>(2)</sup> |

1) Espessuras obtidas para Fsc = 1,0

2) Espessuras obtidas para Fsc = 1,2

### 5.3. O método da PCA-84

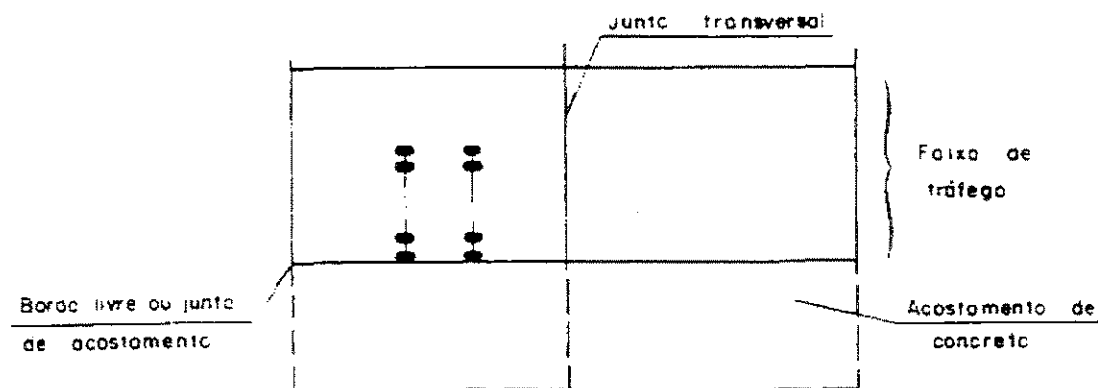
#### 5.3.1. Generalidades

Este método, publicado no ano de 1984, difere profundamente da versão de 1966, fundamentada exclusivamente na fadiga do concreto, além disso, esta metodologia é aplicada tanto a pavimentos de concreto simples e com barras de transferência, quanto aos pavimentos com armadura distribuída, contínua ou descontínua, e introduziu o dano por erosão da fundação e usa ao mesmo tempo o modelo de fadiga. Através deste método é possível combinar diferentes situações de projeto, permitindo a análise de várias alternativas.

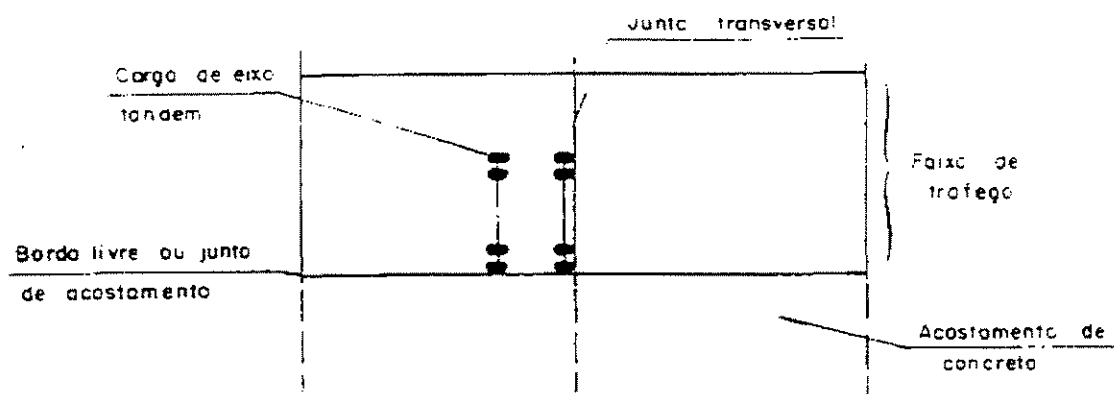
Das variáveis que estão incorporadas no método serão tratadas apenas da fadiga, da erosão, dos acostamentos de concreto e da distribuição de tráfego.

##### 5.3.1.1. Fadiga

O critério de fadiga utilizado pelo método é semelhante ao do método PCA-66, havendo, entretanto, duas importantes alterações: 1) as tensões de tração por flexão passam a ser consideradas pela passagem da carga, tangenciando a borda longitudinal e não mais a junta transversal, veja figura 5.4; 2) a curva de fadiga anterior foi prolongada até alcançar a relação de tensões mínima de 0,45, abaixo da qual as repetições admissíveis de carga são ilimitadas, conforme mostra a figura 4.18. Este prolongamento na curva de fadiga produziu um aumento na espessura da placa de concreto de 3,0 cm para um tráfego de 100 veículos comerciais por dia.



(a) Posição de carga crítica para as tensões de tração na flexão



(b) Posição de carga crítica para as deformações

**Figura 5.4.** Posições críticas de carga.

Fonte: DNER (5).

### 5.3.1.2. Erosão

Entende-se por erosão a perda de material do topo da camada imediatamente abaixo da placa de concreto, por ação combinada da água e da passagem das cargas pesadas, principalmente dos eixos múltiplos, ocorrendo o mesmo nas laterais do pavimento e não somente nas juntas transversais.

Os efeitos da erosão são manifestados pelas deformações verticais críticas, que podem ocorrer nos cantos e nas bordas longitudinais livre das placas e produzem degraus nas juntas

transversais, principalmente nos pavimentos sem barras de transferência. Estes efeitos podem ocorrer pelo bombeamento ou pela perda de suporte do subleito.

Segundo Pitta (14), o fator de erosão (P) provém de dados experimentais que apresentaram um índice de serventia final igual a 3,0, que é um valor relativamente alto, o que provoca uma tendência ao superdimensionamento.

Conforme PCA (16), o critério da erosão foi sugerido como um guia básico, podendo ser modificado de acordo com a experiência local. Além disso, o limite recomendado, para dano total de 100%, pode ser aumentado ou diminuído dependendo das condições de clima e da eficácia da drenagem.

#### 5.3.1.3. Acostamentos de concreto

Já é conhecido que os acostamentos de concreto têm muita influência na redução das deformações verticais ao longo da borda do pavimento. O modelo estrutural leva em conta uma eficiência de junta da ordem de 65%, no caso de haver ligação entre o acostamento e a pista. A utilização dos acostamentos de concreto deverá ser analisada também do ponto de vista econômico, pois nem sempre a sua utilização será recomendada economicamente, como veremos adiante.

#### 5.3.1.4. Distribuição do tráfego

As cargas de rodas dos caminhões colocadas no bordo externo do pavimento criam condições mais severas do que em qualquer outra posição da carga. Como os caminhões se movem para o interior a alguns centímetros do bordo, os efeitos diminuem substancialmente.

Diversos estudos têm demonstrado que é pequeno o número de caminhões que trafegam nas proximidades do bordo longitudinal de um pavimento; levando-se em conta tal fato, o método

considerou, para efeito dos cálculos da tensão equivalente e do fator de erosão, uma porcentagem de 6% dos caminhões trafegando nessa posição.

### **5.3.2. Roteiro de dimensionamento**

Para maior facilidade e ordenação, será apresentado um roteiro, onde se descreve a utilização dos quadros e figuras. Os passos são os seguintes:

- 1º. Determinação dos parâmetros de dimensionamento. São considerados parâmetros de dimensionamento: o módulo de ruptura, o coeficiente de recalque, o fator de segurança de carga, o tipo de acostamento, a utilização ou não de barras de transferência e, finalmente, o número de solicitações previstas para cada nível de carga;
- 2º. Adota-se uma espessura do pavimento de concreto e preenchem-se os dados do quadro 5.4;
- 3º. Determina-se a tensão equivalente através dos quadros 5.5 e 5.6 ou 5.7 ou 5.8, conforme o pavimento tenha ou não acostamento de concreto para eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, utilizando a espessura adotada e o coeficiente de recalque do sistema subleito – sub-base “k”, avaliado através das figuras 4.1 a 4.5, transportando os valores encontrados para os campos 8, 11 e 14 do quadro 5.4;
- 4º. Determinam-se os fatores de erosão através dos quadros (5.9 e 5.10), (5.11 e 5.12), (5.13 e 5.14) ou (5.15 e 5.16), de acordo com o tipo de junta considerado e o tipo de acostamento, semelhante ao caso anterior, e transportam-se esses valores para os campos 10, 13 e 16 do quadro 5.4;
- 5º. Calculam-se os fatores de fadiga dos campos 9, 12 e 15 para cada eixo considerado, dividindo as tensões equivalentes pelo módulo de ruptura de projeto;
- 6º. Com o fator de fadiga e as cargas por eixos, determinam-se as repetições admissíveis da coluna 4, através da figura 5.5 (análise da fadiga). Para os eixos tandem triplo são considerados para as determinações das repetições admissíveis

como três eixos simples, cada um sendo igual a um terço da carga total;

- 7º. Com o fator de erosão e as cargas por eixos, determinam-se as repetições admissíveis da coluna 6, através das figuras 5.6 ou 5.7, conforme o pavimento tenha ou não acostamento de concreto;
- 8º. Dividem-se as repetições previstas pelas admissíveis, determinadas tanto da análise de fadiga como da análise de erosão, determinando as porcentagens de consumo de fadiga e o dano por erosão, transportando os valores calculados para as colunas 5 e 7, respectivamente; e
- 9º. Somam-se individualmente as colunas 5 e 7 e verifica-se se a espessura adotada cumpre os requisitos solicitados, caso em que nenhuma das somas das colunas ultrapassem 100%. Caso a espessura adotada seja insuficiente, deve-se repetir os cálculos com uma espessura maior.

A seguir, apresentam-se os quadros e as figuras necessários para o cálculo.

**Quadro 5.4.. Cálculo da espessura de pavimentos de concreto**

PROJETO \_\_\_\_\_

Espessura-tentativa \_\_\_\_\_ mm      Juntas com BT      sim \_\_\_\_\_ não \_\_\_\_\_  
 $k_{sist.}$  \_\_\_\_\_ MPa/m      Acostamento de concreto      sim \_\_\_\_\_ não \_\_\_\_\_  
 Módulo de ruptura,  $M_R$  \_\_\_\_\_ MPa      Período de projeto \_\_\_\_\_ anos  
 Fator de segurança de cargas,  $F_{sc}$  \_\_\_\_\_

| Cargas por eixo, tf | Cargas por eixo x $F_{sc}$ | Número de repetições previstas | ANÁLISE DE FADIGA                |                       | ANÁLISE DE EROSÃO                |                      |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------|
|                     |                            |                                | Número de repetições admissíveis | Consumo de fadiga (%) | Número de repetições admissíveis | Danos por erosão (%) |
| 1                   | 2                          | 3                              | 4                                | 5                     | 6                                | 7                    |

EIXOS SIMPLES

8- Tensão equivalente \_\_\_\_\_ 10-Fator de erosão \_\_\_\_\_

9- Fator de fadiga \_\_\_\_\_

|  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

EIXOS TANDEM DUPLOS

11- Tensão equivalente \_\_\_\_\_ 13-Fator de erosão \_\_\_\_\_

12- Fator de fadiga \_\_\_\_\_

|  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

EIXOS TANDEM TRIPLOS

14- Tensão equivalente \_\_\_\_\_ 16-Fator de erosão \_\_\_\_\_

15- Fator de fadiga \_\_\_\_\_

|  |  |  |       |  |       |  |
|--|--|--|-------|--|-------|--|
|  |  |  |       |  |       |  |
|  |  |  |       |  |       |  |
|  |  |  |       |  |       |  |
|  |  |  |       |  |       |  |
|  |  |  |       |  |       |  |
|  |  |  |       |  |       |  |
|  |  |  | TOTAL |  | TOTAL |  |

**Quadro 5.5.** Tensão equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (MPa) PSAC (pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5).

| Espes-<br>sura<br>da<br>Placa<br>(cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                       | 20                                  |      | 40   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 150  |      | 180  |      |
|                                       | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                                    | 4,30                                | 5,56 | 3,78 | 3,01 | 3,51 | 2,81 | 3,31 | 2,68 | 3,17 | 2,57 | 2,91 | 2,43 | 2,74 | 2,35 |
| 13                                    | 3,84                                | 2,33 | 3,38 | 2,73 | 3,14 | 2,53 | 2,97 | 2,40 | 2,84 | 2,30 | 2,61 | 2,16 | 2,46 | 2,08 |
| 14                                    | 3,46                                | 2,96 | 3,05 | 2,49 | 2,83 | 2,29 | 2,68 | 2,16 | 2,56 | 2,08 | 2,37 | 1,94 | 2,23 | 1,85 |
| 15                                    | 3,14                                | 2,72 | 2,27 | 2,29 | 2,57 | 2,09 | 2,44 | 1,97 | 2,33 | 1,88 | 2,16 | 1,75 | 2,04 | 1,67 |
| 16                                    | 2,87                                | 2,52 | 2,53 | 2,12 | 2,35 | 1,93 | 2,23 | 1,81 | 2,13 | 1,73 | 1,97 | 1,60 | 1,87 | 1,52 |
| 17                                    | 2,63                                | 2,35 | 2,33 | 1,97 | 2,16 | 1,79 | 2,05 | 1,67 | 1,96 | 1,60 | 1,81 | 1,47 | 1,72 | 1,39 |
| 18                                    | 2,43                                | 2,20 | 2,15 | 1,84 | 1,99 | 1,66 | 1,89 | 1,55 | 1,81 | 1,48 | 1,68 | 1,36 | 1,59 | 1,28 |
| 19                                    | 2,25                                | 2,07 | 1,99 | 1,72 | 1,85 | 1,56 | 1,75 | 1,45 | 1,68 | 1,38 | 1,56 | 1,26 | 1,48 | 1,19 |
| 20                                    | 2,10                                | 1,95 | 1,85 | 1,62 | 1,72 | 1,46 | 1,64 | 1,36 | 1,56 | 1,29 | 1,45 | 1,18 | 1,38 | 1,11 |
| 21                                    | 1,96                                | 1,85 | 1,73 | 1,53 | 1,61 | 1,38 | 1,52 | 1,29 | 1,46 | 1,22 | 1,36 | 1,11 | 1,28 | 1,04 |
| 22                                    | 1,83                                | 1,75 | 1,62 | 1,45 | 1,50 | 1,31 | 1,42 | 1,22 | 1,37 | 1,15 | 1,28 | 1,05 | 1,20 | 0,98 |
| 23                                    | 1,72                                | 1,67 | 1,52 | 1,38 | 1,41 | 1,24 | 1,33 | 1,15 | 1,28 | 1,09 | 1,20 | 0,99 | 1,13 | 0,92 |
| 24                                    | 1,62                                | 1,59 | 1,43 | 1,31 | 1,33 | 1,18 | 1,25 | 1,10 | 1,21 | 1,04 | 1,13 | 0,94 | 1,07 | 0,88 |
| 25                                    | 1,53                                | 1,52 | 1,35 | 1,25 | 1,26 | 1,12 | 1,19 | 1,05 | 1,14 | 0,99 | 1,07 | 0,89 | 1,01 | 0,83 |
| 26                                    | 1,45                                | 1,45 | 1,28 | 1,20 | 1,19 | 1,07 | 1,13 | 1,00 | 1,08 | 0,94 | 1,01 | 0,85 | 0,95 | 0,80 |
| 27                                    | 1,33                                | 1,39 | 1,21 | 1,15 | 1,13 | 1,03 | 1,07 | 0,95 | 1,03 | 0,90 | 0,95 | 0,81 | 0,90 | 0,76 |
| 28                                    | 1,31                                | 1,34 | 1,15 | 1,10 | 1,07 | 0,99 | 1,02 | 0,91 | 0,98 | 0,86 | 0,90 | 0,78 | 0,86 | 0,73 |
| 29                                    | 1,25                                | 1,29 | 1,10 | 1,06 | 1,02 | 0,95 | 0,97 | 0,88 | 0,93 | 0,83 | 0,86 | 0,75 | 0,82 | 0,69 |
| 30                                    | 1,19                                | 1,24 | 1,05 | 1,02 | 0,97 | 0,91 | 0,92 | 0,85 | 0,89 | 0,80 | 0,82 | 0,72 | 0,78 | 0,66 |
| 31                                    | 1,13                                | 1,20 | 1,00 | 0,99 | 0,93 | 0,88 | 0,88 | 0,81 | 0,84 | 0,77 | 0,78 | 0,69 | 0,74 | 0,64 |
| 32                                    | 1,09                                | 1,16 | 0,96 | 0,95 | 0,89 | 0,85 | 0,84 | 0,78 | 0,80 | 0,74 | 0,75 | 0,67 | 0,71 | 0,62 |
| 33                                    | 1,04                                | 1,12 | 0,92 | 0,92 | 0,85 | 0,82 | 0,80 | 0,76 | 0,77 | 0,71 | 0,72 | 0,64 | 0,68 | 0,60 |
| 34                                    | 1,00                                | 1,08 | 0,88 | 0,89 | 0,81 | 0,79 | 0,77 | 0,73 | 0,73 | 0,69 | 0,69 | 0,62 | 0,66 | 0,58 |

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

**Quadro 5.6.** Tensão equivalente para Eixos Tandem Triplos (MPa) PSAC (pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5).

| Espes-<br>sura<br>da<br>Placa<br>(cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                       | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |
|                                       | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                                    | 2,60                                | 2,30 | 2,20 | 2,14 | 2,08 | 2,07 |
| 13                                    | 2,35                                | 2,04 | 1,93 | 1,87 | 1,80 | 1,78 |
| 14                                    | 2,15                                | 1,83 | 1,72 | 1,65 | 1,58 | 1,55 |
| 15                                    | 1,99                                | 1,67 | 1,55 | 1,48 | 1,40 | 1,37 |
| 16                                    | 1,85                                | 1,54 | 1,41 | 1,34 | 1,25 | 1,23 |
| 17                                    | 1,73                                | 1,43 | 1,30 | 1,23 | 1,14 | 1,11 |
| 18                                    | 1,62                                | 1,34 | 1,21 | 1,14 | 1,04 | 1,01 |
| 19                                    | 1,53                                | 1,26 | 1,13 | 1,06 | 0,96 | 0,92 |
| 20                                    | 1,45                                | 1,19 | 1,07 | 0,99 | 0,89 | 0,85 |
| 21                                    | 1,37                                | 1,13 | 1,01 | 0,93 | 0,83 | 0,79 |
| 22                                    | 1,30                                | 1,07 | 0,95 | 0,88 | 0,78 | 0,74 |
| 23                                    | 1,24                                | 1,02 | 0,91 | 0,84 | 0,73 | 0,70 |
| 24                                    | 1,18                                | 0,97 | 0,87 | 0,80 | 0,69 | 0,66 |
| 25                                    | 1,13                                | 0,93 | 0,83 | 0,76 | 0,66 | 0,62 |
| 26                                    | 1,07                                | 0,89 | 0,79 | 0,73 | 0,63 | 0,59 |
| 27                                    | 1,02                                | 0,86 | 0,76 | 0,70 | 0,60 | 0,57 |
| 28                                    | 0,98                                | 0,82 | 0,73 | 0,67 | 0,58 | 0,54 |
| 29                                    | 0,93                                | 0,79 | 0,71 | 0,65 | 0,55 | 0,52 |
| 30                                    | 0,89                                | 0,76 | 0,68 | 0,63 | 0,53 | 0,50 |
| 31                                    | 0,85                                | 0,73 | 0,66 | 0,60 | 0,51 | 0,48 |
| 32                                    | 0,81                                | 0,70 | 0,63 | 0,58 | 0,50 | 0,46 |
| 33                                    | 0,77                                | 0,68 | 0,61 | 0,56 | 0,48 | 0,45 |
| 34                                    | 0,73                                | 0,65 | 0,59 | 0,55 | 0,46 | 0,43 |

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Quadro 5.7.** Tensão equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (MPa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto). DNER (5).

| Espesura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        | 20                                  |      | 40   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 150  |      | 200  |      |
|                        | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                     | 3,36                                | 2,82 | 2,95 | 2,46 | 2,74 | 2,31 | 2,60 | 2,22 | 2,49 | 2,16 | 2,31 | 2,08 | 2,19 | 2,04 |
| 13                     | 3,02                                | 2,56 | 2,66 | 2,22 | 2,47 | 2,08 | 2,34 | 1,99 | 2,25 | 1,94 | 2,09 | 1,86 | 1,99 | 1,81 |
| 14                     | 2,74                                | 2,34 | 2,41 | 2,02 | 2,24 | 1,89 | 2,13 | 1,80 | 2,05 | 1,75 | 1,91 | 1,67 | 1,82 | 1,62 |
| 15                     | 2,50                                | 2,15 | 2,20 | 1,85 | 2,05 | 1,72 | 1,95 | 1,64 | 1,88 | 1,59 | 1,75 | 1,51 | 1,67 | 1,46 |
| 16                     | 2,29                                | 1,99 | 2,02 | 1,71 | 1,88 | 1,58 | 1,80 | 1,51 | 1,73 | 1,46 | 1,61 | 1,38 | 1,55 | 1,33 |
| 17                     | 2,11                                | 1,85 | 1,86 | 1,58 | 1,74 | 1,46 | 1,66 | 1,39 | 1,60 | 1,34 | 1,49 | 1,26 | 1,43 | 1,21 |
| 18                     | 1,96                                | 1,72 | 1,73 | 1,47 | 1,61 | 1,35 | 1,54 | 1,29 | 1,48 | 1,24 | 1,39 | 1,16 | 1,33 | 1,12 |
| 19                     | 1,82                                | 1,62 | 1,61 | 1,38 | 1,50 | 1,27 | 1,43 | 1,20 | 1,38 | 1,16 | 1,29 | 1,08 | 1,24 | 1,04 |
| 20                     | 1,70                                | 1,52 | 1,50 | 1,29 | 1,40 | 1,19 | 1,34 | 1,13 | 1,29 | 1,08 | 1,21 | 1,01 | 1,16 | 0,97 |
| 21                     | 1,59                                | 1,44 | 1,40 | 1,22 | 1,31 | 1,12 | 1,26 | 1,06 | 1,21 | 1,02 | 1,13 | 0,95 | 1,09 | 0,91 |
| 22                     | 1,49                                | 1,36 | 1,32 | 1,15 | 1,23 | 1,06 | 1,18 | 1,00 | 1,14 | 0,96 | 1,07 | 0,89 | 1,02 | 0,86 |
| 23                     | 1,40                                | 1,29 | 1,24 | 1,09 | 1,16 | 1,00 | 1,11 | 0,95 | 1,07 | 0,91 | 1,01 | 0,84 | 0,97 | 0,81 |
| 24                     | 1,32                                | 1,23 | 1,17 | 1,04 | 1,10 | 0,95 | 1,05 | 0,90 | 1,01 | 0,86 | 0,95 | 0,80 | 0,91 | 0,76 |
| 25                     | 1,25                                | 1,18 | 1,11 | 0,99 | 1,04 | 0,91 | 0,99 | 0,85 | 0,96 | 0,82 | 0,90 | 0,76 | 0,87 | 0,73 |
| 26                     | 1,19                                | 1,12 | 1,05 | 0,95 | 0,98 | 0,87 | 0,94 | 0,81 | 0,91 | 0,78 | 0,86 | 0,72 | 0,82 | 0,69 |
| 27                     | 1,13                                | 1,08 | 1,00 | 0,91 | 0,93 | 0,83 | 0,89 | 0,78 | 0,86 | 0,74 | 0,81 | 0,69 | 0,78 | 0,66 |
| 28                     | 1,07                                | 1,03 | 0,95 | 0,87 | 0,89 | 0,79 | 0,85 | 0,74 | 0,82 | 0,71 | 0,78 | 0,66 | 0,75 | 0,63 |
| 29                     | 1,02                                | 0,99 | 0,91 | 0,84 | 0,85 | 0,76 | 0,81 | 0,71 | 0,78 | 0,68 | 0,74 | 0,63 | 0,71 | 0,60 |
| 30                     | 0,98                                | 0,95 | 0,87 | 0,81 | 0,81 | 0,73 | 0,77 | 0,69 | 0,75 | 0,66 | 0,71 | 0,61 | 0,68 | 0,58 |
| 31                     | 0,93                                | 0,92 | 0,83 | 0,78 | 0,77 | 0,71 | 0,74 | 0,66 | 0,72 | 0,63 | 0,68 | 0,58 | 0,65 | 0,55 |
| 32                     | 0,90                                | 0,89 | 0,79 | 0,75 | 0,74 | 0,68 | 0,71 | 0,64 | 0,69 | 0,61 | 0,65 | 0,56 | 0,62 | 0,53 |
| 33                     | 0,86                                | 0,86 | 0,76 | 0,72 | 0,71 | 0,66 | 0,68 | 0,61 | 0,66 | 0,59 | 0,62 | 0,54 | 0,60 | 0,51 |
| 34                     | 0,83                                | 0,83 | 0,73 | 0,70 | 0,69 | 0,63 | 0,66 | 0,59 | 0,63 | 0,57 | 0,60 | 0,52 | 0,57 | 0,49 |

ES: Eixos Simples  
ETD: Eixos Tandem Duplos

**Quadro 5.8.** Tensão equivalente para Eixos Tandem Triplos (MPa) PCAC (pavimento com acostamento de concreto). DNER (5).

| Espesura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                        | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |
|                        | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                     | 2,20                                | 2,00 | 1,93 | 1,89 | 1,85 | 1,85 |
| 13                     | 1,97                                | 1,78 | 1,70 | 1,66 | 1,61 | 1,61 |
| 14                     | 1,78                                | 1,59 | 1,52 | 1,48 | 1,43 | 1,42 |
| 15                     | 1,62                                | 1,44 | 1,37 | 1,33 | 1,27 | 1,26 |
| 16                     | 1,49                                | 1,32 | 1,24 | 1,20 | 1,15 | 1,13 |
| 17                     | 1,38                                | 1,21 | 1,14 | 1,10 | 1,04 | 1,03 |
| 18                     | 1,28                                | 1,12 | 1,05 | 1,01 | 0,96 | 0,94 |
| 19                     | 1,19                                | 1,04 | 0,98 | 0,94 | 0,88 | 0,86 |
| 20                     | 1,12                                | 0,98 | 0,91 | 0,87 | 0,82 | 0,80 |
| 21                     | 1,05                                | 0,92 | 0,85 | 0,81 | 0,76 | 0,74 |
| 22                     | 0,99                                | 0,86 | 0,80 | 0,76 | 0,71 | 0,69 |
| 23                     | 0,93                                | 0,81 | 0,76 | 0,72 | 0,67 | 0,65 |
| 24                     | 0,88                                | 0,77 | 0,71 | 0,68 | 0,63 | 0,61 |
| 25                     | 0,84                                | 0,73 | 0,68 | 0,64 | 0,59 | 0,57 |
| 26                     | 0,79                                | 0,70 | 0,64 | 0,61 | 0,56 | 0,54 |
| 27                     | 0,75                                | 0,66 | 0,61 | 0,58 | 0,53 | 0,52 |
| 28                     | 0,72                                | 0,63 | 0,59 | 0,56 | 0,51 | 0,49 |
| 29                     | 0,68                                | 0,60 | 0,56 | 0,53 | 0,49 | 0,47 |
| 30                     | 0,65                                | 0,58 | 0,54 | 0,51 | 0,46 | 0,45 |
| 31                     | 0,62                                | 0,55 | 0,51 | 0,49 | 0,44 | 0,43 |
| 32                     | 0,59                                | 0,53 | 0,49 | 0,47 | 0,43 | 0,41 |
| 33                     | 0,57                                | 0,51 | 0,47 | 0,45 | 0,41 | 0,39 |
| 34                     | 0,54                                | 0,49 | 0,46 | 0,43 | 0,39 | 0,38 |

ETT - Eixos Tandem Triplos

**Quadro 5.9.** Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PSAC (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5).

| Espesura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        | 20                                  |      | 40   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 150  |      | 200  |      |
|                        | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                     | 3,72                                | 3,82 | 3,69 | 3,74 | 3,67 | 3,69 | 3,65 | 3,67 | 3,64 | 3,65 | 3,62 | 3,61 | 3,59 | 3,58 |
| 13                     | 3,62                                | 3,75 | 3,59 | 3,66 | 3,57 | 3,61 | 3,55 | 3,59 | 3,54 | 3,57 | 3,52 | 3,52 | 3,49 | 3,49 |
| 14                     | 3,53                                | 3,68 | 3,50 | 3,59 | 3,48 | 3,53 | 3,46 | 3,51 | 3,45 | 3,49 | 3,43 | 3,44 | 3,40 | 3,41 |
| 15                     | 3,45                                | 3,61 | 3,41 | 3,52 | 3,39 | 3,46 | 3,37 | 3,44 | 3,36 | 3,42 | 3,34 | 3,37 | 3,31 | 3,34 |
| 16                     | 3,37                                | 3,55 | 3,33 | 3,46 | 3,31 | 3,40 | 3,29 | 3,37 | 3,28 | 3,35 | 3,26 | 3,30 | 3,23 | 3,26 |
| 17                     | 3,30                                | 3,50 | 3,26 | 3,40 | 3,23 | 3,34 | 3,21 | 3,31 | 3,20 | 3,29 | 3,18 | 3,23 | 3,16 | 3,20 |
| 18                     | 3,23                                | 3,44 | 3,18 | 3,34 | 3,16 | 3,28 | 3,14 | 3,25 | 3,13 | 3,23 | 3,11 | 3,17 | 3,09 | 3,13 |
| 19                     | 3,17                                | 3,39 | 3,12 | 3,29 | 3,09 | 3,23 | 3,07 | 3,19 | 3,06 | 3,17 | 3,04 | 3,11 | 3,02 | 3,07 |
| 20                     | 3,11                                | 3,35 | 3,05 | 3,24 | 3,03 | 3,17 | 3,01 | 3,14 | 3,00 | 3,12 | 2,98 | 3,05 | 2,96 | 3,02 |
| 21                     | 3,05                                | 3,30 | 2,99 | 3,19 | 2,97 | 3,13 | 2,95 | 3,09 | 2,94 | 3,07 | 2,92 | 3,00 | 2,90 | 2,96 |
| 22                     | 3,00                                | 3,26 | 2,94 | 3,15 | 2,91 | 3,08 | 2,89 | 3,04 | 2,88 | 3,02 | 2,86 | 2,95 | 2,84 | 2,91 |
| 23                     | 2,94                                | 3,22 | 2,88 | 3,11 | 2,85 | 3,03 | 2,83 | 2,99 | 2,82 | 2,97 | 2,80 | 2,90 | 2,78 | 2,86 |
| 24                     | 2,90                                | 3,18 | 2,84 | 3,07 | 2,80 | 2,99 | 2,78 | 2,95 | 2,77 | 2,93 | 2,75 | 2,86 | 2,73 | 2,82 |
| 25                     | 2,86                                | 3,14 | 2,78 | 3,03 | 2,76 | 2,96 | 2,73 | 2,91 | 2,72 | 2,89 | 2,70 | 2,82 | 2,68 | 2,78 |
| 26                     | 2,81                                | 3,11 | 2,75 | 2,99 | 2,71 | 2,92 | 2,69 | 2,88 | 2,68 | 2,86 | 2,65 | 2,71 | 2,63 | 2,74 |
| 27                     | 2,77                                | 3,08 | 2,70 | 2,96 | 2,67 | 2,89 | 2,64 | 2,84 | 2,63 | 2,82 | 2,61 | 2,75 | 2,59 | 2,71 |
| 28                     | 2,73                                | 3,05 | 2,66 | 2,93 | 2,62 | 2,85 | 2,60 | 2,81 | 2,59 | 2,79 | 2,56 | 2,71 | 2,54 | 2,67 |
| 29                     | 2,70                                | 3,02 | 2,62 | 2,90 | 2,58 | 2,82 | 2,56 | 2,78 | 2,55 | 2,75 | 2,52 | 2,68 | 2,50 | 2,64 |
| 30                     | 2,66                                | 2,99 | 2,59 | 2,86 | 2,54 | 2,79 | 2,51 | 2,75 | 2,50 | 2,72 | 2,48 | 2,64 | 2,46 | 2,60 |
| 31                     | 2,63                                | 2,96 | 2,55 | 2,83 | 2,50 | 2,76 | 2,48 | 2,72 | 2,47 | 2,69 | 2,44 | 2,61 | 2,42 | 2,57 |
| 32                     | 2,59                                | 2,93 | 2,51 | 2,81 | 2,47 | 2,73 | 2,44 | 2,69 | 2,43 | 2,66 | 2,40 | 2,58 | 2,38 | 2,54 |
| 33                     | 2,56                                | 2,90 | 2,48 | 2,78 | 2,43 | 2,70 | 2,40 | 2,66 | 2,39 | 2,63 | 2,36 | 2,55 | 2,34 | 2,51 |
| 34                     | 2,53                                | 2,88 | 2,45 | 2,75 | 2,40 | 2,67 | 2,37 | 2,63 | 2,36 | 2,60 | 2,32 | 2,52 | 2,30 | 2,48 |

ES: Eixos Simples; ETD: Eixos Tandem Duplos

**Quadro 5.10.** Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PSAC (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5).

| Espesura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                        | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |
|                        | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                     | 3,85                                | 3,75 | 3,70 | 3,66 | 3,57 | 3,53 |
| 13                     | 3,77                                | 3,68 | 3,62 | 3,58 | 3,50 | 3,45 |
| 14                     | 3,70                                | 3,60 | 3,55 | 3,51 | 3,42 | 3,38 |
| 15                     | 3,64                                | 3,54 | 3,48 | 3,44 | 3,36 | 3,32 |
| 16                     | 3,58                                | 3,47 | 3,42 | 3,38 | 3,29 | 3,25 |
| 17                     | 3,52                                | 3,42 | 3,36 | 3,32 | 3,23 | 3,19 |
| 18                     | 3,47                                | 3,36 | 3,30 | 3,26 | 3,18 | 3,14 |
| 19                     | 3,42                                | 3,31 | 3,25 | 3,21 | 3,13 | 3,09 |
| 20                     | 3,37                                | 3,26 | 3,20 | 3,16 | 3,08 | 3,04 |
| 21                     | 3,33                                | 3,22 | 3,16 | 3,11 | 3,03 | 2,99 |
| 22                     | 3,29                                | 3,18 | 3,11 | 3,07 | 2,99 | 2,95 |
| 23                     | 3,25                                | 3,13 | 3,07 | 3,03 | 2,94 | 2,91 |
| 24                     | 3,21                                | 3,10 | 3,03 | 2,99 | 2,90 | 2,86 |
| 25                     | 3,17                                | 3,06 | 2,99 | 2,95 | 2,87 | 2,83 |
| 26                     | 3,14                                | 3,02 | 2,96 | 2,91 | 2,83 | 2,79 |
| 27                     | 3,10                                | 2,99 | 2,92 | 2,88 | 2,79 | 2,75 |
| 28                     | 3,07                                | 2,96 | 2,89 | 2,85 | 2,76 | 2,72 |
| 29                     | 3,04                                | 2,92 | 2,86 | 2,81 | 2,73 | 2,69 |
| 30                     | 3,01                                | 2,89 | 2,83 | 2,78 | 2,69 | 2,65 |
| 31                     | 2,98                                | 2,87 | 2,80 | 2,75 | 2,66 | 2,62 |
| 32                     | 2,96                                | 2,84 | 2,77 | 2,72 | 2,63 | 2,59 |
| 33                     | 2,93                                | 2,81 | 2,74 | 2,70 | 2,61 | 2,57 |
| 34                     | 2,91                                | 2,78 | 2,72 | 2,67 | 2,58 | 2,54 |

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Quadro 5.11.** Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5).

| Espes-<br>sura<br>da<br>Placa<br>(cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                       | 20                                  |      | 40   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 150  |      | 200  |      |
|                                       | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                                    | 3,25                                | 3,29 | 3,20 | 3,19 | 3,18 | 3,13 | 3,17 | 3,11 | 3,16 | 3,09 | 3,13 | 3,04 | 3,11 | 3,03 |
| 13                                    | 3,16                                | 3,23 | 3,11 | 3,12 | 3,09 | 3,06 | 3,08 | 3,04 | 3,06 | 3,02 | 3,03 | 2,97 | 3,01 | 2,95 |
| 14                                    | 3,08                                | 3,17 | 3,03 | 3,06 | 3,00 | 2,99 | 2,99 | 2,97 | 2,98 | 2,95 | 2,95 | 2,90 | 2,93 | 2,87 |
| 15                                    | 3,00                                | 3,11 | 2,95 | 3,00 | 2,92 | 2,93 | 2,91 | 2,91 | 2,90 | 2,88 | 2,87 | 2,83 | 2,85 | 2,80 |
| 16                                    | 2,93                                | 3,06 | 2,88 | 2,94 | 2,85 | 2,88 | 2,84 | 2,85 | 2,82 | 2,82 | 2,79 | 2,77 | 2,77 | 2,74 |
| 17                                    | 2,87                                | 3,01 | 2,81 | 2,89 | 2,78 | 2,82 | 2,77 | 2,79 | 2,75 | 2,77 | 2,72 | 2,71 | 2,70 | 2,68 |
| 18                                    | 2,80                                | 2,97 | 2,74 | 2,84 | 2,71 | 2,77 | 2,70 | 2,74 | 2,69 | 2,71 | 2,66 | 2,65 | 2,64 | 2,62 |
| 19                                    | 2,74                                | 2,92 | 2,68 | 2,80 | 2,65 | 2,72 | 2,64 | 2,69 | 2,62 | 2,66 | 2,59 | 2,60 | 2,57 | 2,57 |
| 20                                    | 2,69                                | 2,88 | 2,62 | 2,76 | 2,59 | 2,68 | 2,58 | 2,64 | 2,56 | 2,62 | 2,53 | 2,55 | 2,51 | 2,51 |
| 21                                    | 2,63                                | 2,84 | 2,57 | 2,71 | 2,53 | 2,64 | 2,52 | 2,60 | 2,51 | 2,57 | 2,48 | 2,50 | 2,46 | 2,47 |
| 22                                    | 2,58                                | 2,80 | 2,51 | 2,68 | 2,48 | 2,59 | 2,47 | 2,56 | 2,45 | 2,53 | 2,42 | 2,46 | 2,40 | 2,42 |
| 23                                    | 2,53                                | 2,77 | 2,46 | 2,64 | 2,43 | 2,55 | 2,42 | 2,51 | 2,40 | 2,48 | 2,37 | 2,41 | 2,35 | 2,37 |
| 24                                    | 2,48                                | 2,74 | 2,42 | 2,60 | 2,38 | 2,52 | 2,37 | 2,48 | 2,36 | 2,45 | 2,33 | 2,31 | 2,31 | 2,33 |
| 25                                    | 2,44                                | 2,71 | 2,37 | 2,57 | 2,34 | 2,49 | 2,33 | 2,45 | 2,31 | 2,42 | 2,28 | 2,34 | 2,26 | 2,29 |
| 26                                    | 2,40                                | 2,68 | 2,33 | 2,54 | 2,30 | 2,46 | 2,28 | 2,41 | 2,27 | 2,38 | 2,24 | 2,31 | 2,22 | 2,25 |
| 27                                    | 2,36                                | 2,65 | 2,29 | 2,51 | 2,26 | 2,43 | 2,24 | 2,38 | 2,22 | 2,35 | 2,20 | 2,27 | 2,17 | 2,21 |
| 28                                    | 2,33                                | 2,62 | 2,25 | 2,49 | 2,22 | 2,40 | 2,20 | 2,35 | 2,18 | 2,32 | 2,16 | 2,24 | 2,13 | 2,18 |
| 29                                    | 2,29                                | 2,60 | 2,22 | 2,46 | 2,18 | 2,37 | 2,16 | 2,33 | 2,14 | 2,30 | 2,12 | 2,21 | 2,09 | 2,14 |
| 30                                    | 2,26                                | 2,57 | 2,18 | 2,43 | 2,15 | 2,35 | 2,12 | 2,30 | 2,11 | 2,27 | 2,08 | 2,18 | 2,06 | 2,11 |
| 31                                    | 2,22                                | 2,55 | 2,15 | 2,41 | 2,11 | 2,32 | 2,09 | 2,27 | 2,07 | 2,24 | 2,04 | 2,15 | 2,02 | 2,07 |
| 32                                    | 2,19                                | 2,52 | 2,11 | 2,38 | 2,08 | 2,29 | 2,05 | 2,25 | 2,03 | 2,22 | 2,01 | 2,13 | 1,98 | 2,04 |
| 33                                    | 2,16                                | 2,50 | 2,08 | 2,36 | 2,04 | 2,27 | 2,02 | 2,22 | 2,00 | 2,19 | 1,98 | 2,10 | 1,95 | 2,01 |
| 34                                    | 2,13                                | 2,48 | 2,05 | 2,34 | 2,01 | 2,25 | 1,98 | 2,20 | 1,97 | 2,17 | 1,94 | 2,07 | 1,92 | 1,98 |

ES: Eixos Simples; ETD: Eixos Tandem Duplos

**Quadro 5.12.** Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JSP e PCAC (Junta sem barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5).

| Espes-<br>sura<br>da<br>Placa<br>(cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                       | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |
|                                       | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                                    | 3,29                                | 3,18 | 3,12 | 3,09 | 3,02 | 2,99 |
| 13                                    | 3,23                                | 3,11 | 3,05 | 3,01 | 2,94 | 2,91 |
| 14                                    | 3,17                                | 3,04 | 2,98 | 2,94 | 2,87 | 2,83 |
| 15                                    | 3,12                                | 2,99 | 2,92 | 2,88 | 2,80 | 2,77 |
| 16                                    | 3,08                                | 2,94 | 2,87 | 2,82 | 2,74 | 2,70 |
| 17                                    | 3,03                                | 2,89 | 2,82 | 2,77 | 2,69 | 2,65 |
| 18                                    | 2,99                                | 2,85 | 2,77 | 2,72 | 2,6  | 2,60 |
| 19                                    | 2,96                                | 2,81 | 2,73 | 2,68 | 2,59 | 2,55 |
| 20                                    | 2,93                                | 2,77 | 2,69 | 2,64 | 2,54 | 2,50 |
| 21                                    | 2,89                                | 2,74 | 2,65 | 2,60 | 2,50 | 2,46 |
| 22                                    | 2,87                                | 2,71 | 2,62 | 2,56 | 2,47 | 2,42 |
| 23                                    | 2,84                                | 2,68 | 2,59 | 2,53 | 2,43 | 2,38 |
| 24                                    | 2,81                                | 2,65 | 2,56 | 2,50 | 2,40 | 2,35 |
| 25                                    | 2,79                                | 2,62 | 2,53 | 2,47 | 2,37 | 2,32 |
| 26                                    | 2,77                                | 2,60 | 2,50 | 2,44 | 2,34 | 2,29 |
| 27                                    | 2,74                                | 2,57 | 2,48 | 2,42 | 2,31 | 2,26 |
| 28                                    | 2,72                                | 2,55 | 2,46 | 2,39 | 2,28 | 2,23 |
| 29                                    | 2,70                                | 2,53 | 2,43 | 2,37 | 2,26 | 2,20 |
| 30                                    | 2,68                                | 2,51 | 2,41 | 2,35 | 2,23 | 2,18 |
| 31                                    | 2,67                                | 2,49 | 2,39 | 2,33 | 2,21 | 2,16 |
| 32                                    | 2,65                                | 2,47 | 2,37 | 2,31 | 2,19 | 2,13 |
| 33                                    | 2,63                                | 2,45 | 2,35 | 2,29 | 2,17 | 2,11 |
| 34                                    | 2,61                                | 2,43 | 2,33 | 2,27 | 2,15 | 2,09 |

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Quadro 5.13.** Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JCP e PSAC (Junta com barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto). DNER (5).

| Espessura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 20                                  |      | 40   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 150  |      | 200  |      |
|                         | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                      | 3,51                                | 3,61 | 3,50 | 3,57 | 3,49 | 3,54 | 3,48 | 3,52 | 3,48 | 3,51 | 3,47 | 3,49 | 3,45 | 3,47 |
| 13                      | 3,41                                | 3,53 | 3,39 | 3,48 | 3,39 | 3,45 | 3,38 | 3,43 | 3,38 | 3,41 | 3,37 | 3,39 | 3,35 | 3,37 |
| 14                      | 3,32                                | 3,45 | 3,30 | 3,39 | 3,29 | 3,36 | 3,28 | 3,34 | 3,28 | 3,33 | 3,27 | 3,30 | 3,25 | 3,28 |
| 15                      | 3,23                                | 3,37 | 3,21 | 3,31 | 3,20 | 3,28 | 3,19 | 3,26 | 3,19 | 3,24 | 3,18 | 3,22 | 3,16 | 3,20 |
| 16                      | 3,15                                | 3,30 | 3,12 | 3,24 | 3,12 | 3,21 | 3,10 | 3,18 | 3,10 | 3,17 | 3,09 | 3,14 | 3,08 | 3,12 |
| 17                      | 3,07                                | 3,24 | 3,05 | 3,17 | 3,04 | 3,14 | 3,02 | 3,11 | 3,02 | 3,10 | 3,01 | 3,07 | 3,00 | 3,04 |
| 18                      | 2,99                                | 3,18 | 2,97 | 3,11 | 2,96 | 3,07 | 2,95 | 3,05 | 2,94 | 3,03 | 2,93 | 3,00 | 2,92 | 2,97 |
| 19                      | 2,93                                | 3,12 | 2,90 | 3,05 | 2,89 | 3,01 | 2,88 | 2,98 | 2,87 | 2,97 | 2,86 | 2,93 | 2,85 | 2,91 |
| 20                      | 2,86                                | 3,06 | 2,83 | 3,00 | 2,83 | 2,95 | 2,81 | 2,92 | 2,80 | 2,91 | 2,79 | 2,87 | 2,79 | 2,84 |
| 21                      | 2,80                                | 3,01 | 2,77 | 2,93 | 2,76 | 2,89 | 2,74 | 2,86 | 2,74 | 2,85 | 2,73 | 2,81 | 2,72 | 2,78 |
| 22                      | 2,74                                | 2,96 | 2,71 | 2,88 | 2,70 | 2,84 | 2,68 | 2,81 | 2,68 | 2,80 | 2,67 | 2,76 | 2,66 | 2,73 |
| 23                      | 2,68                                | 2,91 | 2,65 | 2,83 | 2,64 | 2,79 | 2,62 | 2,76 | 2,62 | 2,74 | 2,61 | 2,70 | 2,59 | 2,67 |
| 24                      | 2,63                                | 2,87 | 2,60 | 2,78 | 2,59 | 2,74 | 2,57 | 2,71 | 2,56 | 2,69 | 2,55 | 2,65 | 2,54 | 2,62 |
| 25                      | 2,58                                | 2,83 | 2,54 | 2,74 | 2,54 | 2,69 | 2,52 | 2,67 | 2,51 | 2,65 | 2,50 | 2,60 | 2,49 | 2,57 |
| 26                      | 2,53                                | 2,79 | 2,50 | 2,70 | 2,49 | 2,65 | 2,47 | 2,62 | 2,46 | 2,61 | 2,45 | 2,56 | 2,44 | 2,53 |
| 27                      | 2,48                                | 2,75 | 2,45 | 2,66 | 2,44 | 2,61 | 2,42 | 2,58 | 2,41 | 2,57 | 2,40 | 2,52 | 2,39 | 2,49 |
| 28                      | 2,43                                | 2,72 | 2,40 | 2,63 | 2,39 | 2,57 | 2,37 | 2,54 | 2,37 | 2,53 | 2,35 | 2,48 | 2,34 | 2,45 |
| 29                      | 2,39                                | 2,69 | 2,36 | 2,59 | 2,35 | 2,54 | 2,33 | 2,51 | 2,32 | 2,49 | 2,31 | 2,44 | 2,30 | 2,41 |
| 30                      | 2,34                                | 2,65 | 2,31 | 2,56 | 2,30 | 2,50 | 2,28 | 2,47 | 2,28 | 2,45 | 2,26 | 2,41 | 2,25 | 2,37 |
| 31                      | 2,30                                | 2,62 | 2,27 | 2,52 | 2,26 | 2,47 | 2,24 | 2,43 | 2,24 | 2,43 | 2,22 | 2,37 | 2,21 | 2,34 |
| 32                      | 2,26                                | 2,59 | 2,23 | 2,49 | 2,22 | 2,43 | 2,20 | 2,40 | 2,19 | 2,38 | 2,18 | 2,33 | 2,17 | 2,30 |
| 33                      | 2,22                                | 2,56 | 2,19 | 2,46 | 2,18 | 2,40 | 2,16 | 2,37 | 2,15 | 2,35 | 2,14 | 2,30 | 2,13 | 2,27 |
| 34                      | 2,18                                | 2,53 | 2,15 | 2,43 | 2,14 | 2,37 | 2,12 | 2,33 | 2,12 | 2,32 | 2,10 | 2,27 | 2,09 | 2,24 |

ES: Eixos Simples; ETD: Eixos Tandem Duplos

**Quadro 5.14.** Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JCP e PSAC (Junta com barras de transferência e pavimentos sem acostamento de concreto). DNER (5).

| Espessura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                         | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |
|                         | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                      | 3,68                                | 3,60 | 3,56 | 3,52 | 3,45 | 3,40 |
| 13                      | 3,60                                | 3,51 | 3,47 | 3,44 | 3,37 | 3,33 |
| 14                      | 3,53                                | 3,43 | 3,39 | 3,36 | 3,29 | 3,26 |
| 15                      | 3,47                                | 3,36 | 3,31 | 3,28 | 3,22 | 3,19 |
| 16                      | 3,41                                | 3,30 | 3,25 | 3,21 | 3,15 | 3,12 |
| 17                      | 3,35                                | 3,24 | 3,19 | 3,15 | 3,08 | 3,05 |
| 18                      | 3,30                                | 3,19 | 3,13 | 3,09 | 3,02 | 2,99 |
| 19                      | 3,25                                | 3,14 | 3,08 | 3,04 | 2,96 | 2,93 |
| 20                      | 3,21                                | 3,09 | 3,03 | 2,99 | 2,91 | 2,88 |
| 21                      | 3,16                                | 3,05 | 2,99 | 2,94 | 2,86 | 2,83 |
| 22                      | 3,12                                | 3,01 | 2,94 | 2,90 | 2,82 | 2,78 |
| 23                      | 3,08                                | 2,97 | 2,90 | 2,86 | 2,77 | 2,74 |
| 24                      | 3,05                                | 2,93 | 2,86 | 2,82 | 2,73 | 2,69 |
| 25                      | 3,01                                | 2,89 | 2,83 | 2,78 | 2,69 | 2,65 |
| 26                      | 2,98                                | 2,86 | 2,79 | 2,74 | 2,66 | 2,62 |
| 27                      | 2,94                                | 2,82 | 2,76 | 2,71 | 2,66 | 2,58 |
| 28                      | 2,91                                | 2,79 | 2,72 | 2,68 | 2,59 | 2,55 |
| 29                      | 2,88                                | 2,76 | 2,69 | 2,65 | 2,55 | 2,51 |
| 30                      | 2,85                                | 2,73 | 2,66 | 2,62 | 2,52 | 2,48 |
| 31                      | 2,82                                | 2,70 | 2,63 | 2,59 | 2,49 | 2,45 |
| 32                      | 2,80                                | 2,68 | 2,61 | 2,56 | 2,46 | 2,42 |
| 33                      | 2,77                                | 2,65 | 2,58 | 2,53 | 2,44 | 2,40 |
| 34                      | 2,74                                | 2,62 | 2,55 | 2,50 | 2,41 | 2,37 |

ETT: Eixos Tandem Triplos

**Quadro 5.15.** Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JCP e PCAC (Junta com barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5).

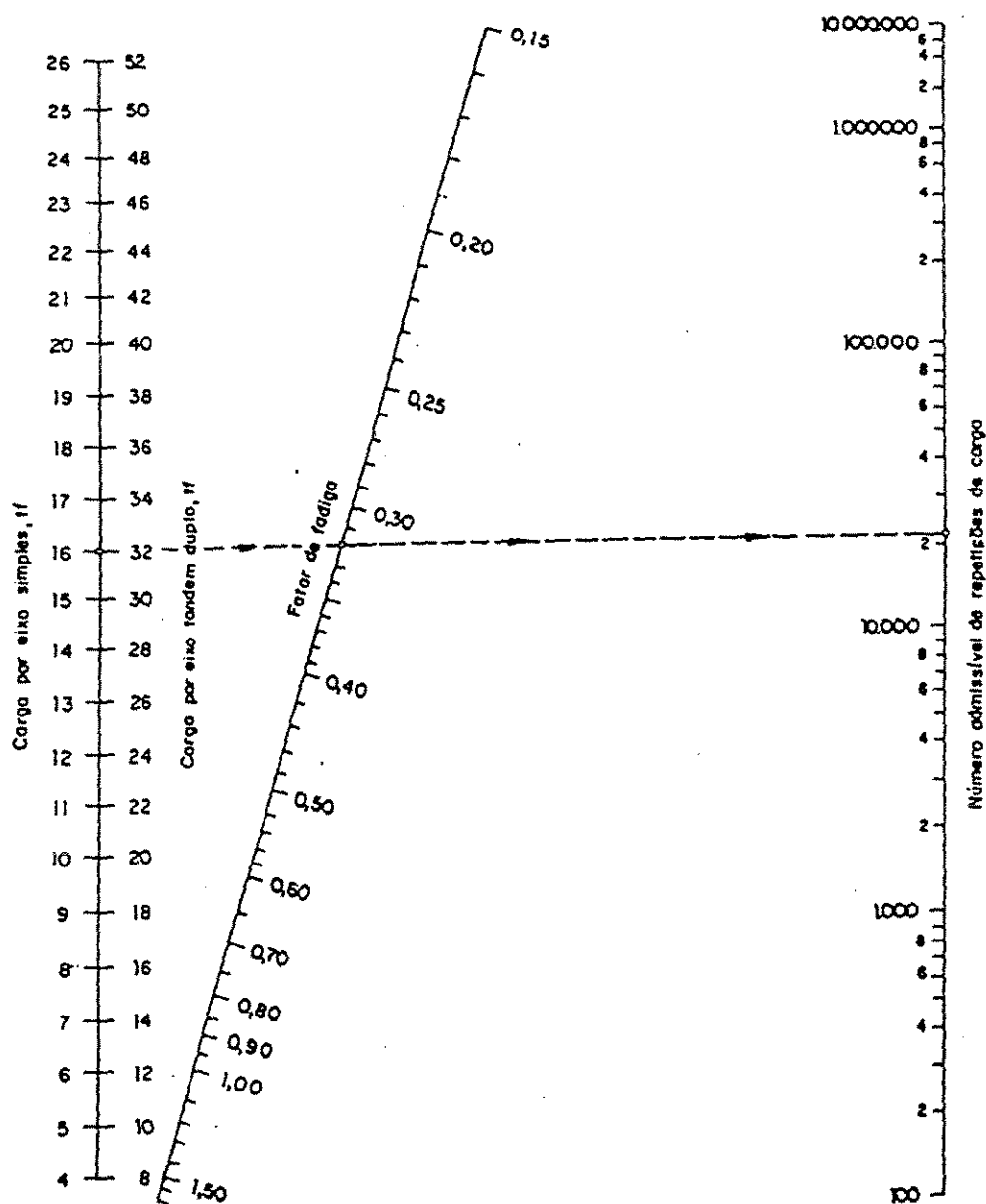
| Espesura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        | 20                                  |      | 40   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 150  |      | 200  |      |
|                        | ES                                  | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  | ES   | ETD  |
| 12                     | 3,07                                | 3,09 | 3,02 | 2,99 | 3,00 | 2,93 | 2,97 | 2,90 | 2,96 | 2,88 | 2,94 | 2,84 | 2,92 | 2,83 |
| 13                     | 2,97                                | 3,02 | 2,92 | 2,92 | 2,90 | 2,86 | 2,87 | 2,83 | 2,86 | 2,80 | 2,84 | 2,76 | 2,82 | 2,74 |
| 14                     | 2,88                                | 2,96 | 2,83 | 2,85 | 2,81 | 2,79 | 2,78 | 2,76 | 2,77 | 2,73 | 2,75 | 2,68 | 2,73 | 2,66 |
| 15                     | 2,80                                | 2,89 | 2,75 | 2,79 | 2,73 | 2,72 | 2,70 | 2,69 | 2,69 | 2,66 | 2,67 | 2,61 | 2,65 | 2,59 |
| 16                     | 2,72                                | 2,84 | 2,67 | 2,73 | 2,65 | 2,66 | 2,62 | 2,63 | 2,61 | 2,60 | 2,59 | 2,55 | 2,57 | 2,52 |
| 17                     | 2,64                                | 2,78 | 2,60 | 2,68 | 2,58 | 2,60 | 2,55 | 2,57 | 2,54 | 2,54 | 2,52 | 2,48 | 2,49 | 2,45 |
| 18                     | 2,57                                | 2,73 | 2,53 | 2,62 | 2,51 | 2,55 | 2,48 | 2,51 | 2,47 | 2,48 | 2,45 | 2,42 | 2,42 | 2,39 |
| 19                     | 2,51                                | 2,69 | 2,47 | 2,57 | 2,44 | 2,50 | 2,41 | 2,46 | 2,40 | 2,43 | 2,38 | 2,37 | 2,36 | 2,33 |
| 20                     | 2,44                                | 2,64 | 2,41 | 2,53 | 2,38 | 2,45 | 2,35 | 2,41 | 2,34 | 2,38 | 2,32 | 2,31 | 2,29 | 2,28 |
| 21                     | 2,38                                | 2,60 | 2,35 | 2,48 | 2,32 | 2,40 | 2,29 | 2,36 | 2,28 | 2,33 | 2,26 | 2,26 | 2,23 | 2,22 |
| 22                     | 2,33                                | 2,56 | 2,30 | 2,44 | 2,27 | 2,36 | 2,24 | 2,32 | 2,23 | 2,29 | 2,21 | 2,21 | 2,18 | 2,17 |
| 23                     | 2,27                                | 2,52 | 2,24 | 2,40 | 2,21 | 2,31 | 2,18 | 2,27 | 2,17 | 2,24 | 2,15 | 2,17 | 2,12 | 2,12 |
| 24                     | 2,23                                | 2,48 | 2,10 | 2,36 | 2,16 | 2,28 | 2,13 | 2,24 | 2,12 | 2,20 | 2,10 | 2,13 | 2,07 | 2,08 |
| 25                     | 2,18                                | 2,43 | 2,14 | 2,33 | 2,11 | 2,24 | 2,09 | 2,20 | 2,08 | 2,17 | 2,05 | 2,09 | 2,02 | 2,03 |
| 26                     | 2,14                                | 2,39 | 2,09 | 2,29 | 2,06 | 2,21 | 2,04 | 2,17 | 2,03 | 2,13 | 2,01 | 2,06 | 1,97 | 1,99 |
| 27                     | 2,10                                | 2,35 | 2,05 | 2,26 | 2,02 | 2,17 | 2,00 | 2,13 | 1,99 | 2,10 | 1,96 | 2,03 | 1,93 | 1,95 |
| 28                     | 2,06                                | 2,32 | 2,01 | 2,23 | 1,98 | 2,14 | 1,95 | 2,10 | 1,94 | 2,07 | 1,92 | 1,99 | 1,98 | 1,91 |
| 29                     | 2,03                                | 2,28 | 1,97 | 2,19 | 1,94 | 2,11 | 1,91 | 2,07 | 1,90 | 2,04 | 1,88 | 1,96 | 1,85 | 1,87 |
| 30                     | 1,99                                | 2,25 | 1,93 | 2,16 | 1,90 | 2,08 | 1,87 | 2,04 | 1,86 | 2,01 | 1,85 | 1,93 | 1,81 | 1,83 |
| 31                     | 1,96                                | 2,21 | 1,89 | 2,13 | 1,86 | 2,05 | 1,83 | 2,01 | 1,82 | 1,98 | 1,80 | 1,90 | 1,77 | 1,80 |
| 32                     | 1,92                                | 2,18 | 1,86 | 2,11 | 1,83 | 2,03 | 1,80 | 1,99 | 1,79 | 1,95 | 1,76 | 1,87 | 1,74 | 1,76 |
| 33                     | 1,89                                | 2,15 | 1,82 | 2,08 | 1,79 | 2,00 | 1,76 | 1,96 | 1,75 | 1,92 | 1,72 | 1,85 | 1,70 | 1,73 |
| 34                     | 1,86                                | 2,12 | 1,79 | 2,05 | 1,76 | 1,97 | 1,73 | 1,93 | 1,72 | 1,90 | 1,69 | 1,82 | 1,67 | 1,70 |

ES: Eixos Simples; ETD; Eixos Tandem Duplos

**Quadro 5.16.** Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos JCP e PCAC (Junta com barras de transferência e pavimento com acostamento de concreto). DNER (5).

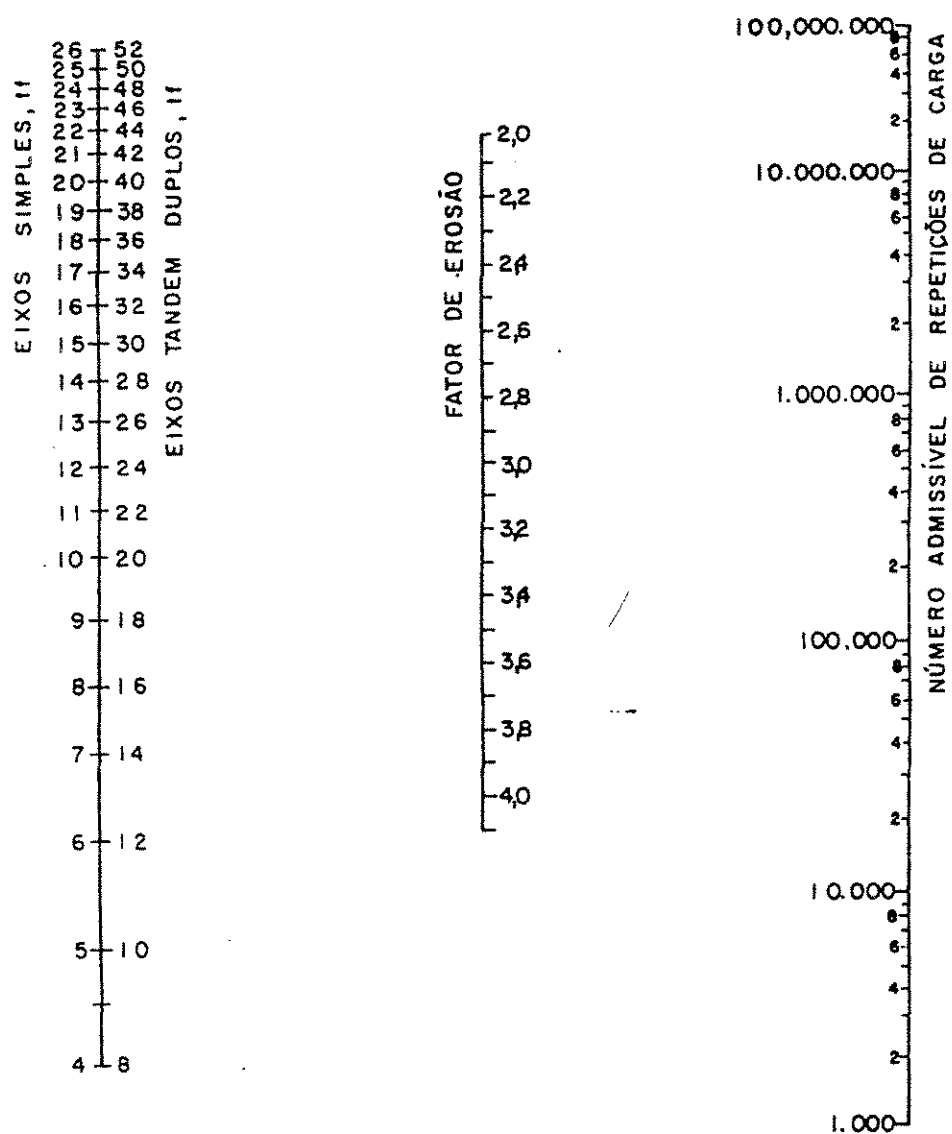
| Espesura da Placa (cm) | k - Coeficiente de Recalque (MPa/m) |      |      |      |      |      |
|------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                        | 20                                  | 40   | 60   | 80   | 140  | 180  |
|                        | ETT                                 | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  | ETT  |
| 12                     | 3,12                                | 2,99 | 2,93 | 2,90 | 2,85 | 2,82 |
| 13                     | 3,06                                | 2,92 | 2,85 | 2,81 | 2,76 | 2,73 |
| 14                     | 3,00                                | 2,86 | 2,78 | 2,74 | 2,67 | 2,64 |
| 15                     | 2,95                                | 2,80 | 2,73 | 2,67 | 2,59 | 2,56 |
| 16                     | 2,91                                | 2,76 | 2,67 | 2,62 | 2,52 | 2,49 |
| 17                     | 2,86                                | 2,71 | 2,62 | 2,57 | 2,47 | 2,43 |
| 18                     | 2,82                                | 2,67 | 2,58 | 2,52 | 2,41 | 2,37 |
| 19                     | 2,79                                | 2,63 | 2,54 | 2,48 | 2,37 | 2,32 |
| 20                     | 2,75                                | 2,59 | 2,50 | 2,44 | 2,32 | 2,28 |
| 21                     | 2,72                                | 2,56 | 2,47 | 2,40 | 2,28 | 2,23 |
| 22                     | 2,68                                | 2,53 | 2,43 | 2,37 | 2,25 | 2,20 |
| 23                     | 2,65                                | 2,49 | 2,40 | 2,34 | 2,21 | 2,16 |
| 24                     | 2,62                                | 2,46 | 2,37 | 2,31 | 2,18 | 2,13 |
| 25                     | 2,59                                | 2,44 | 2,34 | 2,28 | 2,15 | 2,10 |
| 26                     | 2,57                                | 2,41 | 2,32 | 2,25 | 2,12 | 2,07 |
| 27                     | 2,54                                | 2,38 | 2,29 | 2,22 | 2,10 | 2,04 |
| 28                     | 2,51                                | 2,36 | 2,26 | 2,20 | 2,07 | 2,01 |
| 29                     | 2,49                                | 2,33 | 2,24 | 2,17 | 2,04 | 1,99 |
| 30                     | 2,47                                | 2,31 | 2,22 | 2,15 | 2,02 | 1,96 |
| 31                     | 2,44                                | 2,29 | 2,19 | 2,13 | 2,00 | 1,94 |
| 32                     | 2,42                                | 2,26 | 2,17 | 2,10 | 1,97 | 1,92 |
| 33                     | 2,44                                | 2,24 | 2,15 | 2,08 | 1,95 | 1,89 |
| 34                     | 2,38                                | 2,22 | 2,13 | 2,06 | 1,93 | 1,87 |

ETT: Eixos Tandem Triplos



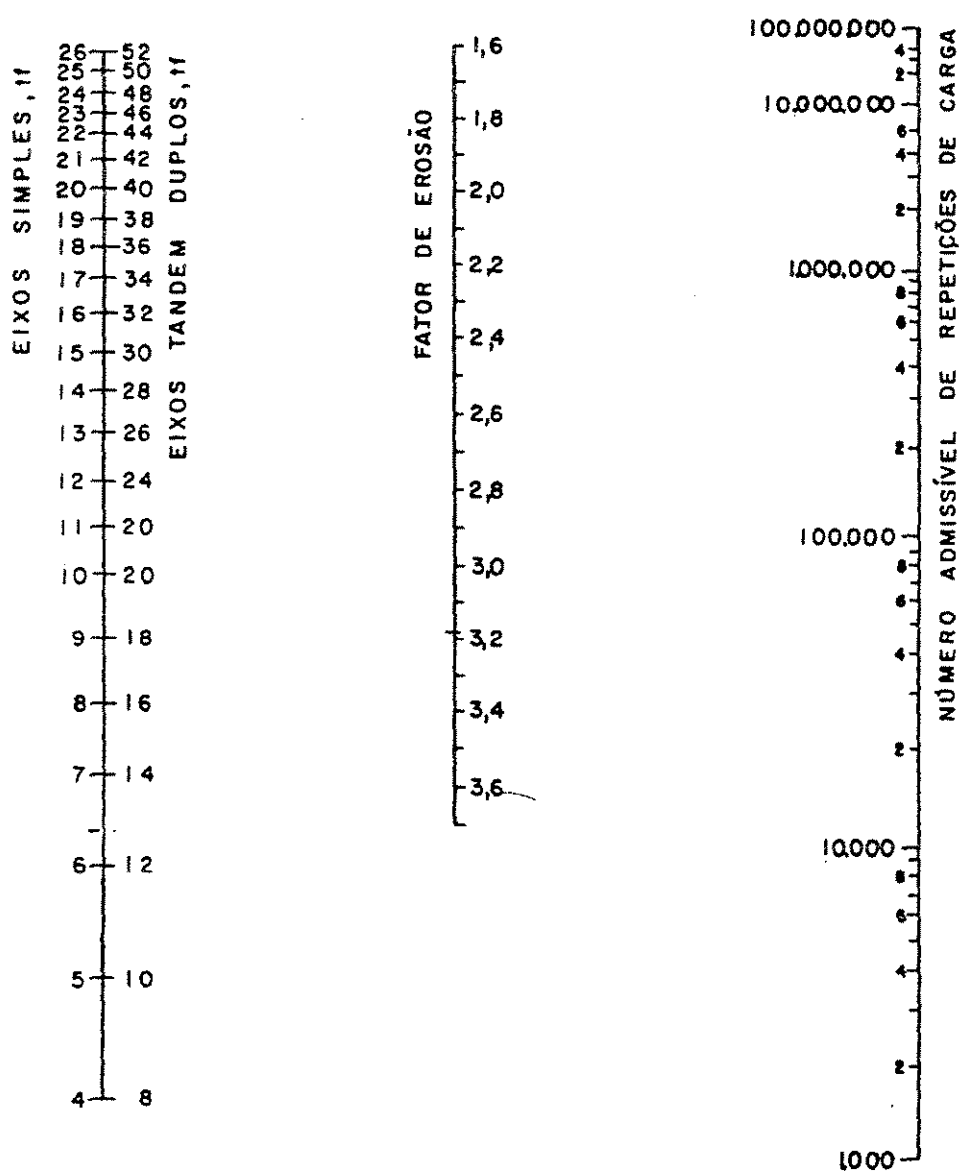
**Figura 5.5.** Análise de fadiga – número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga (com ou sem acostamento de concreto).

Fonte: DNER (5).



**Figura 5.6.** Análise de erosão – número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (sem acostamento de concreto).

Fonte: DNER (5).



**Figura 5.7.** Análise de erosão – número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (com acostamento de concreto).

Fonte: DNER (5).

#### 5.3.2.1. Cálculo das espessuras

As espessuras foram calculadas levando-se em conta dois fatores de carga,  $F_{sc} = 1,2$  e  $F_{sc} = 1,0$ . As cargas por eixo e o número de solicitações previstas são os mesmos utilizados no

método anterior.

As espessuras foram determinadas para os seguintes tipos de pavimento:

- 1) Sem barras de transferência e sem acostamento de concreto;
- 2) Sem barras de transferência e com acostamento de concreto;
- 3) Com barras de transferência e sem acostamento de concreto; e,
- 4) Com barras de transferência e com acostamento de concreto.

Os resultados obtidos estão, respectivamente, nos quadros 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20.

**Quadro 5.17.** Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – sem barras e sem acostamento

| MR      | 4.1                 |                     |                     |                     |                      | 4.5                 |                     |                     |                     |                      | 5.0                 |                     |                     |                     |                      |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Tráfego | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                    | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                    | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                    |
| k       | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                      | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                      | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                      |
| 40      | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 28,0 <sup>(1)</sup> | 30,0 <sup>(1)</sup>  | 19,5 <sup>(1)</sup> | 20,5 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 28,0 <sup>(1)</sup> | 30,0 <sup>(1)</sup>  | 18,0 <sup>(1)</sup> | 20,5 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 28,0 <sup>(1)</sup> | 30,0 <sup>(1)</sup>  |
|         | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 27,0 <sup>(2)</sup> | 33,0 <sup>(2)</sup> | >34,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 27,0 <sup>(2)</sup> | 33,0 <sup>(2)</sup> | >34,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 27,0 <sup>(2)</sup> | 33,0 <sup>(2)</sup> | >34,0 <sup>(2)</sup> |
| 60      | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 26,0 <sup>(1)</sup> | 28,0 <sup>(1)</sup>  | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 26,0 <sup>(1)</sup> | 28,0 <sup>(1)</sup>  | 17,0 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 26,0 <sup>(1)</sup> | 28,0 <sup>(1)</sup>  |
|         | 22,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 26,0 <sup>(2)</sup> | 31,0 <sup>(2)</sup> | 34,0 <sup>(2)</sup>  | 20,5 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 26,0 <sup>(2)</sup> | 31,0 <sup>(2)</sup> | 34,0 <sup>(2)</sup>  | 19,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 26,0 <sup>(2)</sup> | 31,0 <sup>(2)</sup> | 34,0 <sup>(2)</sup>  |
| 80      | 19,0 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 25,5 <sup>(1)</sup> | 27,5 <sup>(1)</sup>  | 18,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 25,5 <sup>(1)</sup> | 27,5 <sup>(1)</sup>  | 16,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 25,5 <sup>(1)</sup> | 27,5 <sup>(1)</sup>  |
|         | 21,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 30,0 <sup>(2)</sup> | 32,0 <sup>(2)</sup>  | 20,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 30,0 <sup>(2)</sup> | 32,0 <sup>(2)</sup>  | 18,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 30,0 <sup>(2)</sup> | 32,0 <sup>(2)</sup>  |
| 100     | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 25,0 <sup>(1)</sup> | 27,0 <sup>(1)</sup>  | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 25,0 <sup>(1)</sup> | 27,0 <sup>(1)</sup>  | 16,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 25,0 <sup>(1)</sup> | 27,0 <sup>(1)</sup>  |
|         | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 29,0 <sup>(2)</sup> | 31,0 <sup>(2)</sup>  | 19,5 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 29,0 <sup>(2)</sup> | 31,0 <sup>(2)</sup>  | 18,0 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 29,0 <sup>(2)</sup> | 31,0 <sup>(2)</sup>  |
| 150     | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 24,0 <sup>(1)</sup> | 26,0 <sup>(1)</sup>  | 16,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 24,0 <sup>(1)</sup> | 26,0 <sup>(1)</sup>  | 15,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 24,0 <sup>(1)</sup> | 26,0 <sup>(1)</sup>  |
|         | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 30,0 <sup>(2)</sup>  | 18,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 30,0 <sup>(2)</sup>  | 17,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 30,0 <sup>(2)</sup>  |

1) Espessuras obtidas para Fsc = 1,0

2) Espessuras obtidas para Fsc = 1,2

**Quadro 5.18.** Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – sem barras e com acostamento

| MR      | 4.1                 |                     |                     |                     |                     | 4.5                 |                     |                     |                     |                     | 5.0                 |                     |                     |                     |                     |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Tráfego | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   |
| k       | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     |
| 40      | 18,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 24,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 24,5 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 24,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 20,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 29,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 29,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 29,5 <sup>(2)</sup> |
| 60      | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 22,5 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 22,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 22,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 26,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 26,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 26,5 <sup>(2)</sup> |
| 80      | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 18,5 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> |
| 100     | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 18,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 17,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 17,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> |
| 150     | 15,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 17,0 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> |

1) Espessuras obtidas para Fsc = 1,0

2) Espessuras obtidas para Fsc = 1,2

**Quadro 5.19.** Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – com barras e sem acostamento

| MR      | 4.1                 |                     |                     |                     |                     | 4.5                 |                     |                     |                     |                     | 5.0                 |                     |                     |                     |                     |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Tráfego | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   |
| k       | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     |
| 40      | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 22,5 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 24,0 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 20,5 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 24,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 24,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 25,0 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 28,0 <sup>(2)</sup> |
| 60      | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 23,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 22,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 27,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 27,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 27,0 <sup>(2)</sup> |
| 80      | 19,0 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 20,5 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 21,0 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 26,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 26,0 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 24,0 <sup>(2)</sup> | 26,0 <sup>(2)</sup> |
| 100     | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 21,0 <sup>(1)</sup> | 22,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,5 <sup>(2)</sup> | 25,5 <sup>(2)</sup> |
| 150     | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 20,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 20,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 20,5 <sup>(1)</sup> | 21,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> | 17,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 23,0 <sup>(2)</sup> | 24,5 <sup>(2)</sup> |

1) Espessuras obtidas para Fsc = 1,0

2) Espessuras obtidas para Fsc = 1,2

**Quadro 5.20. Dimensionamento pavimento rígido – método PCA-84 – com barras e com acostamento**

| MR      | 4.1                 |                     |                     |                     |                     | 4.5                 |                     |                     |                     |                     | 5.0                 |                     |                     |                     |                     |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Tráfego | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   | 1                   | 2                   | 3                   | 4                   | 5                   |
| k       | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     | ESPESSURAS          |                     |                     |                     |                     |
| 40      | 18,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 19,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 20,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 20,0 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 22,0 <sup>(2)</sup> | 22,5 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 22,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 22,5 <sup>(2)</sup> |
| 60      | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 18,5 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 19,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 21,0 <sup>(2)</sup> | 21,5 <sup>(2)</sup> |
| 80      | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 14,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,5 <sup>(2)</sup> |
| 100     | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> | 13,5 <sup>(1)</sup> | 14,5 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 18,0 <sup>(1)</sup> |
|         | 18,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 17,0 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> | 15,5 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 20,0 <sup>(2)</sup> |
| 150     | 15,0 <sup>(1)</sup> | 16,0 <sup>(1)</sup> | 16,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 14,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 15,0 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> | 13,0 <sup>(1)</sup> | 14,0 <sup>(1)</sup> | 15,5 <sup>(1)</sup> | 17,0 <sup>(1)</sup> | 17,5 <sup>(1)</sup> |
|         | 17,0 <sup>(2)</sup> | 18,0 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,0 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 16,0 <sup>(2)</sup> | 16,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> | 14,5 <sup>(2)</sup> | 15,5 <sup>(2)</sup> | 17,5 <sup>(2)</sup> | 18,5 <sup>(2)</sup> | 19,5 <sup>(2)</sup> |

1) Espessuras obtidas para Fsc = 1,0

2) Espessuras obtidas para Fsc = 1,2

## 5.4. O MÉTODO DA AASHTO/86

Para o dimensionamento dos pavimentos de concreto por este método, são levados em conta o tráfego total, as características dos materiais utilizados e as condições climáticas.

Vale ressaltar, que na utilização desta metodologia o DNER incorpora procedimentos utilizados no método da PCA, portanto, faremos uso deste método utilizando o procedimento do DNER e o procedimento original.

### 5.4.1. *Determinação dos parâmetros de cálculo conforme o DNER*

#### 5.4.1.1. Tráfego de projeto

Para a determinação do tráfego de projeto deve-se seguir os seguintes passos:

- a) Determinação do tráfego solicitante total, no fim do período de projeto, em eixos equivalentes totais de 8,2 t (EE), com base nas solicitações previstas para os tráfegos 1, 2, 3, 4 e 5, considerando a serventia final desejada. A serventia final adotada foi  $P_f = 2,0$ ;
- b) Determinação do nível de confiabilidade,  $R(\%)$  conforme o Quadro 5.21. Para os tráfegos 1 e 2, o valor de “R” foi considerado igual a 50% e para os tráfegos 3, 4 e 5 foi de 75%;
- c) Determinação do fator de segurança de tráfego,  $F$ , em função do coeficiente de Student ( $Z_r$ ) e do desvio padrão do erro de estimativa do tráfego ( $S_0$ ), cujo valor foi considerado igual a 0,30, com  $S_0$  e  $R$ , através do Quadro 5.22, determina-se o valor de “F”; e,
- d) Para a determinação do tráfego de projeto,  $T$ , usa-se a expressão:

$$T = EE \times F \quad (5.1)$$

Em função do exposto, foram determinados os números de eixos equivalentes (EE) para os tráfegos 1, 2, 3, 4 e 5, conforme os quadros 5.29, 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33, em função dos fatores de equivalência de carga dos quadros 5.26, 5.27 e 5.28, cujos resultados foram:

Tráfego 1: EE = 572.977 eixos equivalentes

Tráfego 2: EE = 2.327.240 eixos equivalentes

Tráfego 3: EE = 7.026.980 eixos equivalentes

Tráfego 4: EE = 27.068.400 eixos equivalentes

Tráfego 5: EE = 54.136.800 eixos equivalentes

Em função dos valores de “R” e  $S_0$  definidos nos itens b e c, temos pelo Quadro 5.22, os valores de “F” de 1,00 e 1,59 para os tráfegos 1 e 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Então os tráfegos de projeto são:

Tráfego 1:  $T = EE \times 1,0 \rightarrow T = 572.977$  eixos equivalentes

Tráfego 2:  $T = EE \times 1,0 \rightarrow T = 2.327.240$  eixos equivalentes

Tráfego 3:  $T = EE \times 1,59 \rightarrow T = 11.172.898$  eixos equivalentes

Tráfego 4:  $T = EE \times 1,59 \rightarrow T = 43.038.756$  eixos equivalentes

Tráfego 5:  $T = EE \times 1,59 \rightarrow T = 86.077.512$  eixos equivalentes

**Quadro 5.21.** Valores recomendados pela AASHTO para a confiabilidade.

| Tipo de Estrada                                | Fator de Confiabilidade<br>R (%) |
|------------------------------------------------|----------------------------------|
| Local                                          | 50                               |
| Coletora                                       | 60                               |
| Primária                                       | 75                               |
| Auto-estrada                                   | 80                               |
| Pavimentos de difícil manutenção (túneis etc.) | 85                               |

**Quadro 5.22.** Fatores de segurança de tráfego, segundo o nível de confiabilidade R. AASHTO/86.

| Nível de Confiabilidade<br>R (%) | Coeficiente de Student,<br>$Z_r$ | F            |              |              |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                                  |                                  | $S_0 = 0,30$ | $S_0 = 0,35$ | $S_0 = 0,40$ |
| 50                               | 0,000                            | 1,00         | 1,00         | 1,00         |
| 60                               | 0,253                            | 1,19         | 1,23         | 1,26         |
| 70                               | 0,524                            | 1,44         | -1,53        | 1,62         |
| 75                               | 0,674                            | 1,59         | 1,72         | 1,86         |
| 80                               | 0,841                            | 1,79         | 1,97         | 2,17         |
| 85                               | 1,037                            | 2,05         | 2,31         | 2,60         |
| 90                               | 1,282                            | 2,42         | 2,81         | 3,26         |
| 92                               | 1,405                            | 2,64         | 3,10         | 3,65         |
| 94                               | 1,555                            | 2,93         | 3,50         | 4,19         |
| 95                               | 1,645                            | 3,12         | 3,76         | 4,55         |
| 96                               | 1,751                            | 3,35         | 4,10         | 5,02         |
| 98                               | 2,054                            | 4,13         | 5,23         | 6,63         |
| 99                               | 2,327                            | 4,99         | 6,52         | 8,53         |
| 99,99                            | 3,750                            | 13,34        | 20,54        | 31,63        |

**Quadro 5.23.** Faixa de valores da perda de suporte para diferentes tipos de materiais de sub-base AASHTO/86.

| Material                          | $P_s$     |
|-----------------------------------|-----------|
| Base granular tratada com cimento | 0,0 a 1,0 |
| Base tratada com asfalto          | 0,0 a 1,0 |
| Materiais granulares              | 1,0 a 3,0 |
| Materiais de graduação fina       | 2,0 a 3,0 |

**Quadro 5.24.** Valores recomendados pela AASHTO para o coeficiente de drenagem  $C_d$ .

| Eficiência da drenagem | Tempo de remoção da água | Porcentagem do tempo em que a estrutura esteja exposta a níveis de umidade perto da saturação |             |             |       |
|------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------|
|                        |                          | < 1%                                                                                          | 1% a 5%     | 5% a 25%    | > 25% |
| Excelente              | 2 horas                  | 1,20 – 1,25                                                                                   | 1,15 – 1,20 | 1,10 – 1,15 | 1,10  |
| Boa                    | 24 horas                 | 1,15 – 1,20                                                                                   | 1,10 – 1,15 | 1,00 – 1,10 | 1,00  |
| Regular                | 1 semana                 | 1,10 – 1,15                                                                                   | 1,00 – 1,10 | 0,90 – 1,00 | 0,90  |
| Má                     | 4 semanas                | 1,00 – 1,10                                                                                   | 0,90 – 1,00 | 0,80 – 0,90 | 0,80  |
| Muito má               | Não drena                | 0,90 – 1,00                                                                                   | 0,80 – 0,90 | 0,70 – 0,80 | 0,70  |

**Quadro 5.25.** Valores típicos do coeficiente de transferência de carga “J”, segundo a AASHTO/86.

| Dispositivo de transferência de carga | Acostamento pavimentado | Tipo de sub-base | Condição climática | J                    |           |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------|--------------------|----------------------|-----------|
|                                       |                         |                  |                    | Comprimento da placa |           |
|                                       |                         |                  |                    | 4,5                  | 4,6 a 6 m |
| Não                                   | Não                     | gr               | Rigorosa           | 4,0                  | 4,4       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 3,8                  | 4,2       |
|                                       |                         | tcc              | Rigorosa           | 3,6                  | 4,0       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 3,4                  | 3,8       |
|                                       | Sim                     | gr               | Rigorosa           | 3,4                  | 3,8       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 3,2                  | 3,6       |
|                                       |                         | tcc              | Rigorosa           | 3,0                  | 3,4       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 2,8                  | 3,2       |
| Sim                                   | Não                     | gr               | Rigorosa           | 3,0                  | 3,2       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 2,9                  | 3,0       |
|                                       |                         | tcc              | Rigorosa           | 2,7                  | 2,9       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 2,6                  | 2,7       |
|                                       | Sim                     | gr               | Rigorosa           | 2,9                  | 3,1       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 2,8                  | 2,9       |
|                                       |                         | tcc              | Rigorosa           | 2,6                  | 2,8       |
|                                       |                         |                  | Leve               | 2,5                  | 2,5       |

NOTA: gr: granular

tcc: tratada com cimento.

**Quadro 5.26.** Fatores de equivalência de carga por eixo simples, para índice de serventia final igual a 2,0.  
Espessura de placa (cm) - DNER (5).

| Carga por Eixo(tf) | 15     | 17,5   | 20     | 22,5   | 25     | 27,5   | 30     | 32,5   | 35     |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,9                | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| 1,8                | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   |
| 2,7                | ,011   | ,010   | ,010   | ,010   | ,010   | ,010   | ,010   | ,010   | ,010   |
| 3,6                | ,035   | ,033   | ,032   | ,032   | ,032   | ,032   | ,032   | ,032   | ,032   |
| 4,5                | ,087   | ,084   | ,082   | ,081   | ,080   | ,080   | ,080   | ,080   | ,080   |
| 5,4                | ,186   | ,180   | ,176   | ,175   | ,174   | ,174   | ,173   | ,173   | ,173   |
| 6,3                | ,353   | ,346   | ,341   | ,338   | ,337   | ,336   | ,336   | ,336   | ,336   |
| 7,2                | ,614   | ,609   | ,604   | ,601   | ,599   | ,599   | ,598   | ,598   | ,598   |
| 8,2                | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   | 1,00   |
| 9,1                | 1,55   | 1,56   | 1,57   | 1,58   | 1,58   | 1,59   | 1,59   | 1,59   | 1,59   |
| 10,0               | 2,32   | 2,32   | 2,35   | 2,38   | 2,40   | 2,41   | 2,41   | 2,41   | 2,42   |
| 10,9               | 3,37   | 3,34   | 3,40   | 3,47   | 3,51   | 3,53   | 3,54   | 3,55   | 3,55   |
| 11,8               | 4,76   | 4,69   | 4,77   | 4,88   | 4,97   | 5,02   | 5,04   | 5,06   | 5,06   |
| 12,7               | 6,58   | 6,44   | 6,52   | 6,70   | 6,85   | 6,94   | 7,00   | 7,02   | 7,04   |
| 13,6               | 8,92   | 8,68   | 8,74   | 8,98   | 9,23   | 9,39   | 9,48   | 9,54   | 9,56   |
| 14,5               | 11,9   | 11,5   | 11,5   | 11,8   | 12,2   | 12,4   | 12,6   | 12,7   | 12,7   |
| 15,4               | 15,5   | 15,0   | 14,9   | 15,3   | 15,8   | 16,2   | 16,4   | 16,6   | 16,7   |
| 16,3               | 20,1   | 19,3   | 19,2   | 19,5   | 20,1   | 20,7   | 21,1   | 21,4   | 21,5   |
| 17,2               | 25,6   | 24,5   | 24,3   | 24,6   | 25,4   | 26,1   | 26,7   | 27,1   | 27,4   |
| 18,1               | 32,2   | 30,8   | 30,4   | 30,7   | 31,6   | 32,6   | 33,4   | 34,0   | 34,4   |
| 19,0               | 40,1   | 38,4   | 37,7   | 38,0   | 38,9   | 40,1   | 41,3   | 42,1   | 42,7   |
| 20,0               | 49,4   | 47,3   | 46,4   | 46,6   | 47,6   | 49,0   | 50,4   | 51,6   | 52,4   |
| 20,9               | 60,4   | 57,7   | 56,6   | 56,7   | 57,7   | 59,3   | 61,1   | 62,6   | 63,7   |
| 21,8               | 73,2   | 69,9   | 68,4   | 68,4   | 69,4   | 71,2   | 73,3   | 75,3   | 76,8   |
| 22,7               | 88,0   | 84,1   | 82,2   | 82,0   | 83,0   | 84,9   | 87,4   | 89,8   | 91,7   |

**Quadro 5.27.** Fatores de equivalência de carga por eixo tandem duplo, para índice de serventia final igual a 2,0. Espessura placa (cm) - DNER (5).

| Carga por Eixo(tf) | 15     | 17,5   | 20     | 22,5   | 25     | 27,5   | 30     | 32,5   | 35     |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,9                | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| 1,8                | ,0006  | ,0005  | ,0005  | ,0005  | ,0005  | ,0005  | ,0005  | ,0005  | ,0005  |
| 2,7                | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   |
| 3,6                | ,006   | ,006   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   |
| 4,5                | ,014   | ,013   | ,013   | ,012   | ,012   | ,012   | ,012   | ,012   | ,012   |
| 5,4                | ,028   | ,026   | ,026   | ,025   | ,025   | ,025   | ,025   | ,025   | ,025   |
| 6,3                | ,051   | ,049   | ,048   | ,047   | ,047   | ,047   | ,047   | ,047   | ,047   |
| 7,2                | ,087   | ,084   | ,082   | ,081   | ,081   | ,080   | ,080   | ,080   | ,080   |
| 8,2                | ,141   | ,136   | ,133   | ,132   | ,131   | ,131   | ,131   | ,131   | ,131   |
| 9,1                | ,216   | ,210   | ,206   | ,204   | ,203   | ,203   | ,203   | ,203   | ,203   |
| 10,0               | ,319   | ,313   | ,307   | ,305   | ,304   | ,303   | ,303   | ,303   | ,303   |
| 10,9               | ,454   | ,449   | ,444   | ,441   | ,440   | ,439   | ,439   | ,439   | ,439   |
| 11,8               | ,629   | ,626   | ,622   | ,620   | ,618   | ,618   | ,618   | ,618   | ,618   |
| 12,7               | ,852   | ,851   | ,850   | ,850   | ,850   | ,849   | ,849   | ,849   | ,849   |
| 13,6               | 1,13   | 1,13   | 1,14   | 1,14   | 1,14   | 1,14   | 1,14   | 1,14   | 1,14   |
| 14,5               | 1,48   | 1,48   | 1,49   | 1,50   | 1,51   | 1,51   | 1,51   | 1,51   | 1,51   |
| 15,4               | 1,90   | 1,90   | 1,93   | 1,95   | 1,96   | 1,97   | 1,97   | 1,97   | 1,97   |
| 16,3               | 2,42   | 2,41   | 2,45   | 2,49   | 2,51   | 2,52   | 2,53   | 2,53   | 2,53   |
| 17,2               | 3,04   | 3,02   | 3,07   | 3,13   | 3,17   | 3,19   | 3,20   | 3,20   | 3,21   |
| 18,1               | 3,79   | 3,74   | 3,80   | 3,89   | 3,95   | 3,98   | 4,00   | 4,01   | 4,01   |
| 19,0               | 4,67   | 4,59   | 4,66   | 4,78   | 4,87   | 4,93   | 4,95   | 4,97   | 4,97   |
| 20,0               | 5,72   | 5,59   | 5,67   | 5,82   | 5,95   | 6,03   | 6,07   | 6,09   | 6,10   |
| 20,9               | 6,94   | 6,76   | 6,83   | 7,02   | 7,20   | 7,31   | 7,37   | 7,41   | 7,43   |
| 21,8               | 8,36   | 8,12   | 8,17   | 8,40   | 8,63   | 8,79   | 8,88   | 8,93   | 8,96   |
| 22,7               | 10,00  | 9,69   | 9,72   | 9,98   | 10,27  | 10,49  | 10,62  | 10,69  | 10,73  |
| 23,6               | 11,9   | 11,5   | 11,5   | 11,8   | 12,1   | 12,4   | 12,6   | 12,7   | 12,8   |
| 24,5               | 14,0   | 13,5   | 13,5   | 13,8   | 14,2   | 14,6   | 14,9   | 15,0   | 15,1   |
| 25,4               | 16,5   | 15,9   | 15,8   | 16,1   | 16,6   | 17,1   | 17,4   | 17,6   | 17,7   |
| 26,3               | 19,3   | 18,5   | 18,4   | 18,7   | 19,3   | 19,8   | 20,3   | 20,5   | 20,7   |
| 27,2               | 22,4   | 21,5   | 21,3   | 21,6   | 22,3   | 22,9   | 23,5   | 23,8   | 24,0   |
| 28,1               | 25,9   | 24,9   | 24,6   | 24,9   | 25,6   | 26,4   | 27,0   | 27,5   | 27,7   |
| 29,0               | 29,9   | 28,6   | 28,2   | 28,5   | 29,3   | 30,2   | 31,0   | 31,6   | 31,9   |
| 30,0               | 34,3   | 32,8   | 32,3   | 32,6   | 33,4   | 34,4   | 35,4   | 36,1   | 36,5   |
| 30,8               | 39,2   | 37,5   | 36,8   | 37,1   | 37,9   | 39,1   | 40,2   | 41,1   | 41,6   |
| 31,7               | 44,6   | 42,7   | 41,9   | 42,1   | 42,9   | 44,2   | 45,5   | 46,6   | 47,3   |
| 32,6               | 50,6   | 48,4   | 47,5   | 47,6   | 48,5   | 49,9   | 51,4   | 52,6   | 53,5   |
| 33,6               | 57,3   | 54,7   | 53,6   | 53,6   | 54,6   | 56,1   | 57,7   | 59,2   | 60,3   |
| 34,5               | 64,6   | 61,7   | 60,4   | 60,3   | 61,2   | 62,8   | 64,7   | 66,4   | 67,7   |
| 35,4               | 72,5   | 69,3   | 67,8   | 67,7   | 68,6   | 70,2   | 72,3   | 74,3   | 75,8   |
| 36,3               | 81,3   | 77,6   | 75,9   | 75,7   | 76,6   | 78,3   | 80,6   | 82,8   | 84,7   |
| 37,2               | 90,9   | 86,7   | 84,7   | 84,4   | 85,3   | 87,1   | 89,6   | 92,1   | 94,2   |
| 38,1               | 101    | 97     | 94     | 94     | 95     | 97     | 99     | 102    | 105    |
| 39,0               | 113    | 107    | 105    | 104    | 105    | 107    | 110    | 113    | 116    |
| 39,9               | 125    | 119    | 116    | 116    | 116    | 118    | 121    | 125    | 128    |
| 40,8               | 138    | 132    | 129    | 128    | 129    | 131    | 134    | 137    | 141    |

**Quadro 5.28.** Fatores de equivalência de carga por eixo tandem triplo, para índice de serventia final igual a 2,0. Espessura placa (cm) - DNER (5).

| Carga por Eixo (tf) | 15     | 17,5   | 20     | 22,5   | 25     | 27,5   | 30     | 32,5   | 35     |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,9                 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| 1,8                 | ,0003  | ,0003  | ,0003  | ,0003  | ,0003  | ,0003  | ,0003  | ,0003  | ,0003  |
| 2,7                 | ,0010  | ,0009  | ,0009  | ,0009  | ,0009  | ,0009  | ,0009  | ,0009  | ,0009  |
| 3,6                 | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   | ,002   |
| 4,5                 | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   | ,005   |
| 5,4                 | ,010   | ,010   | ,009   | ,009   | ,009   | ,009   | ,009   | ,009   | ,009   |
| 6,3                 | ,018   | ,017   | ,017   | ,016   | ,016   | ,016   | ,016   | ,016   | ,016   |
| 7,2                 | ,030   | ,029   | ,028   | ,027   | ,027   | ,027   | ,027   | ,027   | ,027   |
| 8,2                 | ,047   | ,045   | ,044   | ,044   | ,043   | ,043   | ,043   | ,043   | ,043   |
| 9,1                 | ,072   | ,069   | ,067   | ,066   | ,066   | ,066   | ,066   | ,066   | ,066   |
| 10,0                | ,105   | ,101   | ,099   | ,098   | ,097   | ,097   | ,097   | ,097   | ,097   |
| 10,9                | ,149   | ,144   | ,141   | ,139   | ,139   | ,138   | ,138   | ,138   | ,138   |
| 11,8                | ,205   | ,199   | ,195   | ,194   | ,193   | ,192   | ,192   | ,192   | ,192   |
| 12,7                | ,276   | ,270   | ,265   | ,263   | ,262   | ,262   | ,262   | ,262   | ,261   |
| 13,6                | ,364   | ,359   | ,354   | ,351   | ,350   | ,349   | ,349   | ,349   | ,349   |
| 14,5                | ,472   | ,468   | ,463   | ,460   | ,459   | ,458   | ,458   | ,458   | ,458   |
| 15,4                | ,603   | ,600   | ,596   | ,594   | ,593   | ,592   | ,592   | ,592   | ,592   |
| 16,3                | ,759   | ,758   | ,757   | ,756   | ,755   | ,755   | ,755   | ,755   | ,755   |
| 17,2                | ,946   | ,947   | ,949   | ,950   | ,951   | ,951   | ,951   | ,951   | ,951   |
| 18,1                | 1,17   | 1,17   | 1,18   | 1,18   | 1,18   | 1,18   | 1,18   | 1,18   | 1,19   |
| 19,0                | 1,42   | 1,43   | 1,44   | 1,45   | 1,46   | 1,46   | 1,46   | 1,46   | 1,46   |
| 20,0                | 1,73   | 1,73   | 1,76   | 1,77   | 1,78   | 1,78   | 1,79   | 1,79   | 1,79   |
| 20,9                | 2,08   | 2,07   | 2,10   | 2,13   | 2,15   | 2,16   | 2,16   | 2,16   | 2,17   |
| 21,8                | 2,48   | 2,47   | 2,51   | 2,55   | 2,58   | 2,59   | 2,60   | 2,60   | 2,61   |
| 22,7                | 2,95   | 2,92   | 2,97   | 3,03   | 3,07   | 3,09   | 3,10   | 3,11   | 3,11   |
| 23,6                | 3,48   | 3,44   | 3,50   | 3,58   | 3,63   | 3,66   | 3,68   | 3,69   | 3,69   |
| 24,5                | 4,09   | 4,03   | 4,09   | 4,20   | 4,27   | 4,31   | 4,33   | 4,35   | 4,35   |
| 25,4                | 4,78   | 4,69   | 4,76   | 4,89   | 4,99   | 5,05   | 5,08   | 5,09   | 5,10   |
| 26,3                | 5,57   | 5,44   | 5,51   | 5,66   | 5,79   | 5,87   | 5,91   | 5,94   | 5,95   |
| 27,2                | 6,45   | 6,29   | 6,35   | 6,53   | 6,69   | 6,79   | 6,85   | 6,88   | 6,90   |
| 28,1                | 7,43   | 7,23   | 7,28   | 7,49   | 7,69   | 7,82   | 7,90   | 7,94   | 7,97   |
| 29,0                | 8,54   | 8,28   | 8,32   | 8,55   | 8,80   | 8,97   | 9,07   | 9,13   | 9,16   |
| 30,0                | 9,76   | 9,46   | 9,48   | 9,73   | 10,02  | 10,24  | 10,37  | 10,44  | 10,48  |
| 30,8                | 11,1   | 10,8   | 10,8   | 11,0   | 11,4   | 11,6   | 11,8   | 11,9   | 12,0   |
| 31,7                | 12,6   | 12,2   | 12,2   | 12,5   | 12,8   | 13,2   | 13,4   | 13,5   | 13,6   |
| 32,6                | 14,3   | 13,8   | 13,7   | 14,0   | 14,5   | 14,9   | 15,1   | 15,3   | 15,4   |
| 33,6                | 16,1   | 15,5   | 15,4   | 15,7   | 16,2   | 16,7   | 17,0   | 17,2   | 17,3   |
| 34,5                | 18,2   | 17,5   | 17,3   | 17,6   | 18,2   | 18,7   | 19,1   | 19,3   | 19,5   |
| 35,4                | 20,4   | 19,6   | 19,4   | 19,7   | 20,3   | 20,9   | 21,4   | 21,7   | 21,8   |
| 36,3                | 22,8   | 21,9   | 21,6   | 21,9   | 22,6   | 23,3   | 23,8   | 24,2   | 24,4   |
| 37,2                | 25,4   | 24,4   | 24,1   | 24,4   | 25,0   | 25,8   | 26,5   | 26,9   | 27,2   |
| 38,1                | 28,3   | 27,1   | 26,7   | 27,0   | 27,7   | 28,6   | 29,4   | 29,9   | 30,2   |
| 39,0                | 31,4   | 30,1   | 29,6   | 29,9   | 30,7   | 31,6   | 32,5   | 33,1   | 33,5   |
| 39,9                | 34,8   | 33,3   | 32,8   | 33,0   | 33,8   | 34,8   | 35,8   | 36,6   | 37,1   |
| 40,8                | 38,5   | 36,8   | 36,2   | 36,4   | 37,2   | 38,3   | 39,4   | 40,3   | 40,9   |

**Quadro 5.29.** Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 1.

| Carga por eixo                 | Fator de Equivalência | nº de eixos<br>solicitantes no<br>período de projeto | Eixos equivalentes |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|--------------------|
| Eixos Simples                  |                       |                                                      |                    |
| 5,0                            | 0,133                 | 219.000                                              | 29.127             |
| 10,0                           | 2,38                  | 182.500                                              | 434.350            |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
| Eixos Tandem Duplos            |                       |                                                      |                    |
| 17,0                           | 3,0                   | 36.500                                               | 109.500            |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
| Eixos Tandem Triplos           |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
| Nº Total de Eixos Equivalentes |                       |                                                      | 572.977            |

**Quadro 5.30.** Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 2

| Carga por eixo                 | Fator de Equivalência | nº de eixos<br>solicitantes no<br>período de projeto | Eixos equivalentes |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|--------------------|
| Eixos Simples                  |                       |                                                      |                    |
| 5,0                            | 0,133                 | 730.000                                              | 97.090             |
| 10,0                           | 2,38                  | 511.000                                              | 1.216.180          |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
| Eixos Tandem Duplos            |                       |                                                      |                    |
| 17,0                           | 3,0                   | 219.000                                              | 657.000            |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
| Eixos Tandem Triplos           |                       |                                                      |                    |
| 25,5                           | 4,89                  | 73.000                                               | 356.970            |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
|                                |                       |                                                      |                    |
| Nº Total de Eixos Equivalentes |                       |                                                      | 2.327.240          |

**Quadro 5.31.** Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 3.

| Carga por eixo                        | Fator de Equivalência | nº de eixos<br>solicitantes no<br>período de projeto | Eixos equivalentes |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Eixos Simples</b>                  |                       |                                                      |                    |
| 5,0                                   | 0,133                 | 2.190.000                                            | 291.270            |
| 10,0                                  | 2,38                  | 1.460.000                                            | 3.474.800          |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Eixos Tandem Duplos</b>            |                       |                                                      |                    |
| 17,0                                  | 3,0                   | 730.000                                              | 2.190.000          |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Eixos Tandem Triplos</b>           |                       |                                                      |                    |
| 25,5                                  | 4,89                  | 219.000                                              | 1.070.910          |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Nº Total de Eixos Equivalentes</b> |                       |                                                      | <b>7.026.980</b>   |

**Quadro 5.32.** Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 4.

| Carga por eixo                        | Fator de Equivalência | nº de eixos<br>solicitantes no<br>período de projeto | Eixos equivalentes |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Eixos Simples</b>                  |                       |                                                      |                    |
| 5,0                                   | 0,133                 | 7.300.000                                            | 970.900            |
| 10,0                                  | 2,38                  | 4.745.000                                            | 11.293.100         |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Eixos Tandem Duplos</b>            |                       |                                                      |                    |
| 17,0                                  | 3,0                   | 2.555.000                                            | 7.665.000          |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Eixos Tandem Triplos</b>           |                       |                                                      |                    |
| 25,5                                  | 4,89                  | 1.460.000                                            | 7.139.400          |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Nº Total de Eixos Equivalentes</b> |                       |                                                      | <b>27.068.400</b>  |

**Quadro 5.33.** Determinação do número de eixos equivalentes – Tráfego 5.

| Carga por eixo                        | Fator de Equivalência | nº de eixos<br>solicitantes no<br>período de projeto | Eixos equivalentes |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Eixos Simples</b>                  |                       |                                                      |                    |
| 5,0                                   | 0,133                 | 14.600.000                                           | 1.941.800          |
| 10,0                                  | 2,38                  | 9.490.000                                            | 22.586.200         |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Eixos Tandem Duplos</b>            |                       |                                                      |                    |
| 17,0                                  | 3,0                   | 5.110.000                                            | 15.330.000         |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Eixos Tandem Triplos</b>           |                       |                                                      |                    |
| 25,5                                  | 4,89                  | 2.920.000                                            | 14.278.800         |
|                                       |                       |                                                      |                    |
|                                       |                       |                                                      |                    |
| <b>Nº Total de Eixos Equivalentes</b> |                       |                                                      | <b>54.136.800</b>  |

#### 5.4.1.2. Cálculo do coeficiente de recalque de projeto

Para a determinação do coeficiente de recalque de projeto, os passos são os seguintes:

- Determinação da profundidade do estrato rígido  $Z_1(m)$ ;
- Determinação do coeficiente de recalque do subleito  $k_0$ , utilizando as correlações da figura 4.1, ou conforme as equações:

$$k_0 = 0,25 + 5,15 \log \text{CBR para } \text{CBR} \leq 10\% \quad (5.2)$$

$$k_0 = 4,51 + 0,89 \cdot (\log \text{CBR})^{4,34} \text{ para } \text{CBR} > 10\% \quad (5.3)$$

- Correção do  $k_0$ , devido à presença de sub-base, através das figuras (4.2 a 4.5), obtendo-se  $k_1$ ;
- Correção do  $k_1$ , pela presença de estrato rígido, a uma profundidade ( $Z_1$ ) inferior a 3,0 m, obtendo-se  $k_2$ , segundo a fórmula:

$$k_2 = F_Z \cdot k_1 \quad (5.4)$$

Onde:

$F_Z$  = fator de correção calculado pela fórmula:

$$F_Z = e^{0,386 \cdot (3-Z) \times k_1^{(-0,294)}} \quad (5.5)$$

Para efeito dos cálculos foi adotado o valor de  $Z \geq 3,0$  m, que corresponde a um  $F_Z = 1,0$

e) Cálculo do fator de dano relativo “u”, com a fórmula:

$$u = 1,28 \times 10^{(-0,029k_2)} \quad (5.6)$$

f) Cálculo do coeficiente de recalque efetivo,  $k_3$ , em função do dano relativo médio  $\bar{u}$ , pela fórmula:

$$k_3 = 3,7 - 34,5 \cdot \log \bar{u} \quad (5.7)$$

g) Cálculo do coeficiente de recalque de projeto  $k_d$ , pela fórmula:

$$k_d = F_{PS} \times k_3 \quad (5.8)$$

Onde o fator de perda de suporte ( $F_{PS}$ ) é calculado pela fórmula:

$$F_{PS} = 10^{(-0,33 P_S)} \times k_3^{(-0,17 P_S)} \quad (5.9)$$

Sendo  $P_S$  a perda de suporte, que depende do tipo de sub-base e cujos valores são obtidos através do Quadro 5.23.

Em função do exposto, foram determinados os coeficiente de recalques de projeto ( $k_d$ ), para as diversas situações do sistema subleito-sub-base seguintes:

$$1^{\text{a}} \text{ consideração: } \left\{ \begin{array}{l} \text{CBR} = 5\% \text{ e} \\ \text{Sub-base granular} \\ \text{Com espessura de} \\ 10,0 \text{ cm} \\ P_s = 1,5 \end{array} \right.$$

Com o CBR = 5%, determina-se pela equação 5.2 ou pela figura 4.1 o valor de  $k_0$ , cujo valor é  $k_0 = 3,85 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e pela figura 4.2 o valor de  $k_1 = 4,25 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

Como o estrato rígido está a mais de 3,0 m conforme item (d), então  $F_z = 1,0$ , logo pela equação 5.4, temos  $k_2 = k_1 = 4,25 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

Para a determinação do  $k_3$ , utilizamos as equações 5.6 e 5.7, cujos valores obtidos foram  $u = 0,96$  e  $k_3 = 4,3 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

Para o cálculo do coeficiente de recalque de projeto ( $k_d$ ), utilizamos as equações 5.8 e 5.9. Portanto, para a perda de suporte ( $P_s$ ) igual a 1,5 e  $k_3 = 4,31 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  obtivemos o valor de  $F_{P_s} = 0,22$  e  $k_d = 0,95 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

$$2^{\text{a}} \text{ consideração: } \left\{ \begin{array}{l} \text{CBR} = 8,5\% \text{ e sub-base granular} \\ \text{com espessura de } 15,0 \\ P_s = 1,5 \end{array} \right.$$

Utilizando o mesmo procedimento anterior, teremos:

$k_0 = 5,04 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ ;  $k_1 = 6,1 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_3 = 6,1 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_d = 1,21 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

$$3^{\text{a}} \text{ consideração: } \left\{ \begin{array}{l} \text{CBR} = 5\% \text{ e sub-base tratada com cimento} \\ \text{com espessura de } 12,5 \text{ cm} \\ P_s = 0,25 \end{array} \right.$$

Utilizando as figuras 4.1 e 4.3 e considerando a perda de suporte da sub-base  $P_s = 0,25$ , teremos:

$k_0 = 3,85 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ ;  $k_1 = 8,4 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_3 = 8,3 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_d = 6,3 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

4ª consideração:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{CBR} = 5,5\% \text{ e sub-base tratada com cimento} \\ \text{com espessura de } 15,0 \text{ cm} \\ P_s = 0,25 \end{array} \right.$

Usando as mesmas figuras e as mesmas considerações do caso anterior, teremos:

$k_0 = 4,1 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ ;  $k_1 = 10,4 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_3 = 10,4 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_d = 7,8 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

5ª consideração:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{CBR} = 8\% \text{ e que sub-base tratada com cimento} \\ \text{com espessura de } 20,0 \text{ cm} \\ P_s = 0,25 \end{array} \right.$

Usando procedimento igual ao caso anterior, teremos:

$k_0 = 4,9 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ ;  $k_1 = 15,25 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_3 = 15,33 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  e  $k_d = 11,34 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ .

#### 5.4.1.3. Resistência e módulo de elasticidade do concreto

O módulo de elasticidade do concreto foi considerado  $E = 280.000 \text{ kgf/cm}^2$  e as resistências à tração na flexão aos 28 dias com  $41 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $45 \text{ kgf/cm}^2$  e  $50 \text{ kgf/cm}^2$ . Valores estes iguais aos dimensionamentos anteriores.

#### 5.4.1.4. Coeficiente de drenagem e o coeficiente de transferência de carga J

##### 5.4.1.4.1. Coeficiente de drenagem “C<sub>d</sub>”

Foi considerado que havia uma boa drenagem e que a estrutura estará exposta a níveis de umidade perto da saturação, entre 5% e 25%, resultando no valor de  $C_d = 1,10$  conforme Quadro 5.24.

#### 5.4.1.4.2. Valores de coeficiente de transferência de carga “J”

Através do quadro 5.25, considerando as condições climáticas leve e placas com 5,0 m de comprimento, teremos:

|                            |                |                                                                                                                             |
|----------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S/ barras de transferência | S/ acostamento | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sub-base granular: J = 4,2</li> <li>Sub-base tratado com cimento: J = 3,8</li> </ul> |
|                            | C/acostamento  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sub-base granular: J = 3,6</li> <li>Sub-base tratado com cimento: J = 3,2</li> </ul> |
| C/ barras de transferência | S/ acostamento | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sub-base granular: J = 3,0</li> <li>Sub-base tratado com cimento: J = 2,7</li> </ul> |
|                            | C/acostamento  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sub-base granular: J = 2,9</li> <li>Sub-base tratado com cimento: J = 2,5</li> </ul> |

#### 5.4.1.5. Determinação das resistências de projeto

A resistência de projeto ( $R_E$ ) é calculada em função da resistência à tração na flexão ( $R_m$ ), do coeficiente de drenagem ( $C_d$ ) e do coeficiente de transferência de carga (J), utilizando a seguinte equação:

$$R_E = \frac{R_m \times C_d}{J} \quad (5.10)$$

1ª determinação: para a sub-base granular, isto é,  $k = 40$  e  $60 \text{ MPa/m}$

a) Pavimento sem barras de transferência

a.1) Sem acostamento de concreto:  $J = 4,2$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 10,74 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 11,79 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 13,10 \text{ kgf/cm}^2$

a.2) com acostamento de concreto:  $J = 3,6$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 12,53 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 13,75 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 15,28 \text{ kgf/cm}^2$

b) Pavimentos com barras de transferência

b.1) sem acostamento de concreto:  $J = 3,0$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 15,03 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 16,50 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 18,33 \text{ kgf/cm}^2$

b.2) com acostamento de concreto:  $J = 2,9$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 15,55 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 17,10 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 18,97 \text{ kgf/cm}^2$

2ª determinação: para sub-base tratada com cimento, isto é, para  $k = 80, 100$  e  $150$

MPa/m

c) Pavimento sem barras de transferência

c.1) sem acostamento de concreto:  $J = 3,8$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 11,87 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 13,03 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 14,47 \text{ kgf/cm}^2$

c.2) com acostamento de concreto:  $J = 3,2$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 14,10 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 15,47 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 17,19 \text{ kgf/cm}^2$

d) pavimento com barras de transferência

d.1) sem acostamento de concreto:  $J = 2,7$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 16,70 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 18,33 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 20,37 \text{ kgf/cm}^2$

d.2) com acostamento de concreto:  $J = 2,5$

$P/R_m = 41 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 18,04 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 45 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 19,80 \text{ kgf/cm}^2$

$P/R_m = 50 \text{ kgf/cm}^2$ , pela equação 5.10, temos  $R_E = 22,00 \text{ kgf/cm}^2$

#### 5.4.2. Cálculo das espessuras

As espessuras são calculadas através da seguinte expressão:

$$T = \left[ \frac{h + 2,54}{2,588} \right]^{7,35} \times 10^{a_1} \times B^{(4,22 - 0,32P_f)} \quad (5.11)$$

Em que:

$$a_1 = \frac{\log(0,33 \Delta \rho)}{1 + \left[ \frac{18,078}{h + 2,54} \right]^{8,46}} \quad (5.12)$$

$$B = \frac{R_E}{15,185} \left[ \frac{h^{0,75} - 2,278}{h^{0,75} - 46,79 \left( \frac{k}{E} \right)^{0,25}} \right] \quad 5.13$$

T: eixos equivalentes totais (EE x F);

h: espessura da placa (cm);

$R_E$ : resistência equivalente em kgf/cm<sup>2</sup>;

k: coeficiente de recalque de projeto em kgf/cm<sup>2</sup>/cm;

$\Delta P$ : perda de serventia, que é igual a  $P_i - P_f$ ;

onde  $P_i$  e  $P_f$  são os índices de serventia inicial e final, respectivamente, geralmente adota-se:  $P_i = 4,5$  e  $P_f = 2,0$  (ou 2,5).

Se com o “h” adotado produzir um “T” pela equação 5.11 maior ou igual ao “T” de projeto, então a espessura é suficiente, portanto o pavimento está dimensionado.

Toda esta seqüência de cálculo das espessuras está de conformidade com o DNER (5), e os resultados estão nos quadros 5.34, 5.35, 5.36 e 5.37.

**Quadro 5.34.** Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – sem barras e sem acostamento

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 17,0       | 21,0 | 26,5 | 32,5 | 35,5 | 16,0       | 20,0 | 25,5 | 31,0 | 34,0 | 15,0       | 19,0 | 24,0 | 29,0 | 32,0 |
| 60      | 16,5       | 21,0 | 26,5 | 32,0 | 35,5 | 16,0       | 20,0 | 25,0 | 30,5 | 34,0 | 15,0       | 18,5 | 23,5 | 29,0 | 32,0 |
| 80      | 13,5       | 18,0 | 23,0 | 29,0 | 32,0 | 12,5       | 16,5 | 22,0 | 27,5 | 30,5 | 12,0*      | 15,5 | 20,5 | 25,5 | 28,5 |
| 100     | 13,0       | 17,5 | 23,0 | 28,5 | 31,5 | 12,0*      | 16,5 | 21,5 | 27,0 | 30,0 | 11,0*      | 15,0 | 20,5 | 25,5 | 28,5 |
| 150     | 12,0       | 16,5 | 22,0 | 28,0 | 31,0 | 11,0*      | 15,5 | 21,0 | 26,5 | 29,5 | 9,0*       | 14,0 | 19,5 | 25,0 | 28,0 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

**Quadro 5.35.** Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – sem barras e com acostamento

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 15,5       | 19,5 | 24,5 | 30,0 | 33,0 | 14,5       | 18,5 | 23,5 | 28,5 | 31,5 | 14,0       | 17,5 | 22,0 | 27,0 | 30,0 |
| 60      | 15,5       | 19,0 | 24,5 | 29,5 | 33,0 | 14,5       | 18,0 | 23,0 | 28,5 | 31,5 | 13,5       | 17,0 | 22,0 | 26,5 | 29,5 |
| 80      | 12,0*      | 16,0 | 21,0 | 26,0 | 29,0 | 11,0*      | 15,0 | 20,0 | 25,0 | 27,5 | 10,0*      | 14,0 | 18,5 | 23,5 | 26,0 |
| 100     | 11,5*      | 15,5 | 20,5 | 26,0 | 29,0 | 10,5*      | 14,5 | 19,5 | 24,5 | 27,5 | 9,5*       | 13,5 | 18,0 | 23,0 | 25,5 |
| 150     | 9,5*       | 14,5 | 20,0 | 25,0 | 28,0 | 8,5*       | 13,5 | 18,5 | 24,0 | 26,5 | 8,5*       | 12,0 | 17,5 | 22,5 | 25,0 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

**Quadro 5.36.** Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – com barras e sem acostamento

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 14,0       | 17,5 | 22,0 | 27,0 | 30,0 | 13,0       | 16,5 | 21,0 | 26,0 | 28,5 | 12,5       | 15,5 | 20,0 | 24,5 | 27,0 |
| 60      | 13,5       | 17,5 | 22,0 | 27,0 | 30,0 | 13,0       | 16,5 | 21,0 | 25,5 | 28,5 | 12,5       | 15,5 | 20,0 | 24,5 | 27,0 |
| 80      | 10,5*      | 14,0 | 19,0 | 23,5 | 26,5 | 9,5*       | 13,0 | 18,0 | 22,5 | 25,0 | 8,5*       | 12,0 | 16,5 | 21,0 | 23,5 |
| 100     | 9,5*       | 13,5 | 18,5 | 23,5 | 26,0 | 8,5*       | 12,5 | 17,5 | 22,0 | 25,0 | 8,5*       | 11,5 | 16,0 | 21,0 | 23,5 |
| 150     | 8,5*       | 12,5 | 17,5 | 22,5 | 25,5 | 8,5*       | 11,5 | 16,5 | 21,5 | 24,0 | 8,5*       | 10,0 | 15,5 | 20,0 | 22,5 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

**Quadro 5.37.** Dimensionamento pavimento rígido – método AASHTO/86/93 – com barras e com acostamento

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 13,5       | 17,0 | 22,0 | 26,5 | 29,5 | 13,0       | 16,0 | 20,5 | 25,5 | 28,0 | 12,0       | 15,5 | 19,5 | 24,0 | 26,5 |
| 60      | 13,5       | 17,0 | 21,5 | 26,5 | 29,5 | 13,0       | 16,0 | 20,5 | 25,0 | 28,0 | 12,0       | 15,0 | 19,5 | 24,0 | 26,5 |
| 80      | 10,0*      | 13,5 | 18,0 | 22,5 | 25,5 | 9,0*       | 12,5 | 17,0 | 21,5 | 24,0 | 8,5*       | 11,5 | 16,0 | 20,0 | 22,5 |
| 100     | 9,0*       | 13,0 | 17,5 | 22,5 | 25,0 | 8,5*       | 12,0 | 16,5 | 21,0 | 23,5 | 8,0*       | 11,0 | 15,5 | 20,0 | 22,5 |
| 150     | 8,5*       | 11,5 | 17,0 | 21,5 | 24,5 | 8,0*       | 10,5 | 15,5 | 20,5 | 23,0 | 8,0*       | 8,5  | 14,5 | 19,0 | 21,5 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

### 5.4.3. Determinação das espessuras conforme o procedimento original

Como a metodologia apresentada pelo DNER (5) faz uso de gráficos que é usado no método da PCA, como é o caso das figuras 4.1 a 4.5, então passaremos a descrever o procedimento do método da AASHTO/86.

Conforme o guia da AASHTO para projeto estrutural de pavimento, a principal propriedade do material usada para caracterizar o solo do subleito é o módulo resiliente ( $M_R$ ), determinado pelo método AASHTO T.274.

O módulo resiliente é uma medida da propriedade elástica do solo, porém quando usado para projeto de pavimento rígido, deve ser convertido para um módulo de reação do subleito ( $k$ ).

O guia da AASHTO propõe uma correlação entre o CBR e o módulo resiliente através da expressão:

$$M_{R_1} \text{ (Psi)} = 1.500 \times \text{CBR} \quad (5.14)$$

A conversão do módulo resiliente do subleito em módulo de reação “ $k$ ” é feita de dois modos:

1º) Quando a placa é colocada diretamente no subleito.

Neste caso, o módulo de reação do subleito “ $k$ ”, é definido pelo uso da relação teórica entre os valores de “ $k$ ”, obtidos através de prova de carga e o módulo resiliente do subleito, conforme a expressão:

$$k(\text{Pci}) = \frac{M_{R_1}}{19,4} \quad (5.15)$$

2º) Quando a placa é colocada sobre uma sub-base.

Neste caso, devem ser conhecidos o módulo resiliente do subleito, a espessura e o módulo de elasticidade da sub-base e, através da figura 5.8 determina-se o módulo de reação do sistema subleito-sub-base.





da perda de suporte de cada material (sub-base), temos para cada condição, através da figura 5.11, o módulo de reação do subleito de projeto.

Para a 1ª condição:

$$k = 400 \text{ Pci (11,08 kgf/cm}^2\text{/cm)} \quad \begin{cases} P_S = 1,0 \Rightarrow k_d = 3,6 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 1,5 \Rightarrow k_d = 1,90 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 3,0 \Rightarrow k_d = 0,48 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \end{cases}$$

Para a 2ª condição:

$$k = 600 \text{ Pci (16,62 kgf/cm}^2\text{/cm)} \quad \begin{cases} P_S = 1,0 \Rightarrow k_d = 5,1 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 1,5 \Rightarrow k_d = 2,49 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 3,0 \Rightarrow k_d = 0,55 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \end{cases}$$

Para a 3ª condição:

$$k = 630 \text{ Pci (17,45 kgf/cm}^2\text{/cm)} \quad \begin{cases} P_S = 0 \Rightarrow k_d = 18,3 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 12,47 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 1,0 \Rightarrow k_d = 5,2 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \end{cases}$$

Para a 4ª condição:

$$k = 800 \text{ Pci (22,16 kgf/cm}^2\text{/cm)} \quad \begin{cases} P_S = 0 \Rightarrow k_d = 23,5 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 16,6 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 1,0 \Rightarrow k_d = 6,6 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \end{cases}$$

(valor máximo de “k” para dimensionamento)

Para a 5ª condição

$$k = 1.300 \text{ Pci (36,0 kgf/cm}^2\text{/cm)} \quad \begin{cases} P_S = 0 \Rightarrow k_d = 27,7 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 24,9 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \\ P_S = 1,0 \Rightarrow k_d = 9,1 \text{ kgf/cm}^2\text{/cm} \end{cases}$$

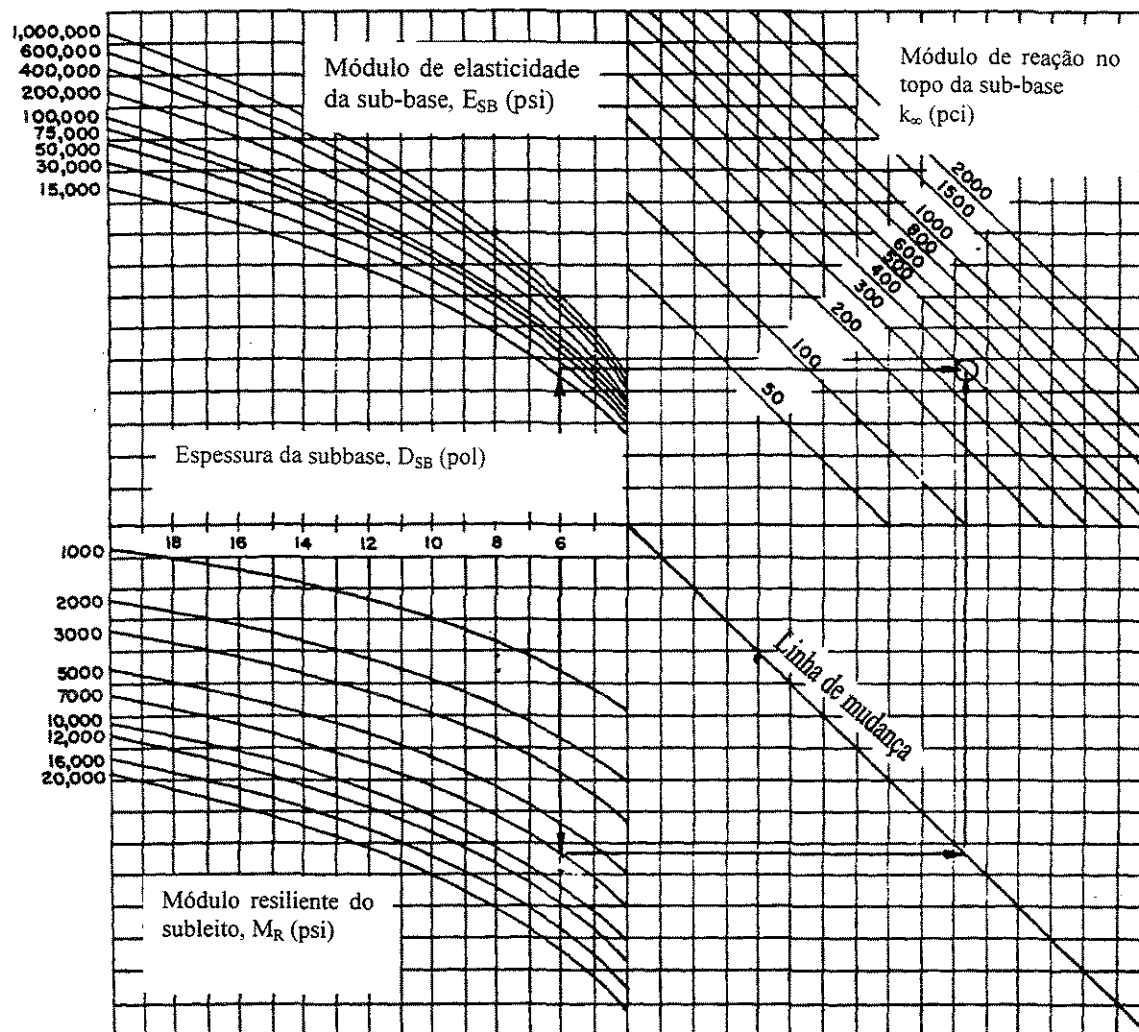
Exemplo:

$D_{SB} = 6$  pol

$E_{SB} = 20,000$  psi

$M_R = 7,000$  psi

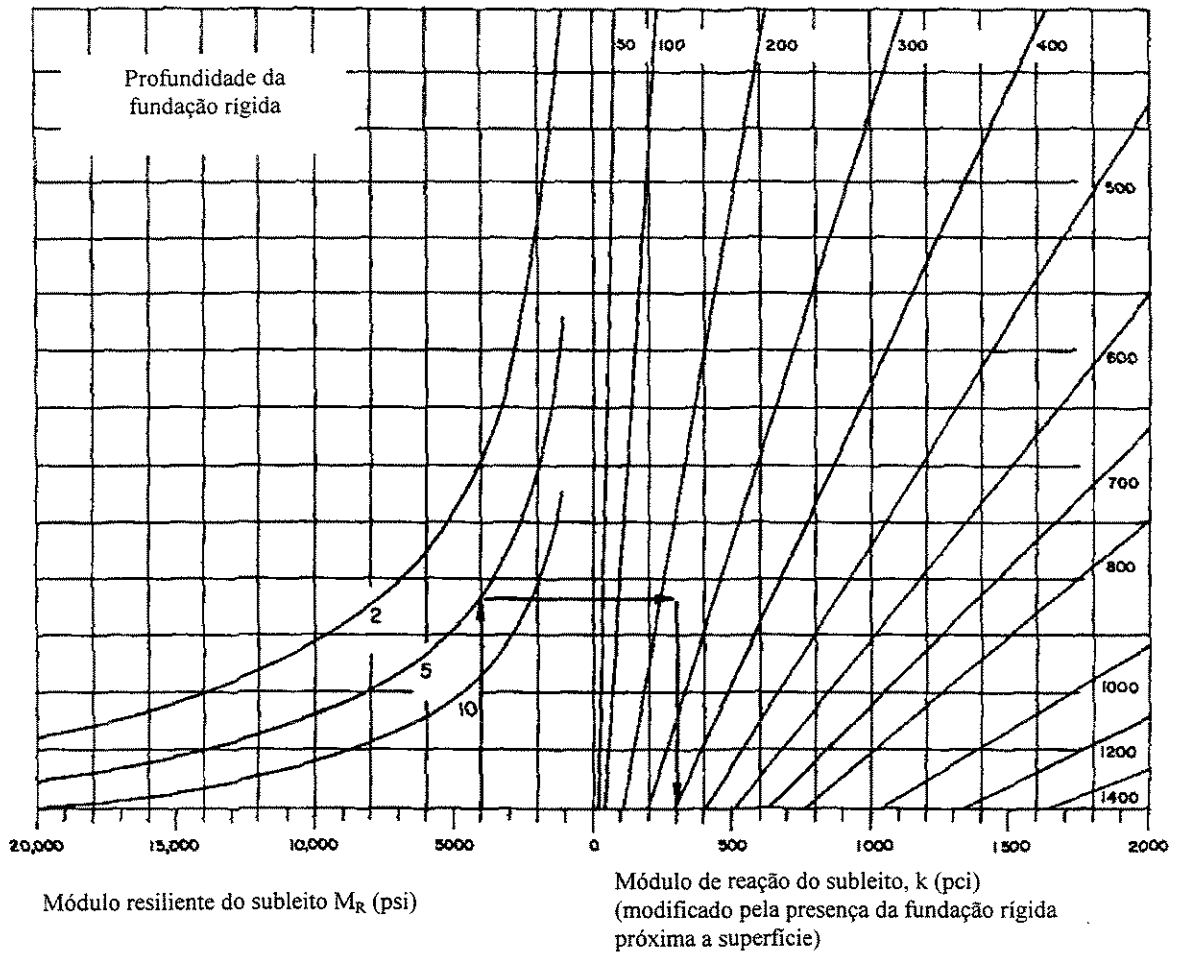
Solução:  $k_{\infty} = 400$  pci



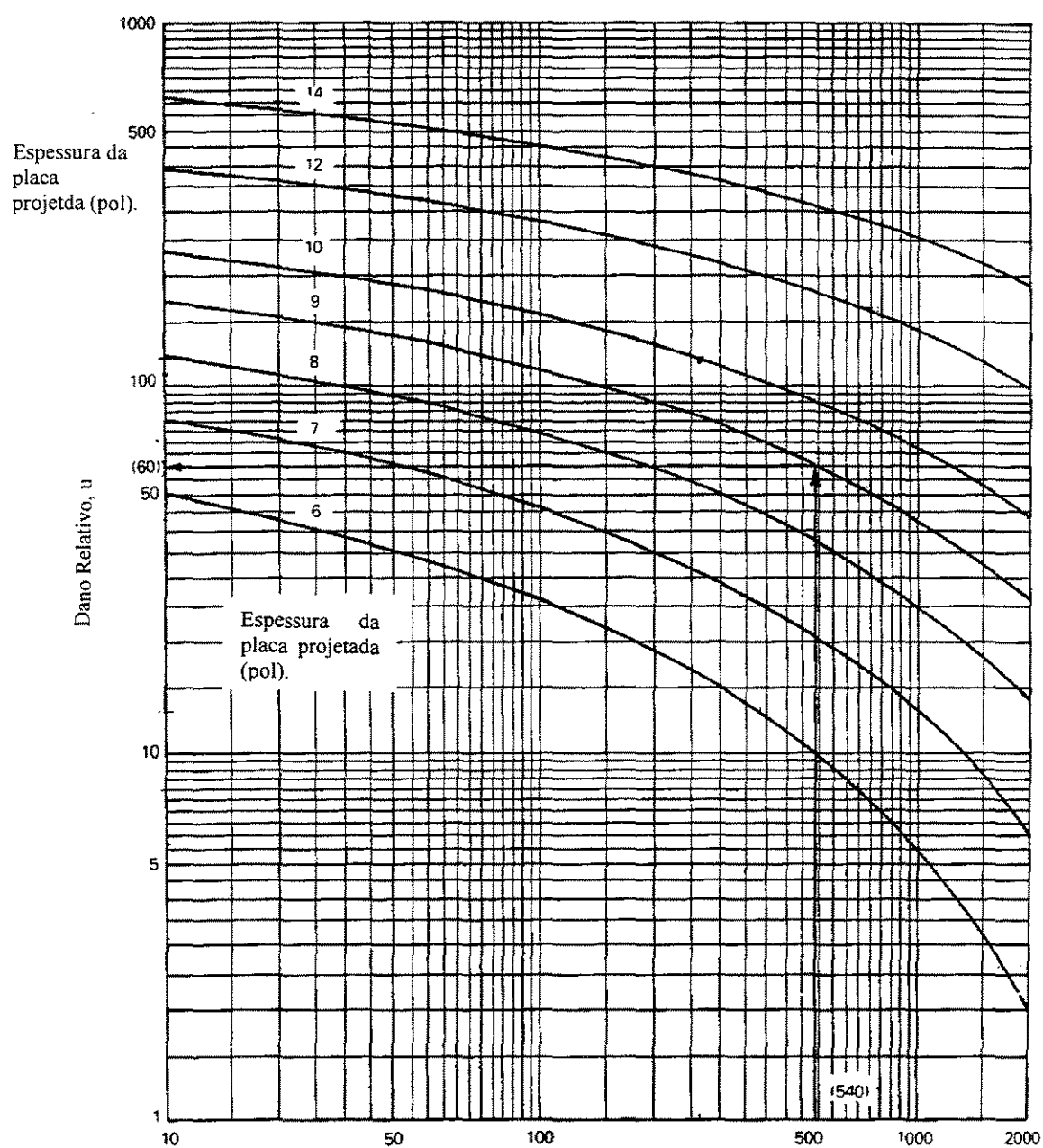
**Figura 5.8.** Gráfico para estimar o valor de K no topo da sub-base.

Fonte: AASHTO/86 (1).

Exemplo:  $k_{\infty} = 230 \text{ pci}$   
 $M_R = 4000 \text{ psi}$  solução:  $k = 300 \text{ pci}$   
 $D_{SG} = 5 \text{ ft.}$

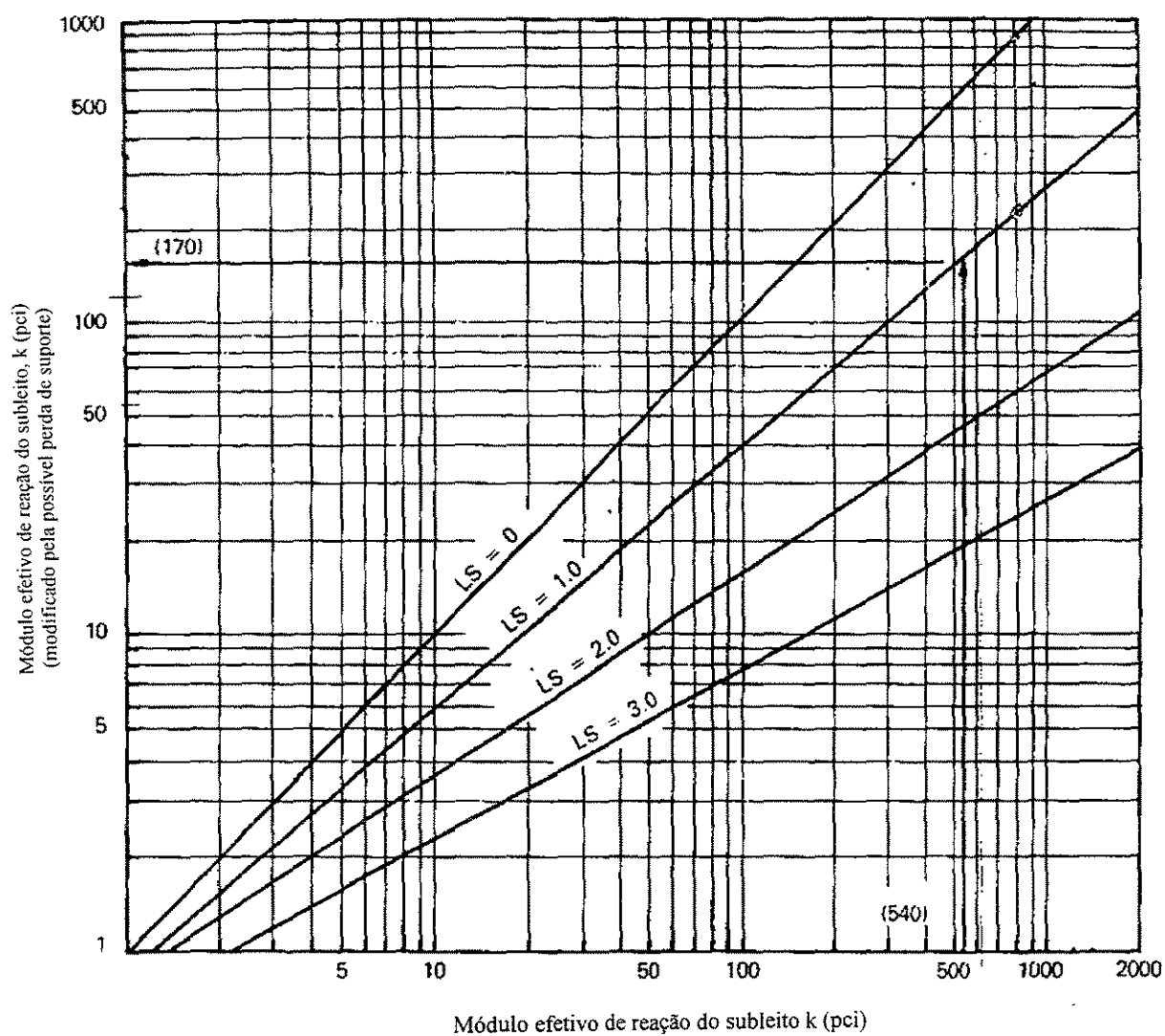


**Figura 5.9.** Gráfico para modificar o módulo de reação do subleito em função da fundação rígida.  
 Fonte: AASHTO/86 (1).



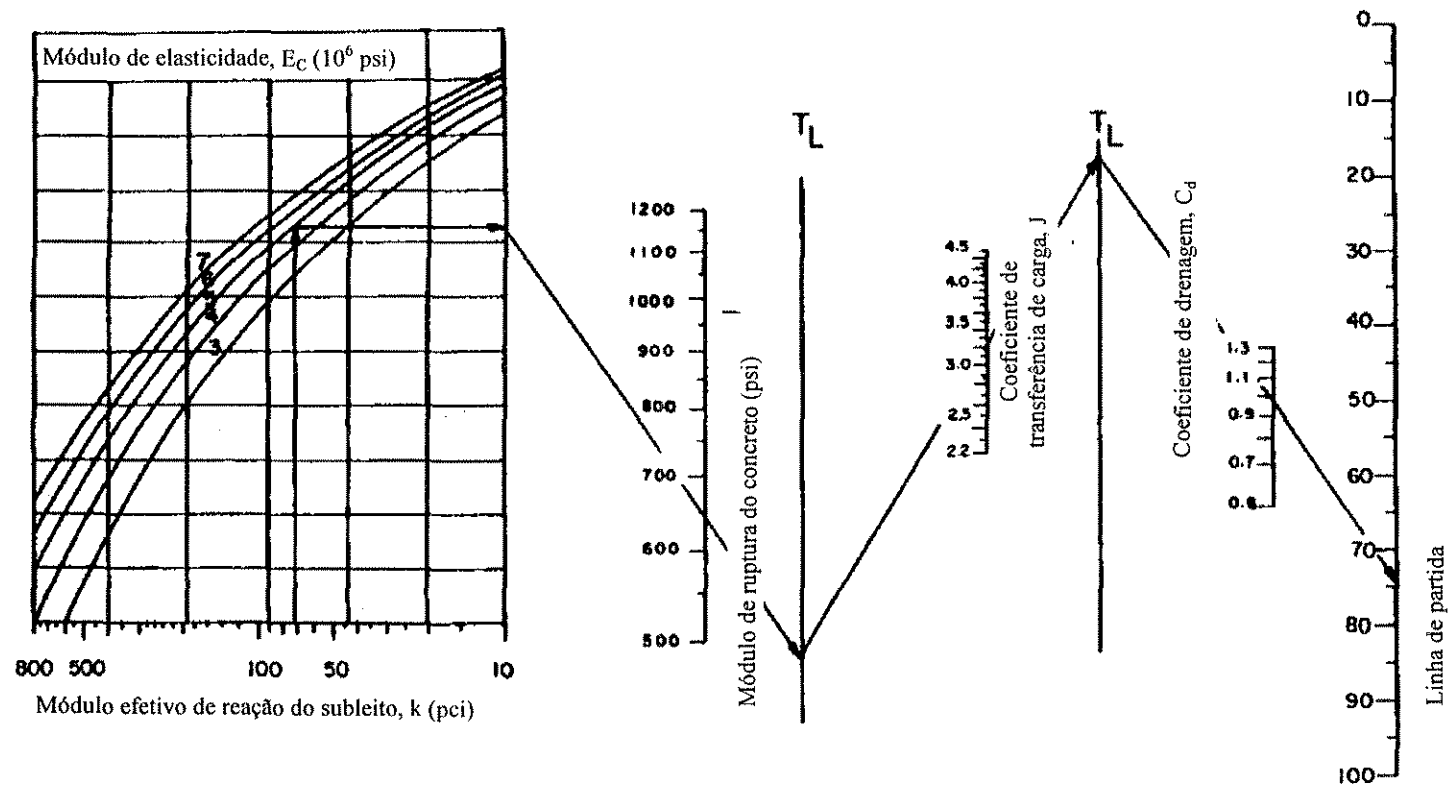
**Figura 5.10.** Gráfico para estimar o dano relativo para os pavimentos rígidos em função da espessura da placa.

Fonte: AASHTO/86 (1).

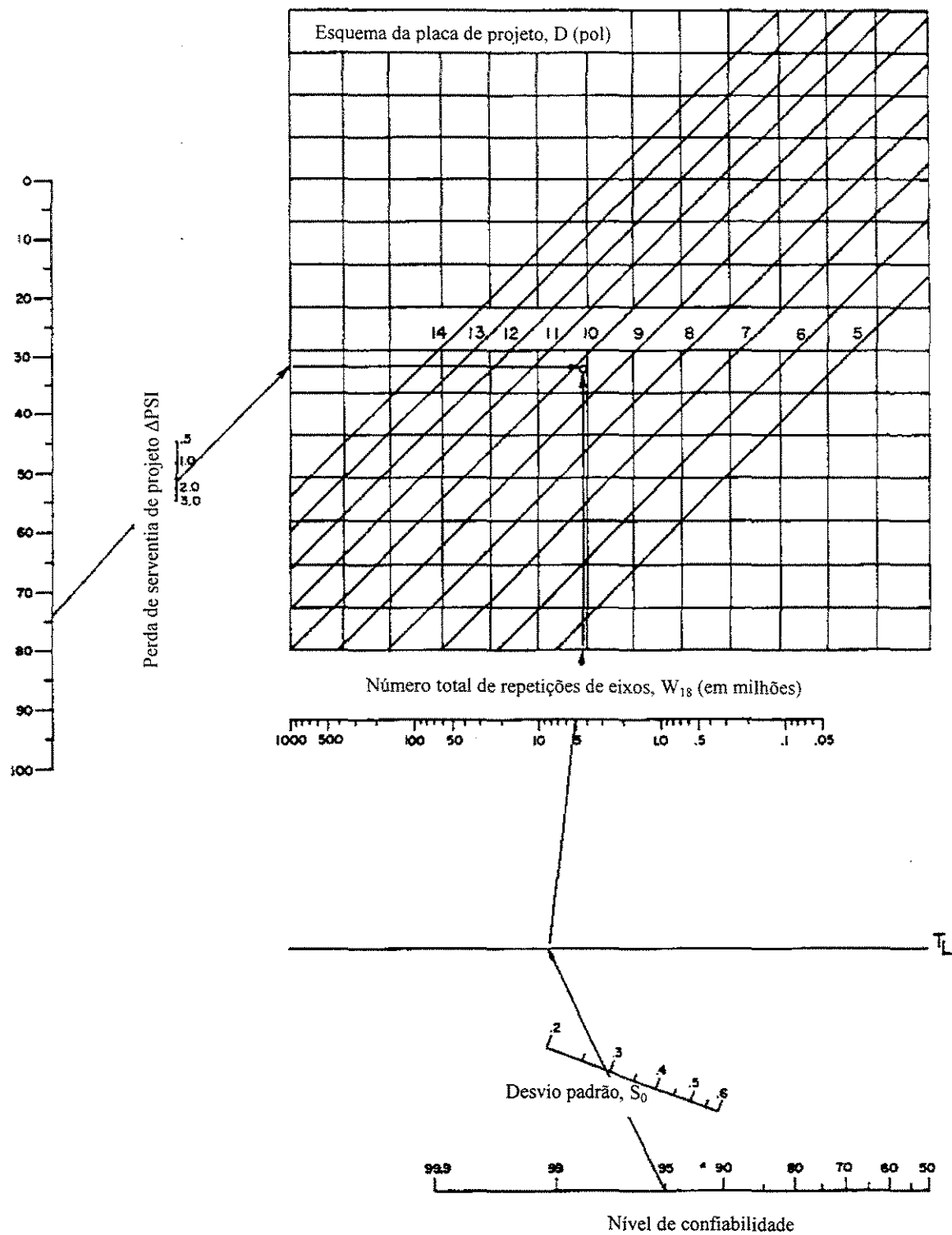


**Figura 5.11.** Correção do módulo efetivo de reação do subleito para a possível perda de suporte da sub-base.

Fonte: AASHTO/86 (1).



**Figura 5.12.** Gráfico para determinação da espessura da placa (segmento I).  
 Fonte: AASHTO/86 (1).



**Figura 5.13.** Gráfico para determinar a espessura da placa (segmento II)  
 Fonte: AASHTO/86 (1).

**Quadro 5.38.** Exemplo de aplicação do método para estimar o módulo de reação efetivo do subleito

Sub-base: Tipo: Granular

Profundidade da fundação rígida (pés): 5

Espessura (pol): 6

Espessura da placa projetada (pol): 9

Perda de suporte: 1.0

| (1)        | (2)                            | (3)                               | (4)                                    | (5)                                                 | (6)                            |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Mês        | Módulo do subleito $M_R$ (psi) | Módulo da sub-base $E_{SB}$ (psi) | K no topo da sub-base (Pci) (fig. 5.8) | Valor de K (Pci) sobre a fundação rígida (fig. 5.9) | Dano relativo, $u$ (fig. 5.10) |
| Jan.       | 20.000                         | 50.000                            | 1.100                                  | 1.350                                               | .35                            |
| Fev.       | 20.000                         | 50.000                            | 1.100                                  | 1.350                                               | 0.35                           |
| Mar.       | 2.500                          | 15.000                            | 160                                    | 230                                                 | 0.86                           |
| Abr.       | 4.000                          | 15.000                            | 230                                    | 300                                                 | 0.78                           |
| Maio       | 4.000                          | 15.000                            | 230                                    | 300                                                 | 0.78                           |
| Jun.       | 7.000                          | 20.000                            | 410                                    | 540                                                 | 0.60                           |
| Jul.       | 7.000                          | 20.000                            | 410                                    | 540                                                 | 0.60                           |
| Ago.       | 7.000                          | 20.000                            | 410                                    | 540                                                 | 0.60                           |
| Set.       | 7.000                          | 20.000                            | 410                                    | 540                                                 | 0.60                           |
| Out.       | 7.000                          | 20.000                            | 410                                    | 540                                                 | 0.60                           |
| Nov.       | 4.000                          | 15.000                            | 230                                    | 300                                                 | 0.78                           |
| Dez.       | 20.000                         | 50.000                            | 1.100                                  | 1.350                                               | 0.35                           |
| Somatório: |                                |                                   |                                        |                                                     | 7,25                           |

$$\text{Média: } \bar{u}_r = \frac{\sum u_r}{n} = \frac{7.25}{12} = 0.60$$

Módulo efetivo de reação do subleito,  $k$  (pci) = 540Corrigido pela perda de suporte:  $k$  (pci) = 170

Fonte: AASHTO/86 (1).

#### 5.4.3.2. Resultados obtidos para os módulos de reação do subleito de projeto, conforme DNER e AASHTO/86

Esta comparação é feita com a eliminação do dano relativo calculado no procedimento do DNER, assim, os resultados são os seguintes:

1ª condição:

|                        |                                                               |          |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|----------|
| $k = 40 \text{ MPa/m}$ | $P_S = 1,5 \Rightarrow k_d = 0,95 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ | (DNER)   |
|                        | $P_S = 1,5 \Rightarrow k_d = 1,90 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ | (AASHTO) |

2ª condição:

|                        |                                                               |          |
|------------------------|---------------------------------------------------------------|----------|
| $k = 60 \text{ MPa/m}$ | $P_S = 1,5 \Rightarrow k_d = 1,21 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ | (DNER)   |
|                        | $P_S = 1,5 \Rightarrow k_d = 2,49 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ | (AASHTO) |

3ª condição:

|                        |                                                                 |          |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------|
| $k = 80 \text{ MPa/m}$ | $P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 6,3 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$   | (DNER)   |
|                        | $P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 12,47 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ | (AASHTO) |

4ª condição

|                         |                                                                |          |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|----------|
| $k = 100 \text{ MPa/m}$ | $P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 7,8 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  | (DNER)   |
|                         | $P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 16,6 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ | (AASHTO) |

5ª condição

|                         |                                                                 |          |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------|
| $k = 150 \text{ MPa/m}$ | $P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 11,34 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ | (DNER)   |
|                         | $P_S = 0,25 \Rightarrow k_d = 24,9 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$  | (AASHTO) |

Conforme o guia da AASHTO, o valor máximo a ser usado para o coeficiente de recalque de projeto é  $k = 800 \text{ Pci}$  ( $22,16 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ ).

#### 5.4.3.3. Variação da espessura em função da perda de suporte ( $P_S$ )

Para essa verificação vamos considerar a 2ª e 4ª condições, que correspondem, respectivamente, a uma sub-base granular e a uma sub-base tratada com cimento, ambas com 15,0 cm de espessura. São considerados os tráfegos 3 e 4, levando-se em conta o módulo de ruptura de 4,5 MPa e também que o pavimento possua barras de transferência e seja sem acostamentos de concreto.

|                                        |           |                                                                                              |
|----------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2ª condição<br>$k = 60 \text{ MPa/m}$  | Tráfego 3 | $P_S = 1,0 \Rightarrow k = 5,1 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 19,5 \text{ cm}$   |
|                                        |           | $P_S = 1,5 \Rightarrow k = 2,49 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 20,5 \text{ cm}$  |
|                                        |           | $P_S = 3,0 \Rightarrow k = 0,55 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 21,5 \text{ cm}$  |
|                                        | Tráfego 4 | $P_S = 1,0 \Rightarrow k = 5,1 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 24,0 \text{ cm}$   |
|                                        |           | $P_S = 1,5 \Rightarrow k = 2,49 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 25,0 \text{ cm}$  |
|                                        |           | $P_S = 3,0 \Rightarrow k = 0,55 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 26,0 \text{ cm}$  |
| 4ª condição<br>$k = 100 \text{ MPa/m}$ | Tráfego 3 | $P_S = 0 \Rightarrow k = 22,16 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 14,0 \text{ cm}$   |
|                                        |           | $P_S = 0,25 \Rightarrow k = 16,6 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 15,5 \text{ cm}$ |
|                                        |           | $P_S = 1,0 \Rightarrow k = 6,6 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 17,5 \text{ cm}$   |
|                                        | Tráfego 4 | $P_S = 0 \Rightarrow k = 22,16 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 19,5 \text{ cm}$   |
|                                        |           | $P_S = 0,25 \Rightarrow k = 16,6 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 20,5 \text{ cm}$ |
|                                        |           | $P_S = 1,0 \Rightarrow k = 6,6 \text{ kgf/cm}^2/\text{cm} \Rightarrow h = 22,5 \text{ cm}$   |

#### 5.4.3.4. Cálculo das espessuras

Os resultados obtidos através da metodologia original da AASHTO, estão nos quadros 5.39, 5.40, 5.41 e 5.42.

**Quadro 5.39.** Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – sem barras e sem acostamentos

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 16,5       | 20,5 | 26,0 | 32,0 | 35,0 | 15,5       | 19,5 | 24,5 | 30,0 | 33,5 | 14,5       | 18,5 | 23,5 | 28,5 | 31,5 |
| 60      | 16,0       | 20,0 | 25,5 | 31,5 | 35,0 | 15,0       | 19,0 | 24,5 | 30,0 | 33,0 | 14,0       | 18,0 | 23,0 | 28,5 | 31,5 |
| 80      | 12,5       | 16,0 | 22,0 | 27,5 | 31,0 | 12,5       | 15,0 | 20,5 | 26,0 | 29,5 | 12,5       | 14,0 | 19,5 | 24,5 | 27,5 |
| 100     | 12,5       | 15,5 | 21,5 | 27,0 | 30,5 | 12,5       | 14,0 | 20,0 | 25,5 | 28,5 | 12,5       | 12,5 | 18,5 | 24,0 | 27,0 |
| 150     | 12,5       | 14,0 | 20,0 | 26,5 | 29,5 | 12,5       | 12,5 | 19,0 | 25,0 | 28,0 | 12,5       | 12,5 | 17,5 | 23,0 | 26,5 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

**Quadro 5.40.** Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – sem barras e com acostamentos

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 15,0       | 19,0 | 24,0 | 29,5 | 32,5 | 14,0       | 18,0 | 22,5 | 28,0 | 31,0 | 13,0       | 16,5 | 21,5 | 26,5 | 29,0 |
| 60      | 14,5       | 18,5 | 23,5 | 29,0 | 32,0 | 13,5       | 17,5 | 22,0 | 27,5 | 30,5 | 13,0       | 16,5 | 21,0 | 26,0 | 29,0 |
| 80      | 12,5       | 14,0 | 19,5 | 25,0 | 28,0 | 12,5       | 13,0 | 18,5 | 23,5 | 26,5 | 12,5       | 12,5 | 17,0 | 22,0 | 25,0 |
| 100     | 12,5       | 13,0 | 19,0 | 24,5 | 27,5 | 12,5       | 12,5 | 17,5 | 23,0 | 26,0 | 12,5       | 12,5 | 16,0 | 21,5 | 24,5 |
| 150     | 12,5       | 12,5 | 18,0 | 23,5 | 26,5 | 12,5       | 12,5 | 16,5 | 22,0 | 25,0 | 12,5       | 12,5 | 15,0 | 20,5 | 23,5 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

**Quadro 5.41.** Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – com barras e sem acostamentos

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 13,5       | 17,0 | 21,5 | 26,5 | 29,5 | 12,5       | 16,0 | 20,5 | 25,5 | 28,0 | 12,5       | 15,0 | 19,5 | 24,0 | 26,5 |
| 60      | 13,0       | 16,5 | 21,0 | 26,0 | 29,0 | 12,5       | 15,5 | 20,0 | 25,0 | 27,5 | 12,5       | 14,5 | 19,0 | 23,5 | 26,0 |
| 80      | 12,5       | 12,5 | 17,5 | 22,5 | 25,5 | 12,5       | 12,5 | 16,5 | 21,0 | 24,0 | 12,5       | 12,5 | 15,0 | 20,0 | 22,5 |
| 100     | 12,5       | 12,5 | 16,5 | 22,0 | 24,5 | 12,5       | 12,5 | 15,5 | 20,5 | 23,5 | 12,5       | 12,5 | 14,0 | 19,0 | 22,0 |
| 150     | 12,5       | 12,5 | 15,5 | 21,0 | 24,0 | 12,5       | 12,5 | 14,0 | 19,5 | 22,5 | 12,5       | 12,5 | 12,5 | 18,0 | 21,0 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

**Quadro 5.42.** Dimensionamento pavimento rígido – método original AASHTO/86/93 – com barras e com acostamentos

| MR      | 4.1        |      |      |      |      | 4.5        |      |      |      |      | 5.0        |      |      |      |      |
|---------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| Tráfego | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    | 1          | 2    | 3    | 4    | 5    |
| k       | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      | ESPESSURAS |      |      |      |      |
| 40      | 13,0       | 16,5 | 21,5 | 26,0 | 29,0 | 12,5       | 15,5 | 20,0 | 25,0 | 27,5 | 12,5       | 14,5 | 19,0 | 23,5 | 26,0 |
| 60      | 12,5       | 16,0 | 21,0 | 26,0 | 28,5 | 12,5       | 15,5 | 20,0 | 24,5 | 27,5 | 12,5       | 14,5 | 18,5 | 23,0 | 25,5 |
| 80      | 12,5       | 12,5 | 16,5 | 21,5 | 24,0 | 12,5       | 12,5 | 15,5 | 20,0 | 23,0 | 12,5       | 12,5 | 14,0 | 19,0 | 21,5 |
| 100     | 12,5       | 12,5 | 15,5 | 21,0 | 23,5 | 12,5       | 12,5 | 14,5 | 19,5 | 22,0 | 12,5       | 12,5 | 13,0 | 18,0 | 20,5 |
| 150     | 12,5       | 12,5 | 14,0 | 20,0 | 23,0 | 12,5       | 12,5 | 12,5 | 18,5 | 21,5 | 12,5       | 12,5 | 12,5 | 17,0 | 20,0 |

\*Para  $h < 12,5$  cm considerar  $h = 12,5$  cm.

## 5.5. Pavimentos de Concreto Estruturalmente Armados

### 5.5.1. Generalidades

Entende-se por pavimento de concreto estruturalmente armado, aquele em que a armadura é colocada na parte inferior da placa, tendo a função de combater as tensões de tração nela produzidas.

O dimensionamento será conduzido no estágio III, de acordo com as exposições feitas por Santos (18), em que o concreto deverá apresentar um  $f_{ck} \geq 25$  MPa, para que possa resistir às solicitações impostas pelo tráfego. Inicialmente, faremos algumas considerações que julgamos importantes, visando uma melhor compreensão do assunto.

#### 5.5.1.1. Comportamento mecânico dos aços e do concreto

##### 5.5.1.1.1. Comportamento mecânico dos aços

Os aços para concreto armado podem ser classificados:

- pela resistência;
- e, pelo processo de fabricação.

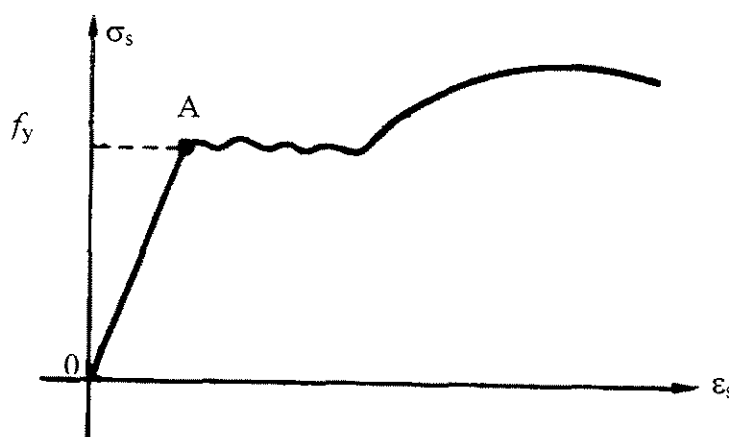
De acordo com o valor característico da tensão de escoamento, os aços podem ser divididos nas seguintes categorias:

CA: 25, 32, 40, 50 e 60,

onde o prefixo CA indica concreto armado e o número seguinte o valor  $f_{yk}$ , em  $\text{kgf/mm}^2$ .

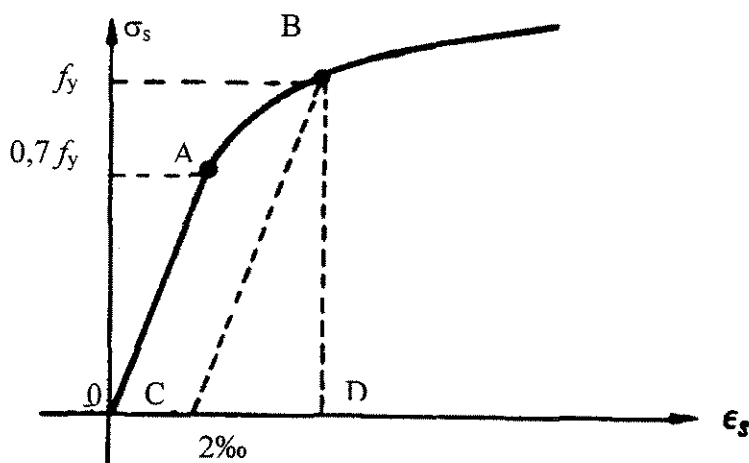
De acordo com a configuração do diagrama tensão-deformação, os aços dividem-se em duas classes:

- aço classe A, laminado a quente, com escoamento definido, caracterizado por patamar no diagrama tensão-deformação, conforme figura 5.14.



**Figura 5.14.** Diagrama tensão-deformação – Aço classe A.  
Fonte: SANTOS (18).

- aço classe B, encruado por deformação a frio, com tensão convencional de escoamento definida por uma deformação permanente de 2 ‰ (2 mm/m). Na figura 5.15,  $\overline{OD}$  é a deformação total  $\epsilon_s$  correspondente ao ponto B do diagrama;  $\epsilon_s$  compõe-se de duas parcelas: a deformação elástica  $\overline{CD}$  e a deformação permanente  $\overline{OC}$ .



**Figura 5.15.** Diagrama tensão-deformação – Aço classe B.  
Fonte: SANTOS (18).



Observando-se a figura 5.16, percebemos que ela contém dois diagramas: o característico (em traço cheio) e o de cálculo (em pontilhado). Sendo considerado que:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{f_{yk}}{1,15} \quad (5.16)$$

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (5.17)$$

Onde,

$E_s$ : módulo de deformação longitudinal do aço ( $E_s = 2100 \text{ tf/cm}^2$ )

$\varepsilon_{yd}$ : deformação específica.

$\varepsilon_{sd}$ : deformação de cálculo.

$\sigma_{sd}$ : tensão de cálculo.

O diagrama simplificado da figura 5.17 é composto de três trechos:

- trecho linear até o valor  $\sigma_s = 0,7 f_{yd}$ ;
- trecho curvo entre este ponto e o ponto correspondente à resistência de escoamento convencional  $f_{yd}$ ;
- patamar deste ponto em diante.

A deformação específica correspondente ao ponto de escoamento convencional do diagrama de cálculo é:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} + 2\text{‰} \quad (5.18)$$

Para os aços CA-50A e CA-50B, o valor de cálculo  $f_{yd}$  da tensão de escoamento e a deformação  $\varepsilon_{yd}$  correspondente ao início do escoamento (real ou convencional) são:

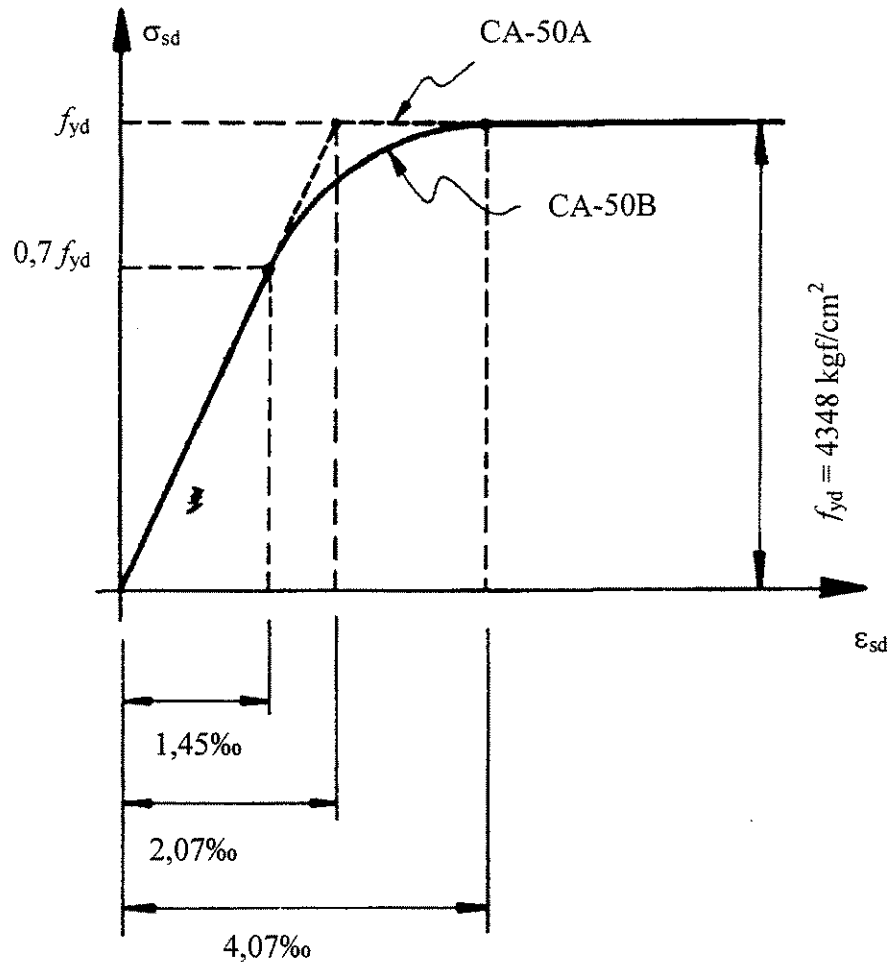
$$\text{Para ambos os aços: } f_{yd} = \frac{5.000}{1,15} = 4.348 \text{ kgf / cm}^2$$

Para o aço CA-50A:  $\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{4.348}{2.100.000} = 2,07\text{‰}$

Para o aço CA-50B:  $\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} + 2\% = 4,07\text{‰}$

Analisando os diagramas tensão-deformação de cálculo dos aços CA-50A e CA-50B, conforme a figura 5.18, observa-se que o aço CA-50B tem duas desvantagens quando comparado com o CA-50A:

- é anti-econômico no trecho  $1,45\text{‰} < \varepsilon_{sd} < 4,07\text{‰}$ .
- provoca maiores deformações para alcançar o limite convencional  $f_y$ .



**Figura 5.18.** Diagramas tensão-deformação de cálculo – Aços CA50A e CA-50B.  
Fonte: SANTOS (18).

No cálculo, é comum adotar-se o aço CA-50B e usar o aço CA-50A, com o que se fica a favor da segurança, pois, no trecho curvo as tensões são menores, o que resulta em maiores seções de aço.

#### *5.5.1.1.2. Comportamento mecânico do concreto*

O concreto é um excelente material para resistir aos esforços de compressão e um material inadequado para resistir aos esforços de tração.

O diagrama tração-deformação do concreto mostra, de início, que o material não obedece à lei de Hooke: o diagrama é curvo praticamente desde a origem. A forma desta curva é influenciada por um grande número de parâmetros, dos quais enumeramos os principais:

- resistência do concreto;
- modo de colocação da carga;
- duração do carregamento;
- idade do concreto quando do carregamento.

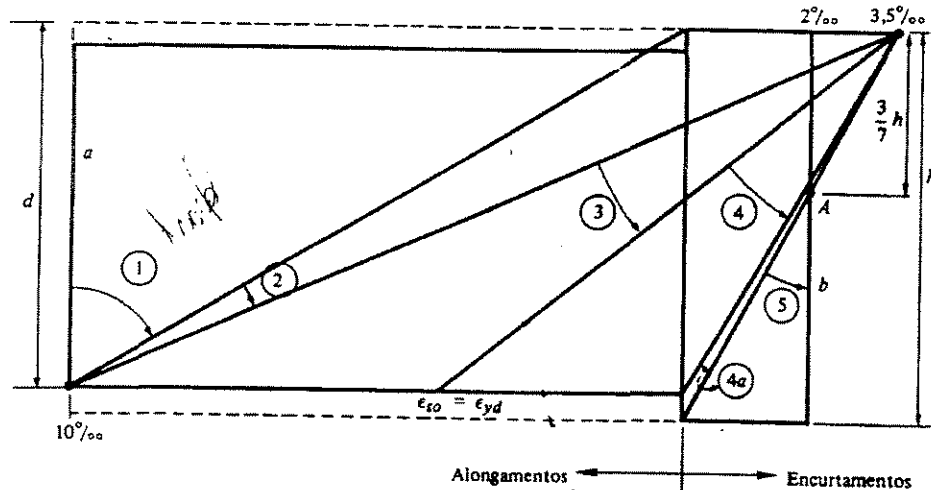
A seguir, veremos que na prática, para cálculos em estados limites últimos, estes diagramas serão substituídos por diagramas simplificados, que se mantêm a favor da segurança.

#### *5.5.1.2. Hipóteses básicas do estágio III*

O dimensionamento, pelo método da ruptura, baseia-se nas seguintes hipóteses:

- 1) as seções transversais planas antes do carregamento permanecem planas até a ruptura;
- 2) a deformação em cada barra é a mesma do concreto adjacente, isto é, existe perfeita aderência entre o aço e o concreto não fissurado;
- 3) despreza-se a resistência do concreto à tração;
- 4) o encurtamento de ruptura convencional do concreto nas seções não inteiramente

comprimidas é de 3,5‰ nos domínios 3,4 e 4a, da figura 5.19. A figura 5.19 indica todas as possíveis distribuições de deformações, porém, só trataremos dos domínios 2, 3 e 4.

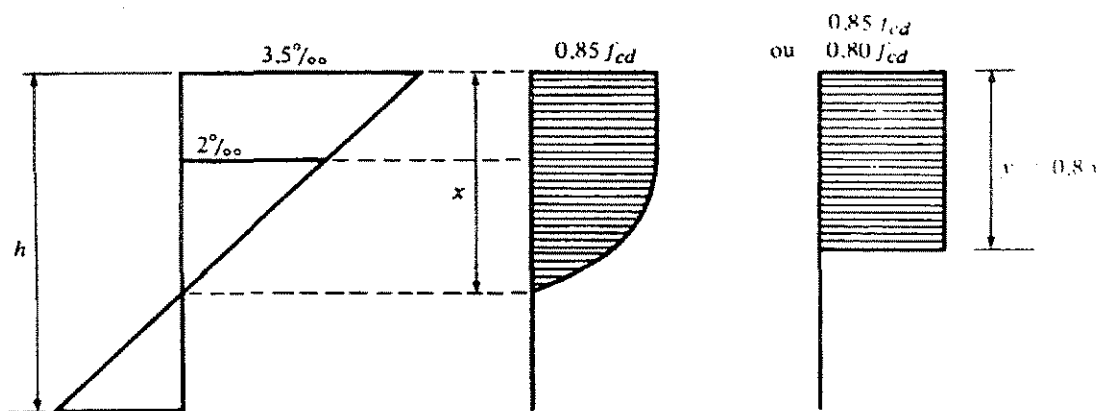


**Figura 5.19.** Diagramas de deformações.  
Fonte: SANTOS (18).

- Domínio 2: flexão simples ou composta sem ruptura à compressão do concreto ( $\epsilon_c < 3,5\text{‰}$ ) e com o máximo alongamento (10‰) permitido na armadura.
- Domínio 3: flexão simples (seção normalmente armada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e com escoamento do aço ( $\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$ ).
- Domínio 4: flexão simples (seção super-armada) ou composta, sendo que o concreto atinge a tensão de ruptura antes que o aço entre em escoamento ( $\epsilon_s < \epsilon_{yd}$ ).

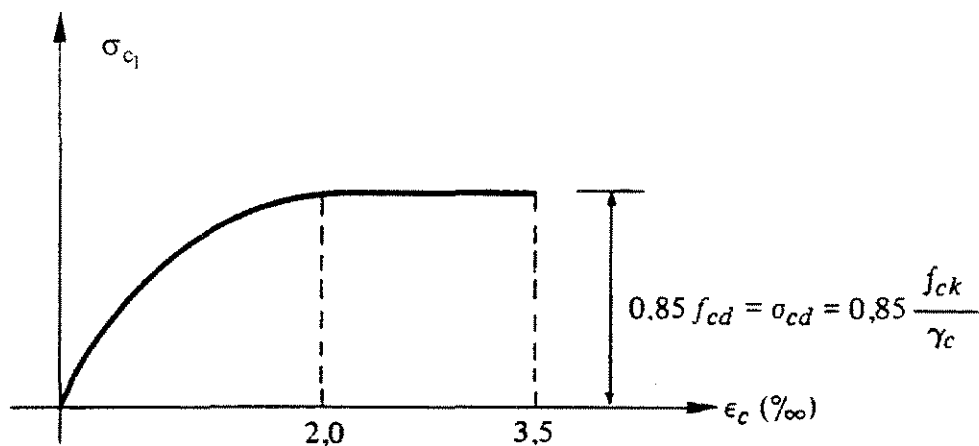
- 5) o alongamento máximo permitido ao longo da armadura de tração é de 10‰ no domínio 2, a fim de prevenir deformação plástica excessiva;
- 6) a distribuição das tensões do concreto na seção se faz de acordo com o diagrama retangular-parabólico da figura 5.20. Permite-se a substituição desse diagrama pelo retângulo de altura  $y = 0,8x$ , com a seguinte tensão:

$$0,85 f_{cd} = \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c}$$



**Figura 5.20.** Diagrama retangular-parabólico do concreto.  
Fonte: SANTOS (18).

Para o dimensionamento prático, torna-se necessário simplificar as distribuições curvas de tensões no concreto que ocorrem na zona comprimida da peça. Por isso, procurou-se um diagrama tensão-deformação simplificado, que conduzisse a um cálculo prático sem grandes complicações e que, ao mesmo tempo, estivesse sempre a favor da segurança.



**Figura 5.21.** Diagrama tensão-deformação do concreto.  
Fonte: SANTOS (18).

Extensas pesquisas mostram que a linha tensão-deformação da figura 5.21, formada por uma parábola de 2ª grau desde a origem até o ponto correspondente a  $\epsilon = 2\text{‰}$ , continuada por um patamar até  $\epsilon_c = 3,5\text{‰}$ , com ordenada máxima  $\sigma_{cd}$  igual ao valor indicado na mesma figura, fornece muito boa concordância, em relação à capacidade da seção nos estados limites últimos,

com os valores da distribuição real, curva achatada de tensões.

Observando o diagrama retangular-parabólico da figura 5.21, podemos concluir que:

$$\sigma_{c1} = \sigma_{cd} \left( \varepsilon_c - \frac{\varepsilon_c^2}{4} \right) \text{ para } 0 \leq \varepsilon_c \leq 2\text{‰} \quad (5.19)$$

onde  $\varepsilon_c$  entra em ‰;

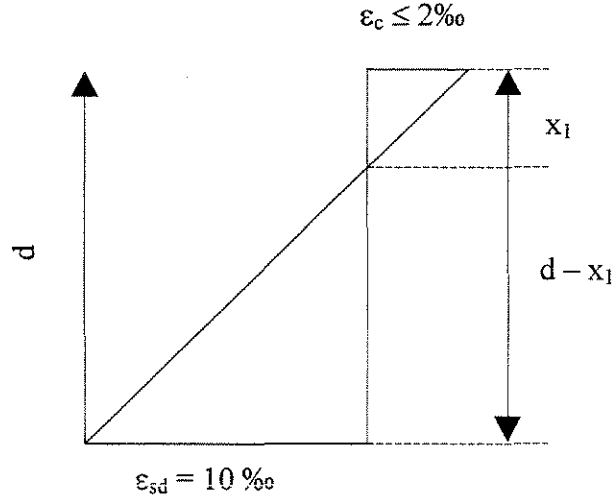
$$\sigma_{c1} = \sigma_{cd} = \text{constante para } 2\text{‰} \leq \varepsilon_c \leq 3,5\text{‰} \quad (5.20)$$

#### 5.5.1.3. Determinação da posição da linha neutra

Vimos na figura 5.19 as possíveis distribuições de deformações na seção, porém, percebe-se que no domínio 2 o aço tem um alongamento de 10‰ e o concreto tem um encurtamento que varia de 0 a 3,5‰; no domínio 3 o aço tem um alongamento que decresce de 10‰ até o valor  $\varepsilon_{yd}$ , enquanto que o concreto tem um encurtamento constante de 3,5‰. Portanto, por motivos didáticos, o domínio 2 será dividido em dois sub-domínios, os quais chamaremos de sub-domínio 2a e sub-domínio 2b.

##### 5.5.1.2.1. Sub-domínio 2a

Dá-se quando  $\varepsilon_c \leq 2\text{‰}$  simultaneamente com  $\varepsilon_{sd} = 10\text{‰}$ , estado limite último de deformação plástica excessiva, como mostrado na figura 5.22.



**Figura 5.22.** Diagrama tensão-deformação de uma peça armada

Da figura 5.22, podemos tirar a seguinte relação:

$$\frac{\epsilon_c}{x_1} = \frac{10}{d - x_1} \quad \text{ou} \quad x_1 = \frac{d \cdot \epsilon_c}{10 + \epsilon_c} \quad (5.21)$$

Dividindo ambos os membros por  $d$ , resulta:

$$\kappa_x = \frac{\epsilon_c}{10 + \epsilon_c} \left( \text{pois, } \kappa_x = \frac{x_1}{d} \right) \quad (5.22)$$

No limite  $\epsilon_c = 2\text{‰}$ , o valor de  $\kappa_x$  é:  $\kappa_x = \frac{2}{10 + 2} = 0,167$ . Temos, assim, o primeiro caso:

$$0 \leq \kappa_x \leq 0,167.$$

#### 5.5.1.2.2. Sub-domínio 2b

Quando o encurtamento  $\epsilon_c$  varia de 2‰ a 3,5‰, encontramos-nos no sub-domínio 2b.

No limite entre 2b e 3, teremos pela fórmula (5.22):  $\kappa_x = \frac{3,5}{13,5} = 0,259$ , com o que formamos o segundo caso:  $0,167 < \kappa_x < 0,259$ .

#### 5.5.1.2.3. Domínio 3 e 4

A partir de  $\kappa_x = 0,259$  começa o terceiro caso: o encurtamento do concreto permanece constante e igual a 3,5‰, enquanto que o aço tem um decréscimo de 10‰ até  $\varepsilon_{yd}$  (domínio 3) e de  $\varepsilon_{yd}$  a zero (domínio 4). Trata-se de estado limite último de ruptura. Por convenção, chamaremos de  $\kappa_{x \text{ lim}}$  o valor de  $\kappa_x$  correspondente ao limite entre os domínio 3 e 4. No domínio 4, teremos peças super-armadas. Portanto, o valor de  $\kappa_{x \text{ lim}}$  é obtido pela expressão:

$$\kappa_{x \text{ lim}} = \frac{3,5}{3,5 + \varepsilon_{yd}} \text{ com } \varepsilon_{yd} \text{ em } \text{‰} \quad (5.23)$$

Uma vez que  $\kappa_{x \text{ lim}}$  depende de  $\varepsilon_{yd}$ , o seu valor será uma constante diferente para cada aço empregado. Por exemplo:

Aço CA-50A:  $\varepsilon_{yd} = 2,07\text{‰}$ ;  $\kappa_{x \text{ lim}} = 0,628$

Aço CA-50B:  $\varepsilon_{yd} = 4,07\text{‰}$ ;  $\kappa_{x \text{ lim}} = 0,462$ .

Resumindo o que foi explicado, dividiremos o dimensionamento da seção sub-armada ou normalmente armada em três casos:

1º caso:  $0 \leq \kappa_x \leq 0,167$  (sub-domínio 2a);

2º caso:  $0,167 < \kappa_x < 0,259$  (sub-domínio 2b); e,

3º caso:  $0,259 \leq \kappa_x \leq \kappa_{x \text{ lim}}$  (domínio 3).

Para o dimensionamento da seção retangular utilizam-se as seguintes expressões:

$$K_6 = \frac{b_1 d_1^2}{M} \quad (5.24)$$

$$A_s = K_3 \frac{M}{d_1} \quad (5.25)$$

Onde:

$b_1$ : largura da seção.

$d_1$ : altura útil da seção.

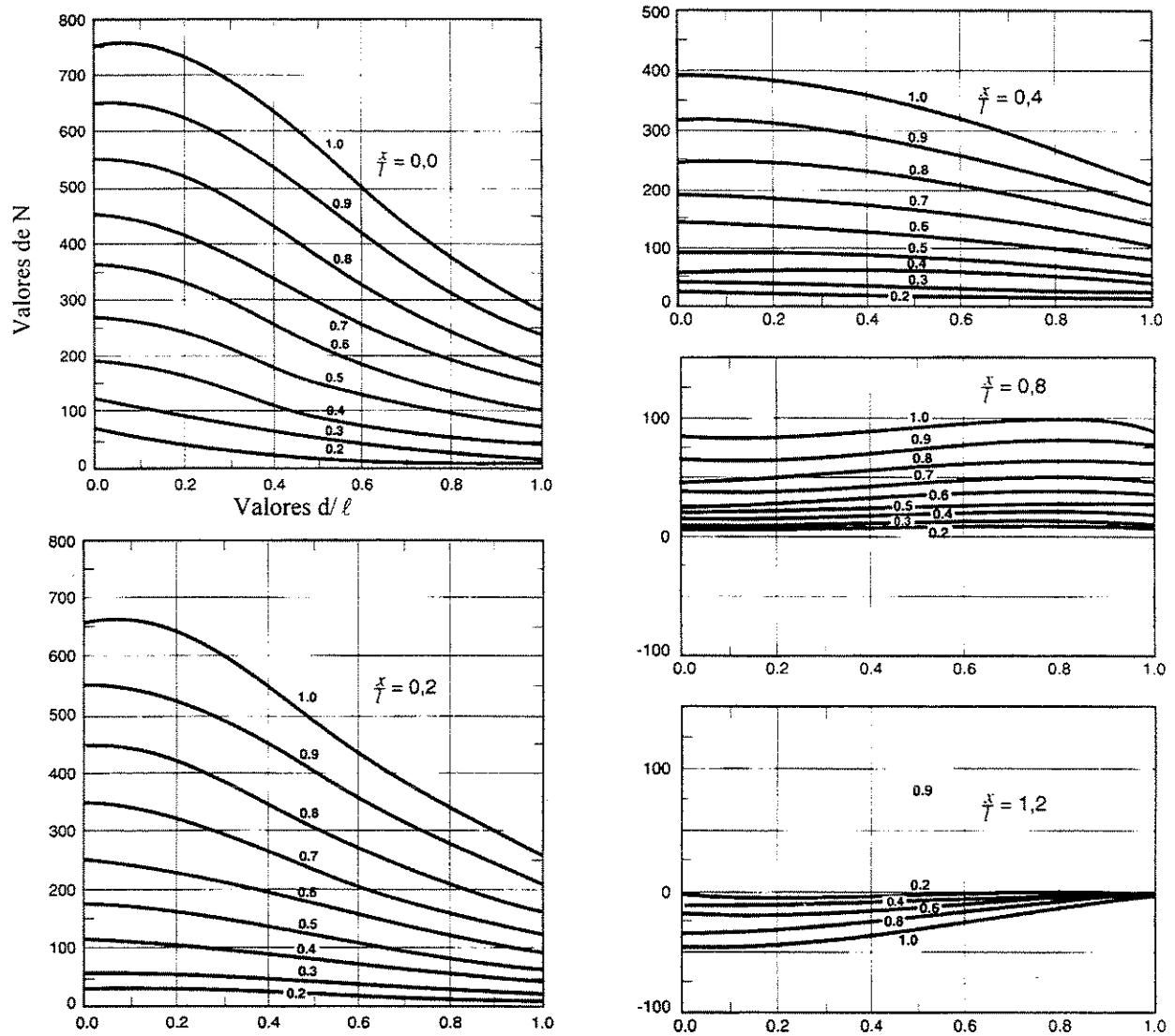
$M$ : momento solicitante não majorado.

$K_6$  e  $K_3$ : coeficientes tabelados, tirados dos quadros 5.43 e 5.44, em função de  $\kappa_x$ ,  $f_{ck}$  e do tipo do aço. Nestes, já estão embutidos os coeficientes de segurança, de minoração para os materiais e de majoração para as ações.

### 5.5.2. *Determinação do momento atuante e da seção de armadura para uma placa de concreto*

#### 5.5.2.1. Determinação do momento atuante

A determinação do momento é feita através das cartas de influências nº 2 e nº 6, para as cargas no interior ou borda livre da placa, respectivamente, conforme Pickett e Ray (12). No entanto, Yoder e Witczak (28) propuseram os ábacos das figuras 5.23 e 5.24, para a determinação do número “ $N_b$ ” de blocos para as duas posições da carga citadas anteriormente.



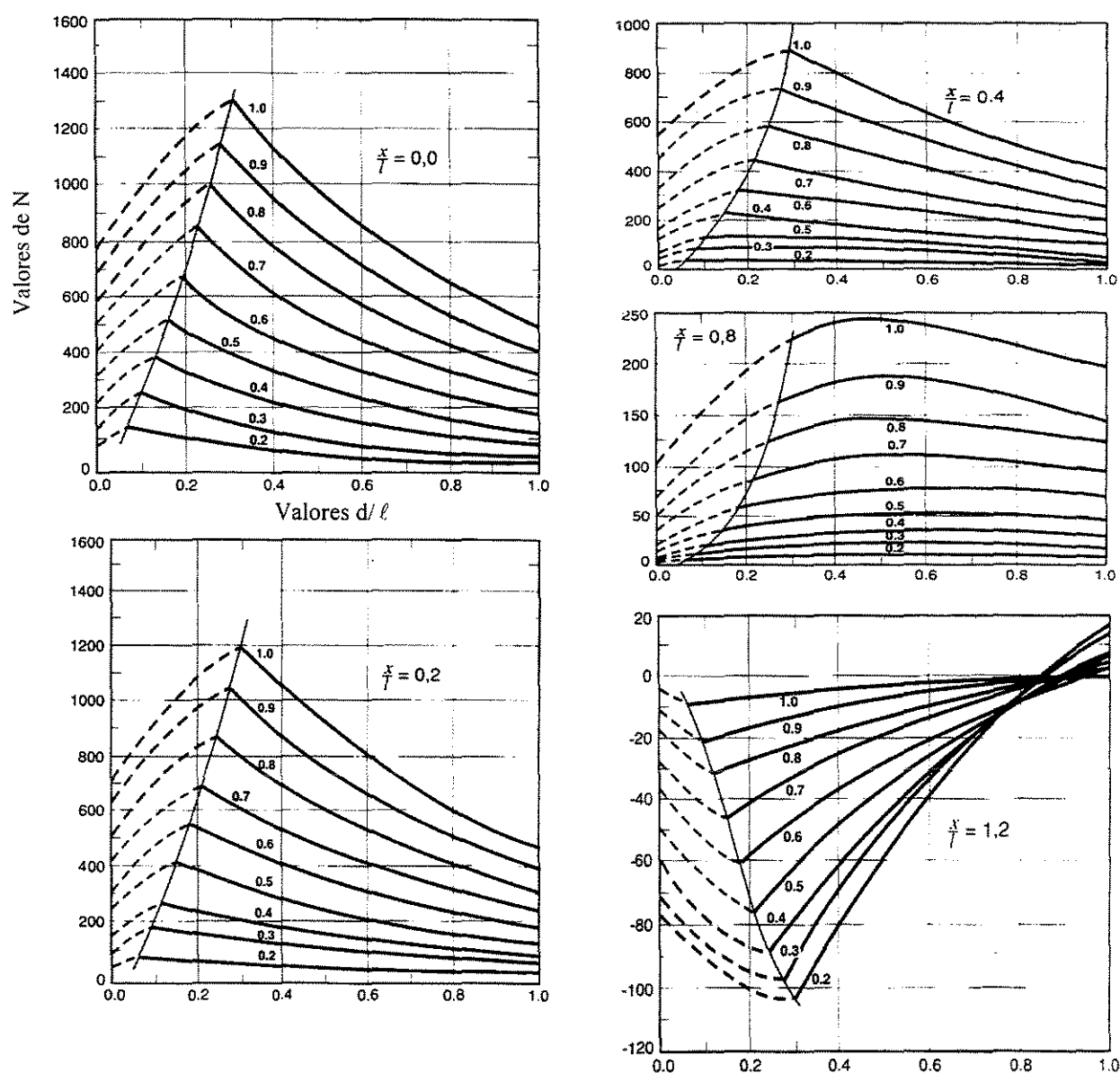
**Figura 5.23.** Número de Blocos  $N_b$  para carga no interior da placa.

NOTAS: Os números das curvas indicam a relação entre  $L/\ell$

Considerado a sub-base como sendo um líquido denso

Coefficiente de Poisson ( $\mu$ ) = 0,15

FONTE: YODER e WITCZAK (28).



**Figura 5.24.** Número de Blocos  $N_b$  para carga na borda livre longitudinal da placa.

NOTAS: Os números das curvas indicam a relação entre  $L/\ell$

Considerado a sub-base como sendo um líquido denso

Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) = 0,15

FONTE: YODER e WITCZAK (28)

#### 5.5.2.1.1. Carga no interior da placa

Para a determinação do momento ( $M_i$ ) nesta posição, seguiremos os passos sugeridos por Rodrigues e Pitta (17):

1º Passo: Determina-se a área de contato ( $A$ ) do pneu e as suas dimensões básicas, o comprimento ( $L_p$ ) e a largura ( $W$ ):

$$A = \frac{P}{q}, \text{ em m}^2. \quad (5.26)$$

$$L_p = \sqrt{\frac{A}{0,523}}, \text{ em m.} \quad (5.27)$$

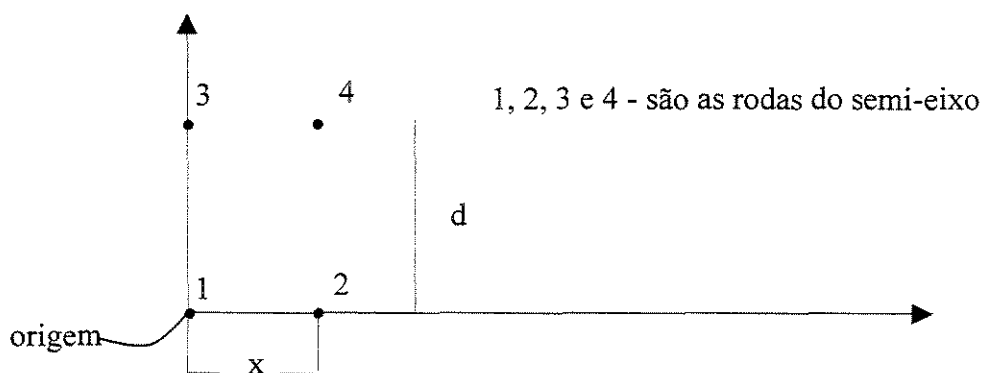
$$W = 0,6 L_p, \text{ em m.} \quad (5.28)$$

Sendo,

$P$ : a carga atuante em um pneu (em N);

$q$ : a pressão de enchimento dos pneus (em  $P_a$ ).

2º Passo: Determina-se o número de blocos através da carta de influência nº 2 ou através do ábaco da figura 5.23, em função do raio de rigidez relativo da placa,  $\ell$ , da distância entre as duas rodas do semi-eixo de roda dupla,  $x$ , e das distâncias entre os conjuntos de rodas dos semi-eixos tandem duplo ou triplo  $d$ , conforme a figura 5.25.



**Figura 5.25.** Configuração do semi-eixo tandem duplo.

O raio de rigidez relativo da placa é calculado através da equação (4.9):

$$\ell = 4 \sqrt{\frac{E \times h^3}{12(1 - \mu^2)_k}}, \text{ em m}$$

Sendo,

E: o módulo de elasticidade do concreto (em MPa);

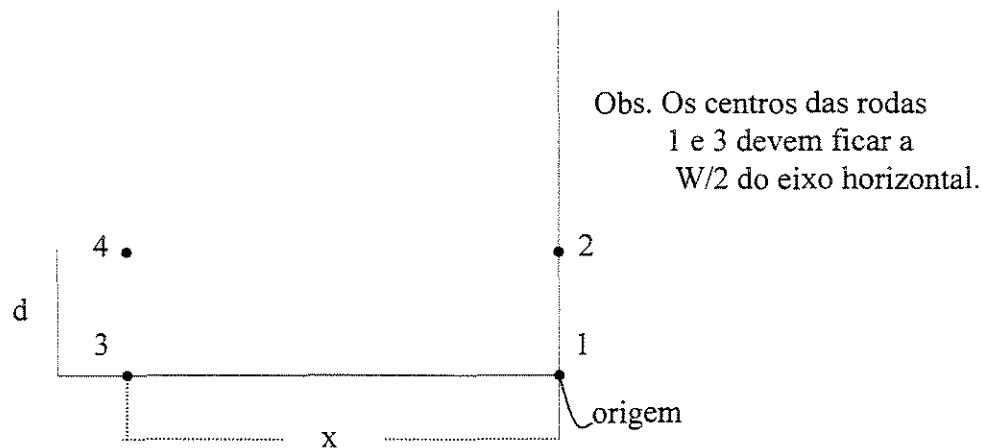
h: é a espessura da placa (em m);

$\mu$ : é o coeficiente de Poisson considerado como 0,15;

k: é o coeficiente de recalque da fundação (em MPa/m).

#### 5.5.2.1.2. Carga na borda da placa

A determinação do momento  $M_b$  na borda da placa é feita através da carta de influência nº 6 ou do ábaco da figura 5.24, seguindo os passos do item anterior, mudando apenas a configuração do semi-eixo, conforme a figura 5.26.



**Figura 5.26.** Configuração do semi-eixo tandem duplo.

O momento pode ser determinado pela expressão:

$$M = \frac{N_b \times q \times \ell^2}{10.000}, \text{ em N x m/m} \quad (5.29)$$

Sendo,

$N_b$ : o número de blocos determinados pelas figuras 5.23 ou 5.24;

$q$ : é a pressão de enchimento do pneu (em Pa); e,

$\ell$ : é o raio de rigidez relativo da placa (em m).

#### 5.5.2.2. Cálculo da armadura

A seção de armadura " $A_s$ " é calculada pela utilização das equações 5.24 e 5.25:

$$K_6 = \frac{b_1 \times d_1^2}{M}$$

$$A_s = K_3 \frac{M}{d_1}, \text{ em cm}^2/\text{m}$$

Sendo,

$M$ : é o momento atuante (em tf x cm/m);

$b_1$ : é a largura considerada, como 100 cm;

$d_1$ : é a espessura útil da placa ( $d_1 = h - 3,0$  cm);

$A_s$  = é a área de armadura, em cm<sup>2</sup>/m;

$K_3$  = é o coeficiente adimensional, fornecido pelos quadros 5.43 ou 5.44.

Os valores de  $K_3$ , em função de  $K_6$  e da resistência do concreto  $f_{ck}$ , são fornecidos pelos quadros 5.43 ou 5.44, devendo entrar com o momento “M”, pois já estão embutidos os coeficientes  $\gamma_f$ ,  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$ . Ao se utilizar o quadro 5.44 não considerar os valores abaixo da linha cheia, pois estaremos no domínio 4.

Como o momento na borda da placa é maior do que o momento no interior, então coloca-se a armadura calculada para o interior até a borda da placa, e calcula-se armadura complementar da borda da placa, utilizando a equação 5.25, onde o momento a ser considerado é  $\Delta M = M_b - M_i$ . A armadura de borda deve ter cerca de 80 cm de largura.

Quando se deseja utilizar placas com comprimento maior ao normalmente empregado, em torno de 5,0 m, deve-se adotar armadura posicionada na superfície superior da placa. A determinação dessa armadura é feita empregando-se uma das expressões seguintes:

$$A_s = \frac{f \times c \times h}{278} \text{ (aço CA-50)} \quad (5.30)$$

$$A_s = \frac{f \times c \times h}{333} \text{ (aço CA-60)} \quad (5.31)$$

Sendo,

$c$ : o comprimento da placa (em m);

$h$ : a espessura da placa (em cm); e,

$f$ : o coeficiente de atrito adimensional entre a placa e a sub-base, considerado entre 1,5 e 2,0.

### 5.5.3. Dimensionamento do pavimento estruturalmente armado

São feitos a seguir dois exemplos de dimensionamento, onde são considerados um subleito com  $\text{CBR} = 5\%$ , uma sub-base granular com 15,0 cm de espessura ( $k = 60 \text{ MPa/m}$ ) e outra estrutura com um subleito de  $\text{CBR} = 5,5\%$  e uma sub-base tratada com cimento com 15,0 cm de espessura ( $k = 100 \text{ MPa/m}$ ). As cargas por eixos são as mesmas utilizadas nos dimensionamentos anteriores.

#### 5.5.3.1. Exemplos de dimensionamentos

##### 1. Dimensionar um pavimento rodoviário estruturalmente armado, com as seguintes características:

CBR do subleito = 5%

Sub-base de 15,0 cm de  $\rightarrow k$  no topo do sistema = 60 MPa/m

- Concreto armado com aço CA-50A,  $f_{CK} = 25 \text{ MPa}$  e módulo de elasticidade de 28.000 MPa.
- Carga máxima no eixo simples: 12 tf = 120.000 N
- Carga máxima no eixo tandem duplo: 20,4 tf = 204.000 N
- Carga máxima no eixo tandem triplo: 30,6 tf = 306.000 N
- Pressão de enchimento dos pneus:  $q = 0,7 \text{ MPa} = 0,7 \times 10^6 \text{ Pa}$
- Comprimento da placa: 15,0 m
- Largura da placa: 7,0 m.

1º PASSO: Arbitrando-se a espessura da placa em 14,0 cm, então o raio de rigidez relativo é:

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{28.000 \times 0,14^3}{12(1-0,15^2) \times 60}} = 0,57 \text{ m}$$

**1º caso: Eixo simples rodas duplas**

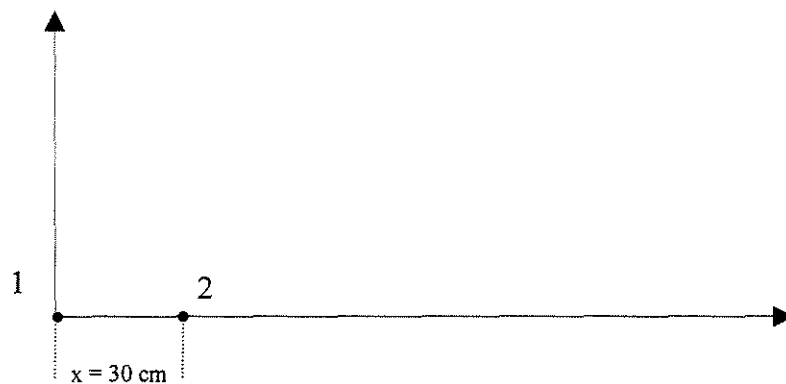
2º PASSO: Determinar a área de contato e suas dimensões básicas:

$$A = \frac{\frac{120.000}{4}}{0,7 \times 10^6} = 0,043 \text{ m}^2$$

$$L_p = \sqrt{\frac{0,043}{0,523}} = 0,287 \text{ m}$$

$$W = 0,6 \times 0,287 = 0,172 \text{ m}$$

3º PASSO: Determinar “N<sub>b</sub>” (fig. 5.23) para a carga no interior da placa



$$\frac{L_p}{\ell} = \frac{0,287}{0,57} = 0,50$$

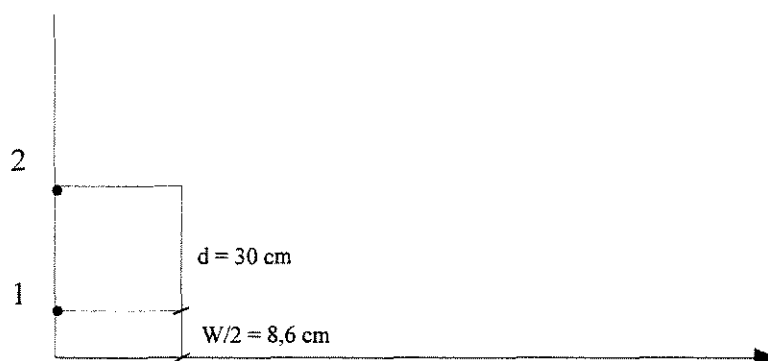
$$\text{Roda 1: } \frac{x}{\ell} = \frac{0}{0,57} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{d}{\ell} = \frac{0}{0,57} = 0 \Rightarrow N_1 = 275$$

$$\text{Roda 2: } \frac{x}{\ell} = \frac{0,30}{0,57} = 0,53 \quad \text{e} \quad \frac{d}{\ell} = 0 \Rightarrow N_2 = 75$$

Portanto,  $N_T = 350$

Pela carta de influência nº 2  $\rightarrow N_T = 340$ .

4º PASSO: Determinar “ $N_b$ ” (fig. 5.24) para a carga na borda da placa.



$$\frac{L_p}{\ell} = \frac{0,287}{0,57} = 0,50$$

$$\text{Roda 1: } \frac{x}{\ell} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{d}{\ell} = \frac{0,086}{0,57} = 0,15 \Rightarrow N_1 = 500$$

$$\text{Roda 2: } \frac{x}{\ell} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{d}{\ell} = \frac{0,386}{0,57} = 0,68 \Rightarrow N_1 = 200$$

Portanto,  $N_T = 700$

5º PASSO: Calcular os momentos no interior ( $M_i$ ) e na borda ( $M_b$ ) da placa:

$$M_i = \frac{350 \times 0,7 \times 10^6 \times 0,57^2}{10.000} = 7.960 \text{ N} \times \text{m/m} = 79,6 \text{ tf} \times \text{cm/m}$$

$$M_b = \frac{700 \times 0,7 \times 10^6 \times 0,57^2}{10.000} = 15.920 \text{ N} \times \text{m/m} = 159,2 \text{ tf} \times \text{cm/m}$$

## 2º caso: Eixo tandem duplo.

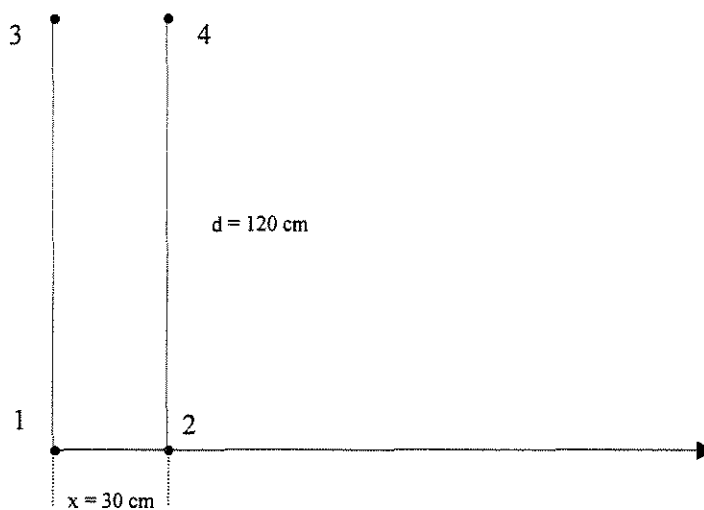
1º PASSO: Determinar a área de contato e suas dimensões básicas:

$$A = \frac{204.000/8}{0,7 \times 10^6} = 0,036 \text{ m}^2$$

$$L_p = \sqrt{\frac{0,036}{0,523}} = 0,262 \text{ m}$$

$$W = 0,6 L_p = 0,16 \text{ m}$$

2º PASSO: Determinar “ $N_b$ ” (fig. 5.23), para a carga no interior da placa.



$$\frac{L_p}{\ell} = \frac{0,262}{0,57} = 0,46$$

$$\text{Roda 1: } \frac{x}{\ell} = 0 \text{ e } \frac{d}{\ell} = 0 \Rightarrow N_1 = 230$$

$$\text{Roda 2: } \frac{x}{\ell} = \frac{0,30}{0,57} = 0,53 \text{ e } \frac{d}{\ell} = 0 \Rightarrow N_2 = 60$$

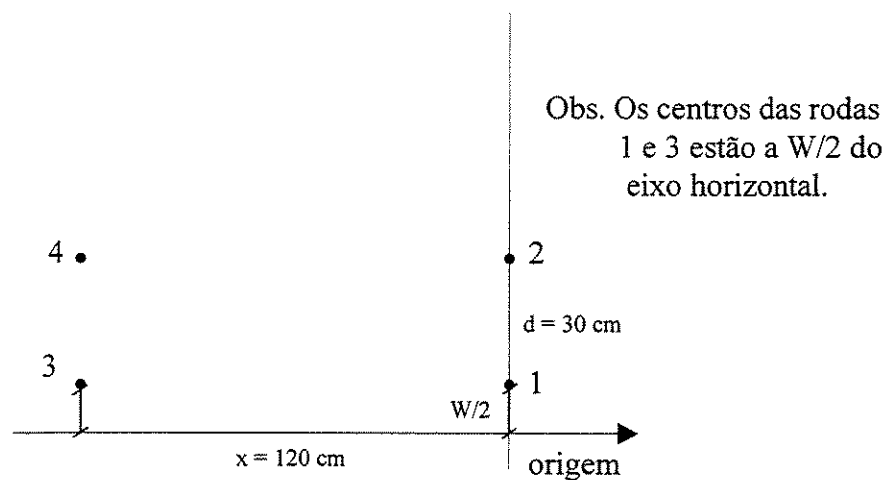
$$\text{Roda 3: } \frac{x}{\ell} = 0 \text{ e } \frac{d}{\ell} = \frac{1,20}{0,57} = 2,10 \Rightarrow N_3 = 0$$

$$\text{Roda 4: } \frac{x}{\ell} = \frac{0,30}{0,57} = 0,53 \text{ e } \frac{d}{\ell} = \frac{1,20}{0,57} = 2,10 \Rightarrow N_4 = 0$$

Portanto,  $N_T = 290$

Pela carta de influência nº 2  $\rightarrow N_T = 275$ .

3º PASSO: Determinar “ $N_b$ ” (fig. 5.24) para a carga na borda da placa.



$$\text{Roda 1: } \frac{x}{\ell} = 0 \text{ e } \frac{d}{\ell} = \frac{0,08}{0,57} = 0,14 \Rightarrow N_1 = 450$$

$$\text{Roda 2: } \frac{x}{\ell} = 0 \text{ e } \frac{d}{\ell} = \frac{0,38}{0,57} = 0,67 \Rightarrow N_2 = 160$$

$$\text{Roda 3: } \frac{x}{\ell} = \frac{1,20}{0,57} = 2,1 \text{ e } \frac{d}{\ell} = \frac{0,08}{0,57} = 0,1 \Rightarrow N_3 = -75$$

$$\text{Roda 4: } \frac{x}{\ell} = \frac{1,20}{0,57} = 2,1 \text{ e } \frac{d}{\ell} = \frac{0,38}{0,57} = 0,67 \Rightarrow N_4 = -15$$

Portanto,  $N_T = 520$

Pela carta de influência nº 6  $\rightarrow N_T = 485$ .

4º PASSO: Calcular os momentos no interior ( $M_i$ ) e na borda ( $M_b$ ), da placa:

$$M_i = \frac{290 \times 0,7 \times 10^6 \times 0,57^2}{10.000} = 6.596 \text{ N} \times \text{m/m} = 65,9 \text{ tf} \times \text{cm/m}$$

$$M_b = \frac{520 \times 0,7 \times 10^6 \times 0,57^2}{10.000} = 11.826 \text{ N} \times \text{m/m} = 118,2 \text{ tf} \times \text{cm/m}$$

Os momentos obtidos para o eixo tandem duplo são menores do que para o eixo simples, portanto, a armadura é calculada em função desse eixo. Fato igual se observa com relação ao eixo tandem triplo.

Determinação das armaduras:

a) Armadura no interior da placa.

Através das equações 5.24 e 5.25, temos:

$$K_6 = \frac{100 \times 11^2}{79,6} = 152,0, \text{ pelo quadro 5.43} \rightarrow K_3 = 0,336$$

$$A_s = 0,336 \times \frac{79,6}{11} = 2,43 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow \phi 1/4" \text{ c}/12,5$$

Armar a placa com ferragem igual nas duas direções, levando até a borda da placa.

b) Armadura complementar na borda da placa.

O momento complementar é:  $\Delta M = M_b - M_i$ , logo

$$\Delta M = 79,6 \text{ tf} \times \frac{\text{cm}}{\text{m}}$$

Como o momento é igual ao do interior, então  $A_s = 2,43 \text{ cm}^2/\text{m}$ , que corresponde  $\phi 1/4"$  c / 12,5 colocada como 2ª camada, devendo ser colocada tanto na direção longitudinal como na transversal da placa, tendo nesta direção um comprimento dos ferros de 80 cm.

c) Armadura de retração.

Essa armadura deve ser posicionada no terço superior da placa, sendo calculada através das equações 5.30 ou 5.31. Para esse tipo de armadura é utilizado o aço CA-60.

Armadura Longitudinal ( $A_{SL}$ )

$$A_{SL} = \frac{f \times c \times h}{333} = \frac{1,7 \times 15 \times 14}{333} = 1,10 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Armadura transversal ( $A_{ST}$ )

$$A_{ST} = \frac{1,7 \times 7 \times 14}{333} = 0,50 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Como a armadura longitudinal é o dobro da transversal, então deve ser usada uma tela tipo “L”, portanto, a tela a ser usada é L 138 (quadro 5.45).

## 2. Dimensionar o mesmo pavimento anterior, apenas mudando o valor de “K” para 100 Mpa/m

Como o eixo simples produz maiores momentos, então o dimensionamento é feito em função dele.

a) Determinação do raio de rigidez relativo da placa ( $\ell$ )

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{28.000 \times 14^3}{12(1 - 0,15^2) \times 100}} = 0,50 \text{ m}$$

b) Determinação da área de contato e de suas dimensões básicas.

$$A = \frac{120.000/4}{0,7 \times 10^6} = 0,043 \text{ m}^2$$

$$L_p = \sqrt{\frac{0,043}{0,523}} = 0,287 \text{ m}$$

$$W = 0,6 \times L_p = 0,172 \text{ m}$$

c) Determinar “ $N_b$ ” (fig. 5.23) para a carga no interior da placa

Usando o mesmo procedimento do exemplo anterior, temos:  $N_T = 400$

d) Determinar “ $N_b$ ” (fig. 5.24) para a carga na borda da placa

Por procedimento idêntico ao exemplo anterior, temos:  $N_T = 850$ .

e) Cálculo dos momentos no interior e na borda da placa

$$M_i = \frac{400 \times 0,7 \times 10^6 \times 0,5^2}{10.000} = 70 \text{ tf} \times \text{cm/m}$$

$$M_b = \frac{850 \times 0,7 \times 10^6 \times 0,5^2}{10.000} = 149 \text{ tf} \times \text{cm/m}$$

f) Cálculo das armaduras

– Armadura no interior da placa

$$K_6 = \frac{100 \times 11^2}{70} = 172,9 \Rightarrow K_3 = 0,335$$

$$A_S = 0,335 \times \frac{70}{11} = 2,13 \text{ cm}^2/\text{m} \Rightarrow \phi 1/4'' \text{ c}/15$$

– Armadura complementar na borda da placa

$$\Delta M = 149 - 70 = 79 \text{ tf} \times \text{cm/m}$$

$$K_6 = \frac{100 \times 11^2}{79} = 153 \Rightarrow K_3 = 0,336$$

$$A_S = 0,336 \times \frac{79}{11} = 2,41 \text{ cm}^2/\text{m} \Rightarrow \phi 1/4'' \text{ c}/13$$

A colocação desta armadura é idêntica ao caso anterior.

– Armadura de retração

Como não houve mudanças do comprimento, largura e espessura da placa, , então a armadura de retração é igual a usada no exemplo anterior, L138.

**Quadro 5.43.** Flexão normal simples – seção retangular.

NB-1/78

 $\gamma_f = 1,4$  $\gamma_c = 1,4$  $\gamma_s = 1,15$ *Valores de  $\kappa_6$  e  $\kappa_3$* 

| $\kappa_x$ | Valores de $\kappa_6$             |       |       |       |       | Valores de $\kappa_3$ para aço |        |        |
|------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|--------|--------|
|            | Para concreto de $f_{ck}$ igual a |       |       |       |       | CA 50A                         | CA 50B | CA 60B |
|            | 250                               | 260   | 270   | 280   | 300   |                                |        |        |
| 0,01       | 18638                             | 17921 | 17257 | 16641 | 15531 | 0,323                          | 0,323  | 0,269  |
| 0,02       | 4710                              | 4529  | 4361  | 4206  | 3925  | 0,324                          | 0,324  | 0,270  |
| 0,03       | 2118                              | 2036  | 1961  | 1891  | 1765  | 0,325                          | 0,325  | 0,271  |
| 0,04       | 1206                              | 1159  | 1116  | 1077  | 100,5 | 0,326                          | 0,326  | 0,272  |
| 0,05       | 781,37                            | 751,7 | 723,8 | 698,0 | 651,4 | 0,328                          | 0,328  | 0,273  |
| 0,06       | 550,4                             | 529,2 | 509,6 | 491,4 | 458,6 | 0,329                          | 0,329  | 0,274  |
| 0,07       | 410,3                             | 394,5 | 379,9 | 366,3 | 341,9 | 0,330                          | 0,330  | 0,275  |
| 0,08       | 319,0                             | 306,7 | 295,4 | 284,8 | 265,8 | 0,331                          | 0,331  | 0,276  |
| 0,09       | 256,2                             | 246,4 | 237,2 | 228,8 | 213,5 | 0,332                          | 0,332  | 0,277  |
| 0,10       | 211,2                             | 203,1 | 195,6 | 188,6 | 176,0 | 0,334                          | 0,334  | 0,278  |
| 0,11       | 177,8                             | 171,0 | 164,7 | 158,8 | 148,2 | 0,335                          | 0,335  | 0,279  |
| 0,12       | 152,4                             | 146,6 | 141,1 | 136,1 | 127,0 | 0,336                          | 0,336  | 0,280  |
| 0,13       | 132,7                             | 127,6 | 122,9 | 118,5 | 110,6 | 0,338                          | 0,338  | 0,282  |
| 0,14       | 117,1                             | 112,6 | 108,4 | 104,5 | 97,54 | 0,339                          | 0,339  | 0,283  |
| 0,15       | 104,5                             | 100,5 | 96,75 | 93,30 | 87,08 | 0,341                          | 0,341  | 0,284  |
| 0,16       | 94,30                             | 90,67 | 87,31 | 84,19 | 78,58 | 0,342                          | 0,342  | 0,285  |
| 0,17       | 85,94                             | 82,63 | 79,57 | 76,73 | 71,62 | 0,344                          | 0,344  | 0,287  |
| 0,18       | 79,01                             | 75,98 | 73,16 | 70,55 | 65,85 | 0,346                          | 0,346  | 0,288  |
| 0,19       | 73,19                             | 70,37 | 67,77 | 65,35 | 60,99 | 0,347                          | 0,347  | 0,290  |
| 0,20       | 68,22                             | 65,60 | 63,17 | 60,91 | 56,85 | 0,349                          | 0,349  | 0,291  |
| 0,21       | 63,94                             | 61,48 | 59,20 | 57,09 | 53,28 | 0,351                          | 0,351  | 0,293  |
| 0,22       | 60,20                             | 57,89 | 55,74 | 53,75 | 50,17 | 0,353                          | 0,353  | 0,294  |
| 0,23       | 56,92                             | 54,73 | 52,70 | 50,82 | 47,43 | 0,355                          | 0,355  | 0,296  |
| 0,24       | 54,01                             | 51,93 | 50,01 | 48,23 | 45,01 | 0,357                          | 0,357  | 0,298  |
| 0,25       | 51,42                             | 49,44 | 47,61 | 45,91 | 42,85 | 0,359                          | 0,359  | 0,299  |
| 0,26       | 49,14                             | 47,25 | 45,50 | 43,87 | 40,95 | 0,361                          | 0,361  | 0,301  |
| 0,27       | 47,54                             | 45,71 | 44,02 | 42,44 | 39,62 | 0,363                          | 0,363  | 0,302  |
| 0,28       | 46,06                             | 44,28 | 42,64 | 41,12 | 38,38 | 0,364                          | 0,364  | 0,304  |
| 0,29       | 44,68                             | 42,96 | 41,37 | 39,89 | 37,23 | 0,366                          | 0,366  | 0,305  |
| 0,30       | 43,39                             | 41,73 | 40,18 | 38,75 | 36,16 | 0,368                          | 0,368  | 0,307  |
| 0,31       | 42,20                             | 40,57 | 39,07 | 37,67 | 35,16 | 0,370                          | 0,370  | 0,308  |
| 0,32       | 41,07                             | 39,49 | 38,03 | 36,67 | 34,23 | 0,371                          | 0,371  | 0,309  |
| 0,33       | 40,02                             | 38,48 | 37,06 | 35,73 | 33,35 | 0,373                          | 0,373  | 0,311  |
| 0,34       | 39,03                             | 37,52 | 36,14 | 34,85 | 32,53 | 0,375                          | 0,375  | 0,312  |
| 0,35       | 38,10                             | 36,64 | 35,28 | 34,02 | 31,75 | 0,377                          | 0,377  | 0,314  |
| 0,36       | 37,22                             | 35,79 | 34,47 | 33,24 | 31,02 | 0,379                          | 0,379  | 0,316  |
| 0,37       | 36,40                             | 35,00 | 33,70 | 32,50 | 30,33 | 0,381                          | 0,381  | 0,317  |
| 0,38       | 35,61                             | 34,24 | 32,97 | 31,80 | 29,68 | 0,382                          | 0,382  | 0,319  |
| 0,39       | 34,87                             | 33,53 | 32,29 | 31,14 | 29,06 | 0,384                          | 0,384  | 0,320  |

FONTE: Adaptado da referência (18).

**Quadro 5.44.** Flexão normal simples – seção retangular.

NB-1/78

 $\gamma_f = 1,4$  $\gamma_c = 1,4$  $\gamma_s = 1,15$ *Valores de  $\kappa_6$  e  $\kappa_3$* 

| $\kappa_x$ | Valores de $\kappa_6$             |       |       |       |       | Valores de $\kappa_3$ para aço |        |        |
|------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|--------|--------|
|            | Para concreto de $f_{ck}$ igual a |       |       |       |       | CA 50A                         | CA 50B | CA 60B |
|            | 250                               | 260   | 270   | 280   | 300   |                                |        |        |
| 0,40       | 34,17                             | 32,86 | 31,64 | 30,51 | 28,47 | 0,386                          | 0,386  | 0,322  |
| 0,41       | 33,50                             | 32,22 | 31,02 | 29,91 | 27,92 | 0,388                          | 0,388  | 0,324  |
| 0,42       | 32,87                             | 31,61 | 30,44 | 29,35 | 27,39 | 0,390                          | 0,390  | 0,325  |
| 0,43       | 32,27                             | 31,03 | 29,88 | 28,81 | 26,89 | 0,392                          | 0,392  | 0,327  |
| 0,44       | 31,70                             | 30,48 | 29,35 | 28,30 | 26,41 | 0,394                          | 0,394  | 0,329  |
| 0,45       | 31,15                             | 29,95 | 28,84 | 27,81 | 25,96 | 0,396                          | 0,396  | 0,335  |
| 0,46       | 30,63                             | 29,45 | 28,36 | 27,35 | 25,52 | 0,398                          | 0,398  | 0,340  |
| 0,47       | 31,13                             | 28,97 | 27,90 | 26,90 | 25,11 | 0,400                          | 0,404  | 0,346  |
| 0,48       | 29,66                             | 28,52 | 27,46 | 26,48 | 24,72 | 0,402                          | 0,410  | 0,352  |
| 0,49       | 29,21                             | 28,08 | 27,04 | 26,08 | 24,34 | 0,405                          | 0,417  | 0,358  |
| 0,50       | 28,77                             | 27,66 | 26,64 | 25,69 | 23,98 | 0,407                          | 0,423  | 0,364  |
| 0,51       | 28,36                             | 27,27 | 26,26 | 25,32 | 23,63 | 0,409                          | 0,430  | 0,370  |
| 0,52       | 27,96                             | 26,88 | 25,89 | 24,96 | 23,30 | 0,411                          | 0,437  | 0,376  |
| 0,53       | 27,58                             | 26,52 | 25,53 | 24,62 | 22,98 | 0,413                          | 0,444  | 0,383  |
| 0,54       | 27,21                             | 26,17 | 25,20 | 24,30 | 22,68 | 0,415                          | 0,452  | 0,390  |
| 0,55       | 26,86                             | 25,83 | 24,87 | 23,98 | 22,38 | 0,418                          | 0,459  | 0,397  |
| 0,56       | 26,52                             | 25,50 | 24,56 | 23,68 | 22,10 | 0,420                          | 0,467  | 0,405  |
| 0,57       | 26,20                             | 25,19 | 24,26 | 23,39 | 21,83 | 0,422                          | 0,474  | 0,412  |
| 0,58       | 25,89                             | 24,90 | 23,97 | 23,12 | 21,58 | 0,424                          | 0,482  | 0,420  |
| 0,59       | 25,59                             | 24,61 | 23,70 | 22,85 | 21,33 | 0,426                          | 0,491  | 0,429  |
| 0,60       | 25,31                             | 24,33 | 23,43 | 22,59 | 21,09 | 0,429                          | 0,500  | 0,438  |
| 0,61       | 25,03                             | 24,07 | 23,18 | 22,35 | 20,86 | 0,432                          | 0,509  | 0,447  |
| 0,62       | 24,76                             | 23,81 | 22,93 | 22,11 | 20,64 | 0,434                          | 0,519  | 0,458  |
| 0,63       | 24,51                             | 23,57 | 22,69 | 21,88 | 20,42 | 0,439                          | 0,529  | 0,470  |
| 0,64       | 24,26                             | 23,33 | 22,46 | 21,66 | 20,22 | 0,461                          | 0,539  | 0,481  |
| 0,65       | 24,02                             | 23,10 | 22,25 | 21,45 | 20,02 | 0,484                          | 0,551  | 0,495  |
| 0,66       | 23,80                             | 22,88 | 22,03 | 21,25 | 19,83 | 0,510                          | 0,564  | 0,513  |
| 0,67       | 23,58                             | 22,67 | 21,83 | 21,05 | 19,65 | 0,536                          | 0,577  | 0,536  |
| 0,68       | 23,36                             | 22,47 | 21,63 | 20,86 | 19,47 | 0,564                          | 0,592  | 0,564  |
| 0,69       | 23,16                             | 22,27 | 21,44 | 20,68 | 19,30 | 0,595                          | 0,609  | 0,595  |
| 0,70       | 22,96                             | 22,08 | 21,26 | 20,50 | 19,14 | 0,627                          | 0,631  | 0,627  |
| 0,71       | 22,77                             | 21,90 | 21,09 | 20,33 | 18,98 | 0,661                          | 0,661  | 0,661  |
| 0,72       | 22,59                             | 21,72 | 20,92 | 20,17 | 18,83 | 0,699                          | 0,699  | 0,699  |
| 0,73       | 22,41                             | 21,55 | 20,75 | 20,01 | 18,68 | 0,740                          | 0,740  | 0,740  |
| 0,74       | 22,24                             | 21,39 | 20,60 | 19,86 | 18,54 | 0,783                          | 0,783  | 0,783  |
| 0,75       | 22,08                             | 21,23 | 20,44 | 19,71 | 18,40 | 0,830                          | 0,830  | 0,830  |
| 0,76       | 21,92                             | 21,08 | 20,30 | 19,57 | 18,27 | 0,882                          | 0,882  | 0,882  |
| 0,77       | 21,77                             | 20,93 | 20,16 | 19,44 | 18,14 | 0,938                          | 0,938  | 0,938  |
| 0,78       | 21,62                             | 20,79 | 20,02 | 19,31 | 18,02 | 0,999                          | 0,999  | 0,999  |

FONTE: Adaptado da referência (18).

**Quadro 5.45. Telas soldadas tipos Q e L**

| TIPO Q (ASL – AST)    |                                |                |                           |                |                                        |                 |                            |            |             |            |             | TIPO L (ASL > AST)          |                                |                |                           |                |                                        |                 |                            |            |             |            |             |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------------------------|-----------------|----------------------------|------------|-------------|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------------------------|-----------------|----------------------------|------------|-------------|------------|-------------|
| Designação<br>(CA-60) | Espaçamento<br>entre fios (cm) |                | Diâmetro dos<br>fios (mm) |                | Seção dos fios<br>(cm <sup>2</sup> /m) |                 | Peso<br>kgf/m <sup>2</sup> | Rolos      |             | Painéis    |             | Designação<br>(CA-60)       | Espaçamento entre<br>fios (cm) |                | Diâmetro dos<br>fios (mm) |                | Seção dos fios<br>(cm <sup>2</sup> /m) |                 | Peso<br>kgf/m <sup>2</sup> | Rolos      |             | Painéis    |             |
|                       | Longit<br>(EL)                 | Transv<br>(ET) | Longit<br>(DL)            | Transv<br>(DT) | Longit<br>(ASL)                        | Transv<br>(AST) |                            | Compr<br>m | Peso<br>kgf | Compr<br>m | Peso<br>kgf |                             | Longit<br>(EL)                 | Transv<br>(ET) | Longit<br>(DL)            | Transv<br>(DT) | Longit<br>(ASL)                        | Transv<br>(AST) |                            | Compr<br>m | Peso<br>kgf | Compr<br>m | Peso<br>kgf |
| <i>Q 47</i>           | 15                             | 15             | 3.0                       | 3.0            | 0.47                                   | 0.47            | 0.75                       | 120        | 222.0       |            |             | <i>L 75</i>                 | 15                             | 30             | 3.8                       | 3.4            | 0.75                                   | 0.30            | 0.86                       | 120        | 251.5       |            |             |
| <i>Q 61</i>           | 15                             | 15             | 3.4                       | 3.4            | 0.61                                   | 0.61            | 0.97                       | 120        | 285.1       |            |             | <i>L 113</i>                | 10                             | 30             | 3.8                       | 3.8            | 1.13                                   | 0.38            | 1.21                       | 60         | 177.2       |            |             |
| <i>Q 75</i>           | 15                             | 15             | 3.8                       | 3.8            | 0.75                                   | 0.75            | 1.21                       | 120        | 356.1       |            |             | <i>L 138</i>                | 10                             | 30             | 4.2                       | 4.2            | 1.38                                   | 0.46            | 1.47                       | 60         | 216.4       |            |             |
| <i>Q 92</i>           | 15                             | 15             | 4.2                       | 4.2            | 0.92                                   | 0.92            | 1.48                       | 60         | 217.5       |            |             | <i>L 159</i>                | 10                             | 30             | 4.5                       | 4.2            | 1.59                                   | 0.46            | 1.64                       |            |             | 6          | 24.1        |
| <i>Q 113</i>          | 10                             | 10             | 3.8                       | 3.8            | 1.13                                   | 1.13            | 1.80                       | 60         | 264.4       |            |             | <i>L 196</i>                | 10                             | 30             | 5.0                       | 4.2            | 1.96                                   | 0.46            | 1.94                       |            |             | 6          | 28.5        |
| <i>Q 138</i>          | 10                             | 10             | 4.2                       | 4.2            | 1.38                                   | 1.38            | 2.20                       | 60         | 323.0       | 6          | 32.3        | <i>L 246</i>                | 10                             | 30             | 5.6                       | 4.5            | 2.46                                   | 0.53            | 2.39                       |            |             | 6          | 35.1        |
| <i>Q 159</i>          | 10                             | 10             | 4.5                       | 4.5            | 1.59                                   | 1.59            | 2.52                       |            |             | 6          | 37.1        | <i>L 283</i>                | 10                             | 30             | 6.0                       | 4.5            | 2.83                                   | 0.53            | 2.68                       |            |             | 6          | 39.4        |
| <i>Q 196</i>          | 10                             | 10             | 5.0                       | 5.0            | 1.96                                   | 1.96            | 3.11                       |            |             | 6          | 45.8        | <i>L 335</i>                | 10                             | 30             | 8.0                       | 5.0            | 3.35                                   | 0.65            | 3.25                       |            |             | 6          | 47.8        |
| <i>Q 246</i>          | 10                             | 10             | 5.6                       | 5.6            | 2.46                                   | 2.46            | 3.91                       |            |             | 6          | 57.4        | <i>L 396</i>                | 10                             | 30             | 7.1                       | 5.6            | 3.96                                   | 0.82            | 3.82                       |            |             | 6          | 56.1        |
| <i>Q 283</i>          | 10                             | 10             | 6.0                       | 6.0            | 2.83                                   | 2.83            | 4.48                       |            |             | 6          | 65.9        | <i>L 503</i>                | 10                             | 30             | 8.0                       | 6.0            | 5.03                                   | 0.94            | 4.77                       |            |             | 6          | 70.1        |
| <i>Q 335</i>          | 10                             | 10             | 8.0                       | 8.0            | 3.35                                   | 3.35            | 5.37                       |            |             | 6          | 78.9        | <i>L 636</i>                | 10                             | 30             | 9.0                       | 6.0            | 6.36                                   | 0.94            | 5.84                       |            |             | 6          | 85.8        |
| <i>Q 396</i>          | 10                             | 10             | 7.1                       | 7.1            | 3.96                                   | 3.96            | 6.28                       |            |             | 6          | 92.3        | <i>L 785</i>                | 10                             | 30             | 10.0                      | 6.0            | 7.85                                   | 0.94            | 7.03                       |            |             | 6          | 103.3       |
| <i>Q 503</i>          | 10                             | 10             | 8.0                       | 8.0            | 5.03                                   | 5.03            | 7.97                       |            |             | 6          | 117.2       | <i>CA (50B)<br/>LA 1227</i> | 10                             | 30             | 12.5                      | 7.1            | 12.27                                  | 1.32            | 10.87                      |            |             | 6          | 159.8       |
| <i>Q 636</i>          | 10                             | 10             | 9.0                       | 9.0            | 6.36                                   | 6.36            | 10.09                      |            |             | 6          | 148.3       |                             |                                |                |                           |                |                                        |                 |                            |            |             |            |             |
| <i>Q 785</i>          | 10                             | 10             | 10.0                      | 10.0           | 7.85                                   | 7.85            | 12.46                      |            |             | 6          | 183.2       |                             |                                |                |                           |                |                                        |                 |                            |            |             |            |             |

FONTE: Conforme ref. 17.

## **6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS**

A finalidade principal desta parte do trabalho é a de analisar com mais acurácia os resultados obtidos através dos diversos métodos, fazendo-se inicialmente uma análise individual e depois uma análise comparativa desses resultados.

Visando simplificar essa análise, tomaremos como referência os valores obtidos para  $k = 60 \text{ MPa/m}$  e  $100 \text{ MPa/m}$ , uma vez que estes valores correspondem a utilização de uma sub-base granular e de uma sub-base tratada com cimento, ambas com 15,0 cm de espessura.

### **6.1. Análise Individual de Cada Método**

#### ***6.1.1. Os resultados obtidos pelo método da PCA-66***

Os resultados obtidos por este método, para os dois valores de  $k$  estão representados nas figuras 6.1 e 6.2.

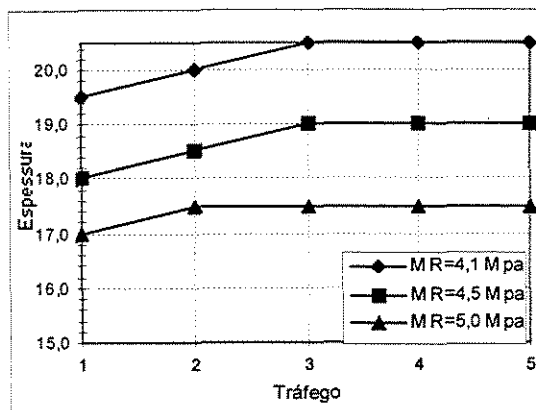


Figura 6.1. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66)  
k = 60 MPa/m FSC = 1,2

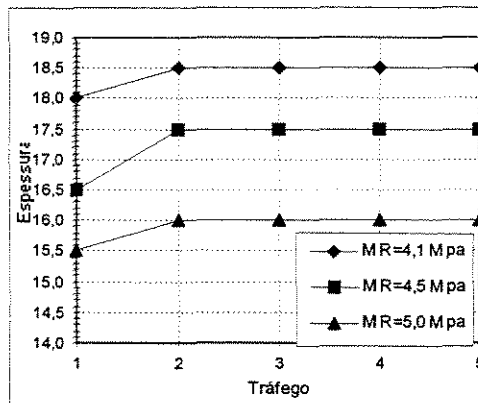


Figura 6.2. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66)  
k = 100 MPa/m FSC = 1,2

Pela análise dos gráficos das figuras, podemos comentar:

- 1º) Para um mesmo “k”, à medida que se aumenta o módulo de ruptura do concreto ( $M_R$ ) há uma diminuição na espessura da placa;
- 2º) Para k = 60 MPa/m, as espessuras aumentaram até o tráfego 3, permanecendo constante daí em diante;
- 3º) Para k = 100 MPa/m houve aumento das espessuras até o tráfego 2, permanecendo constante daí em diante;
- 4º) O método mostrou-se com baixa sensibilidade à variação do valor do “k”, pois ao se mudar o valor de “k” de 60 para 100 MPa/m, a espessura reduziu em 1,5 cm;
- 5º) Nota-se pelas figuras 6.1 e 6.2 que as espessuras aumentam muito pouco do tráfego 1 para o tráfego 5, chegando a ter para k = 60 MPa/m uma variação de 0,5 cm a 1,0 cm na espessura e para k = 100 MPa/m, ocorrendo a mesma variação;
- 6º) O dimensionamento foi dominado quase que totalmente pelo eixo simples, poucas vezes o eixo tandem duplo teve influência no dimensionamento, já o eixo tandem triplo não teve nenhuma influência no dimensionamento; e,
- 7º) Finalmente, observando o quadro 5.3, vemos que ao se dimensionar o pavimento para  $F_{SC} = 1,2$  a espessura teve um aumento em torno de 12,5% daquela calculada para  $F_{SC} = 1,0$ .

### 6.1.2. Os resultados obtidos pelo método da PCA-84

Os resultados são analisados de forma que se possa verificar o desempenho de certos dispositivos, quando utilizado nos pavimentos de concreto.

#### 6.1.2.1. Pavimentos sem barras de transferência

Para esta situação temos duas alternativas: 1) sem acostamento e 2) com acostamento de concreto. Para estas alternativas, os gráficos estão nas figuras 6.3 e 6.4 para a alternativa 1 e nas figuras 6.5 e 6.6 para a alternativa 2.

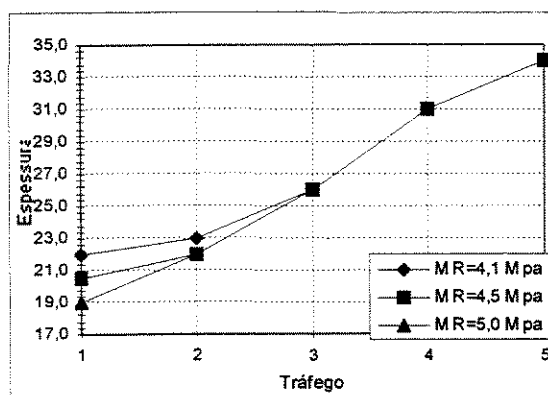


Figura 6.3. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 60 \text{ MPa/m}$  FSC = 1,2 (Pav. s/ barras e s/ acost.)

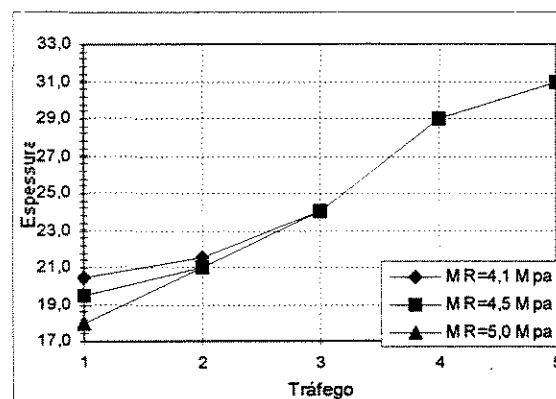


Figura 6.4. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 100 \text{ MPa/m}$  FSC = 1,2 (Pav. s/ barras e s/ acost.)

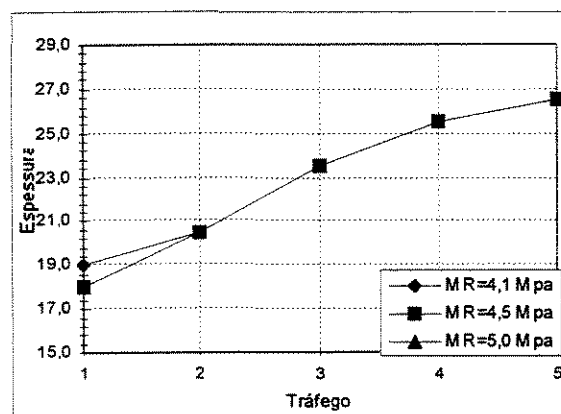


Figura 6.5. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 60 \text{ MPa/m}$  FSC = 1,2 (Pav. s/ barras e c/ acost.)

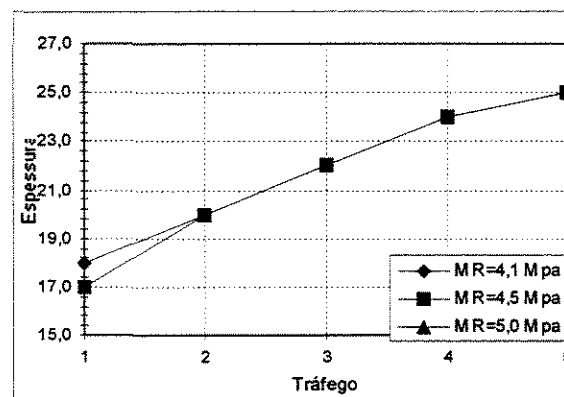


Figura 6.6. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 100 \text{ MPa/m}$  FSC = 1,2 (Pav. s/ barras e c/ acost.)

Observando os gráficos dessas figuras, podemos comentar:

- 1º) Para a alternativa 1 vemos que para os valores de “ $M_R$ ” de 4,5 e 5,0 MPa, a partir do tráfego 2, a erosão comanda o dimensionamento e do tráfego 3 em diante esse comando é total, o mesmo é observado para a alternativa 2 desde o tráfego 1;
- 2º) Quando se aumentou o valor de  $k$  de 60 para 100 MPa/m, houve uma redução máxima na espessura de 3,0 cm;
- 3º) As espessuras aumentam à medida que o tráfego aumenta, porém, o módulo de ruptura do concreto tem pouca influência na determinação das espessuras, uma vez que a partir de certo tráfego, a espessura é a mesma independente do valor de  $M_R$ ;
- 4º) Comparando-se as alternativas 1 e 2 vemos que a utilização do acostamento produz considerável redução na espessura para os tráfegos 4 e 5, o que torna a sua utilização um fator a ser considerado; e,
- 5º) Finalmente, o dimensionamento feito com  $F_{SC} = 1,2$  as espessuras tiveram um aumento em torno de 5,0 cm e 3,5 cm, respectivamente, para as alternativas 1 e 2.

#### 6.1.2.2. Pavimentos com barras de transferência

Para esta situação temos também duas alternativas iguais aquelas definidas no item anterior, cujos gráficos estão nas figuras 6.7 e 6.8 para a alternativa 1 e nas figuras 6.9 e 6.10 para a alternativa 2.

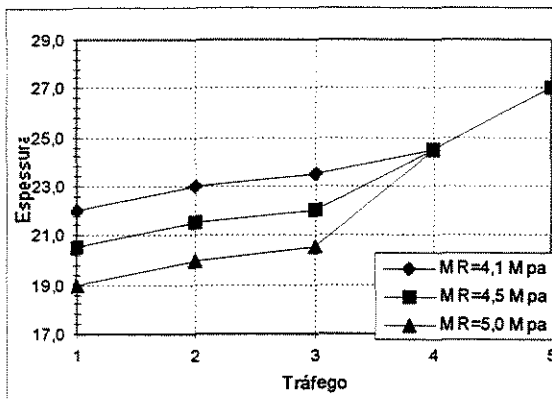


Figura 6.7. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 60$  MPa/m  $F_{SC} = 1,2$  (Pav. c/ barras e s/ acost.)

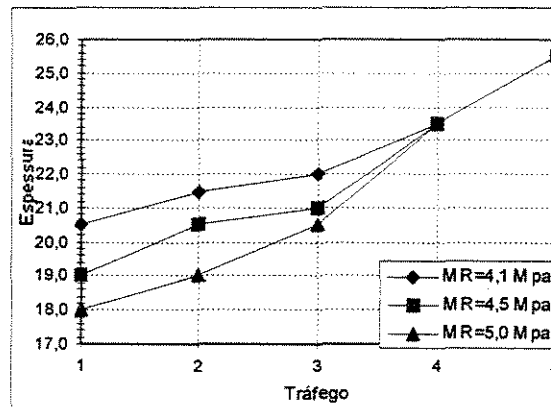
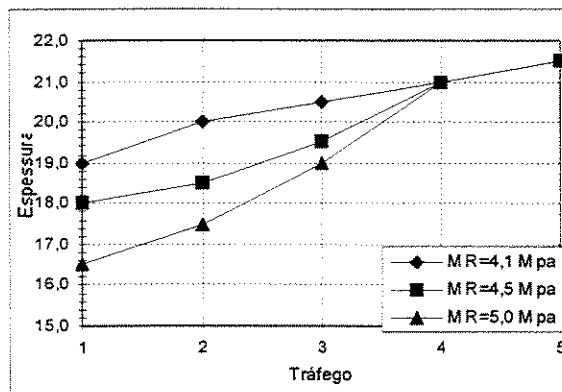
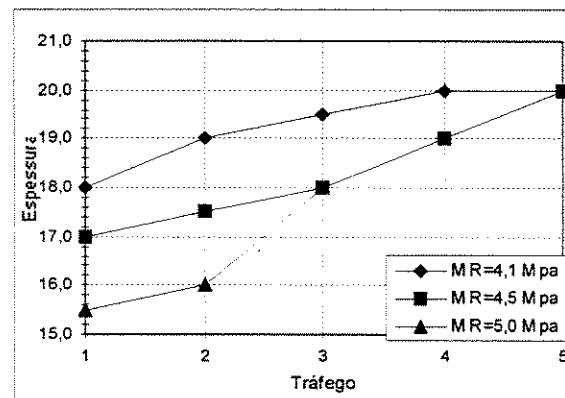


Figura 6.8. Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 100$  MPa/m  $F_{SC} = 1,2$  (Pav. c/ barras e s/ acost.)



**Figura 6.9.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 60 \text{ MPa/m}$  FSC = 1,2 (Pav. c/ barras e c/ acost.)



**Figura 6.10.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84)  
 $k = 100 \text{ MPa/m}$  FSC = 1,2 (Pav. c/ barras e c/ acost.)

Analisando os gráficos dessas figuras, podemos comentar:

- 1º) O método apresenta sensibilidade à mudança do módulo de ruptura até o tráfego 3 para ambos os valores de “k” para a alternativa 1, porém, para a alternativa 2 este fato não é observado para  $k = 100 \text{ MPa/m}$ , pois para  $M_R = 4,5$  e  $5,0 \text{ MPa}$  a espessura é a mesma a partir do tráfego 3, isto é, independe do módulo de ruptura do concreto;
- 2º) Se o pavimento possui barras de transferência, a utilização do acostamento de concreto só tem um efeito maior para o tráfego 5, onde essa redução chega no máximo 5,5 cm;
- 3º) Para os pavimentos sem acostamento de concreto, ao se mudar o valor de “k” de 60 para  $100 \text{ MPa/m}$ , a espessura teve uma redução máxima de 1,5 cm;
- 4º) Se o pavimento possui barras de transferência, a utilização do acostamento de concreto produz uma redução na espessura para os tráfegos 4 e 5 de 3,5 cm e 5,5 cm, respectivamente;
- 5º) Finalmente, nota-se que, para a alternativa 1, a mudança do tráfego 4 para o 5 produz um aumento na espessura em torno de 2,0 cm; para alternativa 2, podemos considerar que não há variação na espessura da placa.

### 6.1.3. Resultados obtidos pelo método da AASHTO

A avaliação dos resultados obtidos é feita de modo semelhante como feita para o PCA-84.

#### 6.1.3.1. Pavimentos sem barras de transferência

Para essa situação temos também duas alternativas, conforme o método da PCA-84, cujos gráficos estão nas figuras 6.11 e 6.12, 6.13 e 6.14.

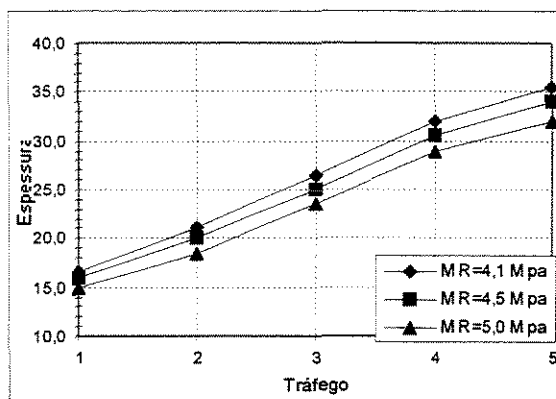


Figura 6.11. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 60 \text{ MPa/m}$  (pav.s/barras e s/acost.)

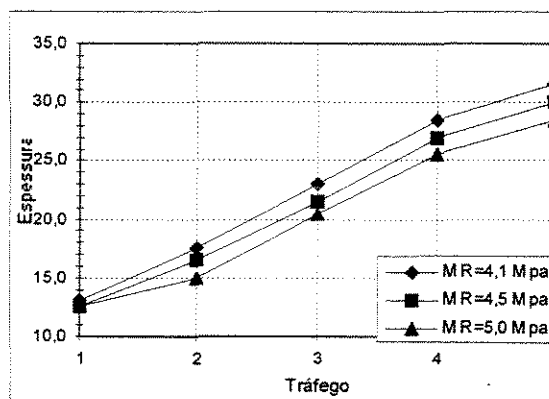


Figura 6.12. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 100 \text{ MPa/m}$  (pav.s/barras e s/acost.)

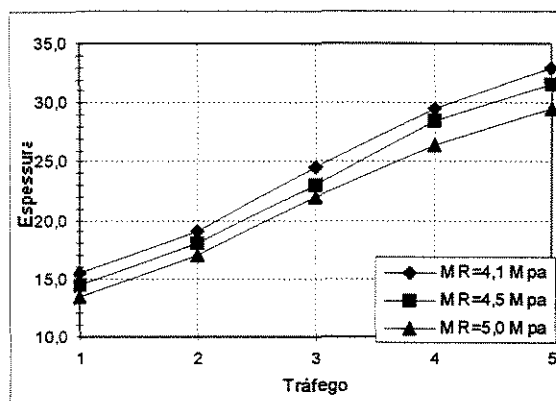


Figura 6.13. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 60 \text{ MPa/m}$  (pav.s/barras e c/acost.)

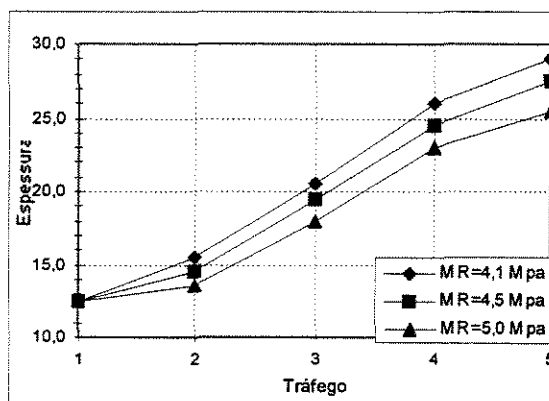


Figura 6.14. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 100 \text{ MPa/m}$  (pav.s/barras e c/acost.)

Observando os gráficos destas figuras, podemos comentar:

- 1º) Este método é sempre sensível tanto ao tráfego, quanto ao módulo de ruptura, isto é, para um mesmo  $M_R$ , aumentando-se o tráfego a espessura aumenta ou para um mesmo tráfego, aumentando-se o  $M_R$  a espessura diminui;
- 2º) O método apresenta pouca sensibilidade a utilização do acostamento de concreto, para isso, basta comparar as figuras 6.11 e 6.13 ou 6.12 e 6.14, vemos que a redução na espessura foi no máximo 2,5 cm para ambos os valores de “k”; e
- 3º) Finalmente, ao se passar de k de 60 para 100 MPa/m, houve uma redução na espessura de 4,0 cm, demonstrando ter uma sub-base tratada com cimento muita influência na redução da espessura.

#### 6.1.3.2. Pavimentos com barras de transferência

Os resultados obtidos para esta situação e para as duas alternativas, estão nos gráficos das figuras 6.15 e 6.16; 6.17 e 6.18.

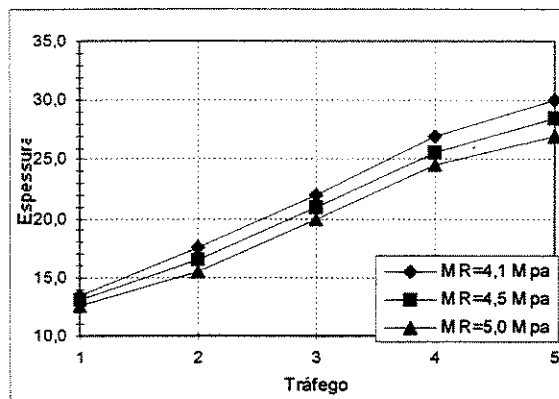


Figura 6.15. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 60$  MPa/m (pav.c/barras e s/acost.)

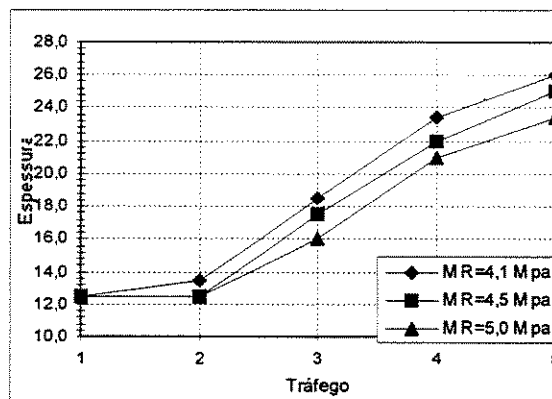


Figura 6.16. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 100$  MPa/m (pav.c/barras e s/acost.)

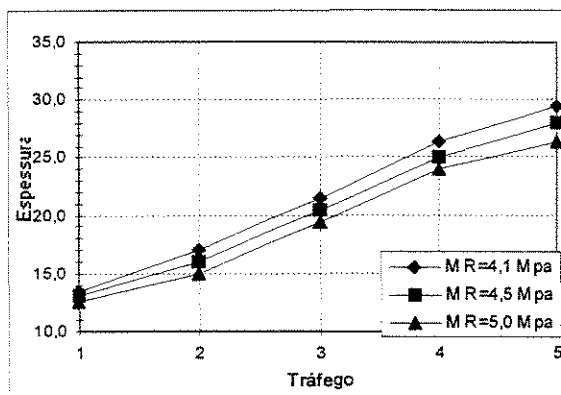


Figura 6.17. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 60$  MPa/m (pav.c/barras e c/acost.)

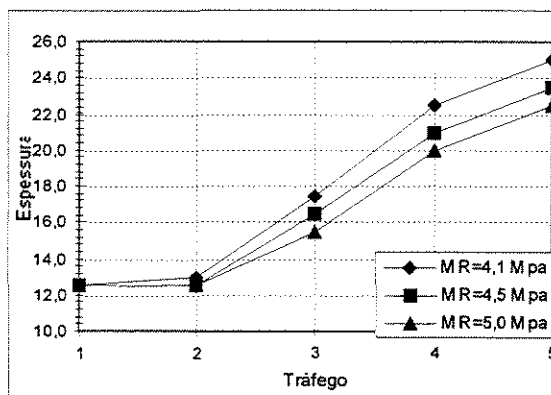


Figura 6.18. Gráfico Espessura x Tráfego (AASHTO/86)  $k = 100$  MPa/m (pav.c/barras e c/acost.)

Observando esses gráficos, podemos comentar:

- 1º) A mudança no valor de  $k$ , de 60 para 100 MPa/m, produziu uma redução na espessura de 4,0 cm para as duas alternativas;
- 2º) Para  $k = 60$  MPa/m (fig. 6.15 e 6.17), a utilização do acostamento reduziu a espessura em torno de 0,5 cm, demonstrando pouca sensibilidade a sua utilização; e,
- 3º) Para  $k = 100$  MPa/m (fig. 6.16 e 6.18), a utilização do acostamento reduziu a espessura em 1,0 cm, demonstrando mais uma vez ter pouca influência na redução da espessura.

#### 6.1.4. Comentários sobre os pavimentos estruturalmente armados

Conforme a exposição do assunto no item 5.5, podemos fazer os seguintes comentários:

- 1º) O seu dimensionamento é feito conforme as fórmulas usadas para o dimensionamento das lajes de edifício, pela utilização do estágio II, conforme Losberg (9), ou pelo estágio III, conforme Rodrigues (17);
- 2º) Os momentos atuantes são calculados através das cartas de influência nº 2 e nº 6 ou através dos ábacos propostos por Yoder e Witczak, tornando deste modo uma diferença entre os momentos calculados para as lajes de edifício e os calculados para as placas armadas;

- 3<sup>o</sup>) Uma outra diferença é que nas placas armadas a armadura é a mesma nas duas direções, enquanto nas lajes de edifício esta situação só ocorre em casos especiais;
- 4<sup>o</sup>) Como as espessuras estão compreendidas entre 14 cm e 18 cm, o raio de rigidez relativo da placa é menor do que para as placas de concreto simples, produzindo portanto, menores momentos;
- 5<sup>o</sup>) Como podemos observar nos dois dimensionamentos, a armadura teve pouca variação com relação a mudança do valor de “k” de 60 para 100 MPa/m; e,
- 6<sup>o</sup>) Finalmente, constata-se que, com a utilização do pavimento armado, há uma razoável redução da espessura o que torna esta opção muito competitiva com relação ao pavimento de concreto.

## 6.2. Análise Comparativa dos Resultados Obtidos

Nesta análise são feitos comentários sobre os resultados obtidos através dos métodos, onde são levados em conta os valores de “k” igual a 60 e 100 MPa/m, os módulos de ruptura do concreto, a existência ou não de dispositivos, tais como barras de transferência ou acostamento de concreto.

### 6.2.1. Pavimentos sem barras de transferência e sem acostamento de concreto

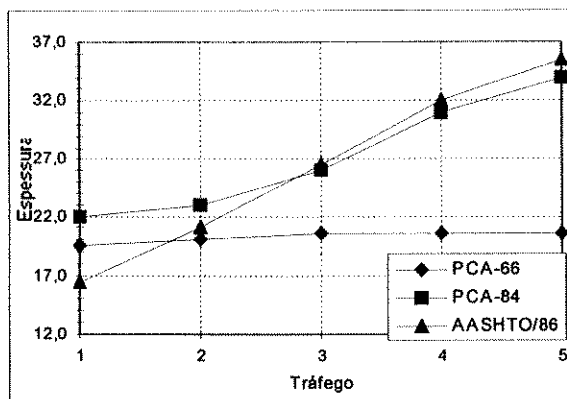
Para esta situação, temos as figuras 6.19 e 6.20, onde estão representadas as espessuras obtidas pelos métodos da PCA-66, PCA-84 e AASHTO/86, em função dos tráfegos, dos módulos de ruptura do concreto e dos valores de “k” de 60 e 100 MPa/m.

Observando estas figuras, podemos comentar:

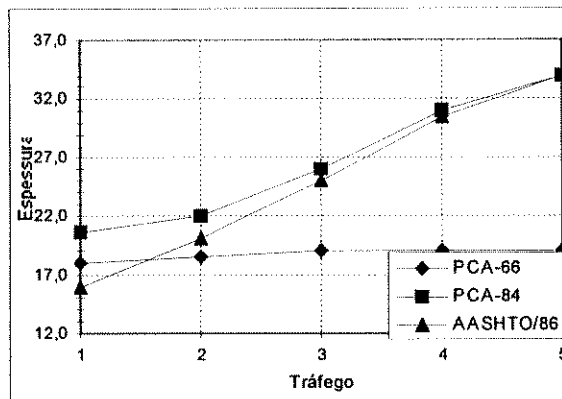
- 1<sup>o</sup>) O método da PCA-66 fornece espessuras praticamente constante para uma grande

variação do tráfego, ou seja, não apresenta sensibilidade a esse parâmetro, e como também produz menores espessuras do que os outros dois métodos, exceto para o tráfego 1 onde o método da AASHTO é mais econômico;

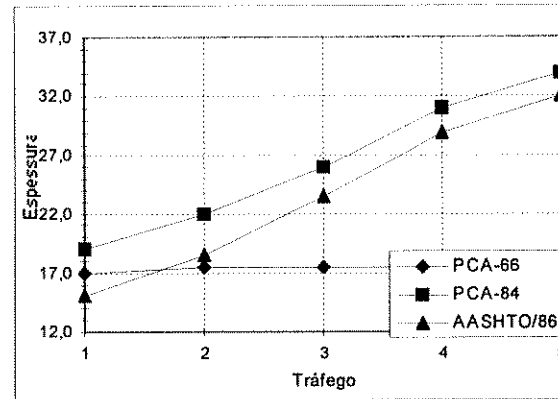
- 2º) Como podemos constatar, nas situações onde a fadiga domina o dimensionamento, o método da PCA-84 apresenta espessuras em torno de 3,0 cm maior do que as obtidas pela versão de 1966, fato este provocado pelo prolongamento da curva de fadiga proposta para esta versão.
- 3º) Para o tipo de pavimento considerado, o método da AASHTO apresentou menores espessuras do que o método da PCA-84, exceto para  $k = 60 \text{ MPa/m}$  e  $M_R = 4,1 \text{ MPa}$ , onde a partir do tráfego 3 aquele método apresenta maiores espessuras do que este; e
- 4º) Finalmente, constatamos a incoerência dos métodos propostos pela PCA quando utilizado para o dimensionamento de um tráfego leve (tráfego 1), onde para uma sub-base granular com 15,0 cm de espessura ( $k = 60 \text{ MPa/m}$ ) é necessário uma placa de concreto com espessura em torno de 18,0 cm e 20,5 cm obtidas, respectivamente, pelos métodos da PCA-66 e PCA-84.



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$

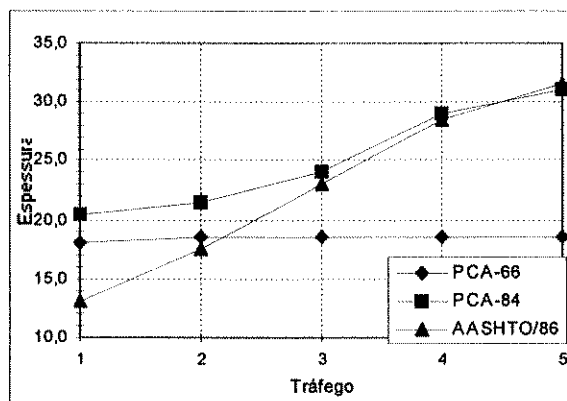


$M_R = 4,5 \text{ MPa}$

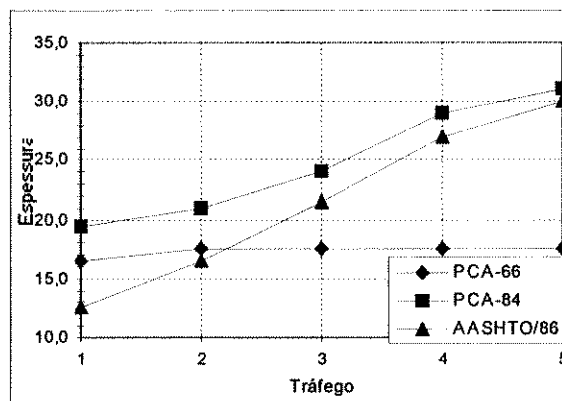


$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

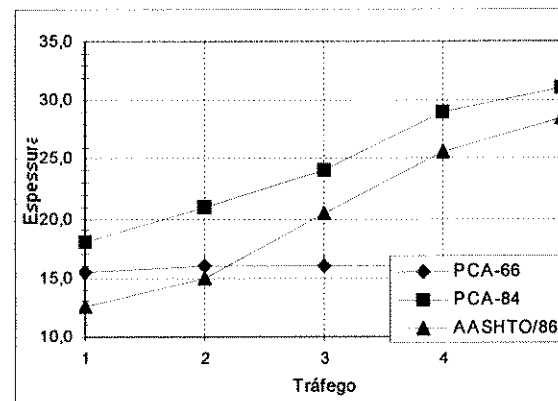
**Figura 6.19.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66, PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 60 \text{ MPa/m}$  (Pav.s/barras e s/acost.)



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$



$M_R = 4,5 \text{ MPa}$



$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

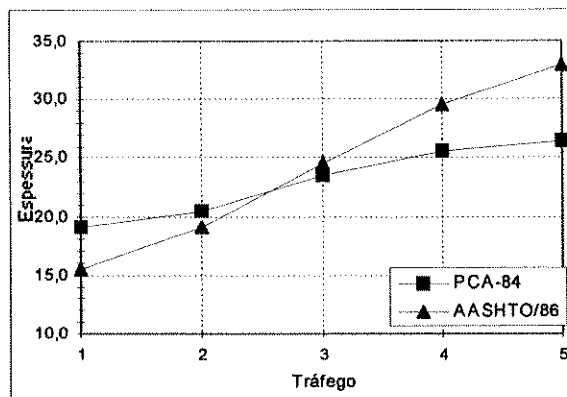
**Figura 6.20.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-66, PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 100 \text{ MPa/m}$  (Pav.s/barras e s/acost.)

### ***6.2.2. Pavimentos sem barras de transferência e com acostamento de concreto***

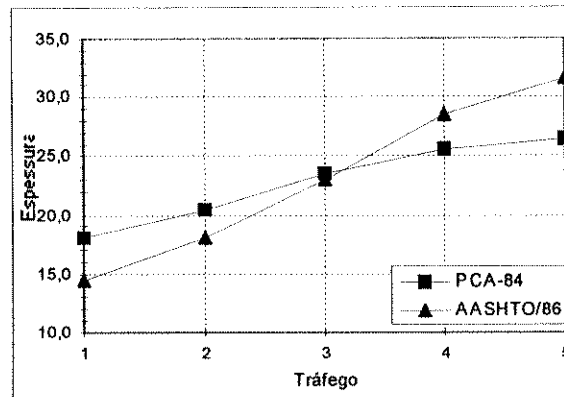
Para esta situação temos as figuras 6.21 e 6.22, em que estão representadas as espessuras obtidas pelos métodos da PCA-84 e AASHTO, levando-se em conta os mesmos parâmetros do caso anterior.

Pela observação dessas figuras, podemos fazer os seguintes comentários:

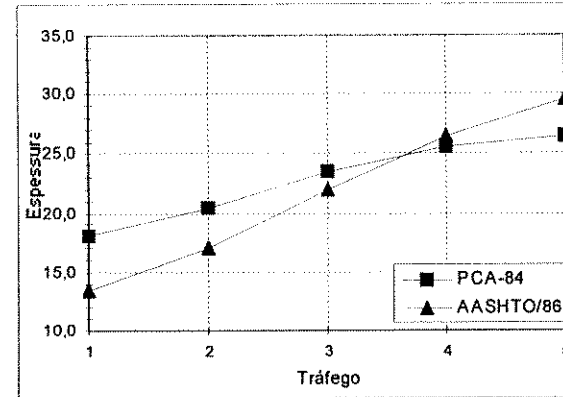
- 1<sup>o</sup>) Para ambos valores de  $k$ , o método da AASHTO apresentou, até o tráfego 3, espessuras menores do que o da PCA-84, a partir deste tráfego as suas espessuras superaram as obtidas pelo método da PCA;
- 2<sup>o</sup>) Podemos notar também que os gráficos das espessuras obtidas pelo método da PCA para os valores de  $M_R$  de 4,1, 4,5 e 5,0 MPa são iguais, respectivamente, para cada tráfego e valor de “ $k$ ”, exceto para o tráfego 1, demonstrando mais uma vez que o dimensionamento foi dominado pela erosão da sub-base; e,
- 3<sup>o</sup>) Finalmente, é notado que o método da PCA-84 apresenta maior sensibilidade do que o método da AASHTO com relação a redução das espessuras pela utilização do acostamento de concreto, para isso, basta comparar as figuras dos itens 6.21 com 6.22.



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$

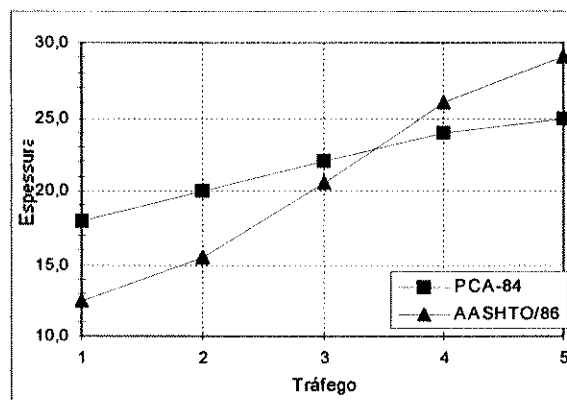


$M_R = 4,5 \text{ MPa}$

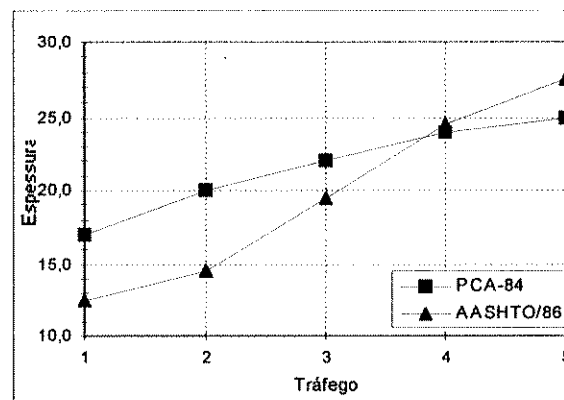


$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

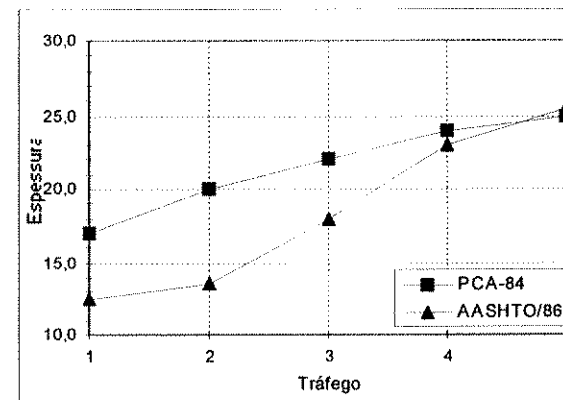
**Figura 6.21.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 60 \text{ MPa/m}$  (Pav.s/barras e c/acost.)



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$



$M_R = 4,5 \text{ MPa}$



$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

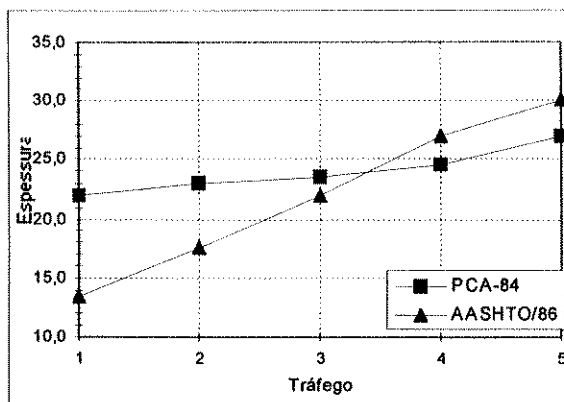
**Figura 6.22.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 100 \text{ MPa/m}$  (Pav.s/barras e c/acost.)

### ***6.2.3. Pavimentos com barras de transferência e sem acostamento de concreto***

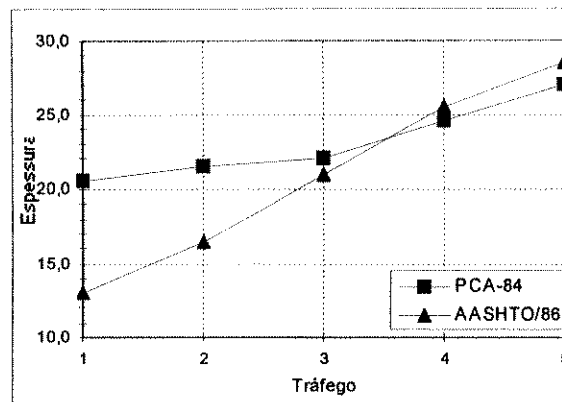
Para esta situação temos as figuras 6.23 e 6.24, onde as representações gráficas indicam com as espessuras obtidas pelos métodos da PCA-84 e AASHTO.

Observando estas figuras, podemos comentar:

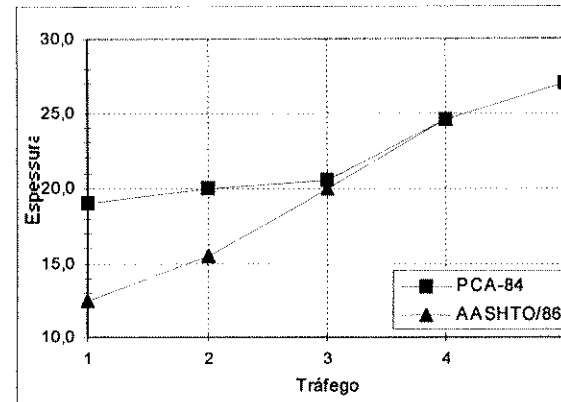
- 1º) Para  $k = 60 \text{ MPa/m}$ , as espessuras obtidas pelo método da AASHTO até o tráfego 3 são menores do que as obtidas pelo método da PCA-84, tornando-se maiores para os tráfegos 4 e 5, porém, à medida que o  $M_R$  aumenta essa diferença vai decrescendo até se igualar para  $M_R = 5,0 \text{ MPa}$ ; e,
- 2º) Fato inverso ocorre para  $k = 100 \text{ MPa/m}$ , onde as espessuras obtidas pelo método da PCA-84 são maiores do que as obtidas pelo método da AASHTO, constatando-se mais uma vez a grande sensibilidade deste método com relação a sub-base tratada na redução da espessura da placa de concreto.



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$

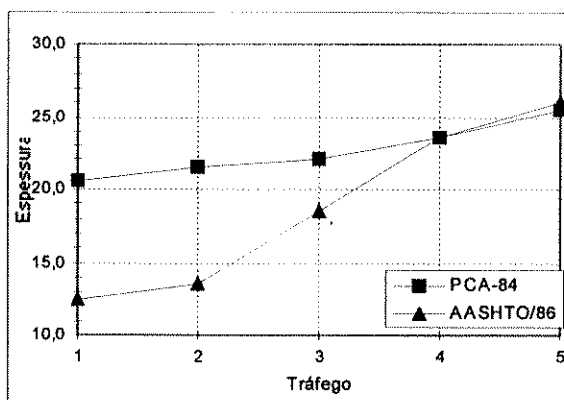


$M_R = 4,5 \text{ MPa}$

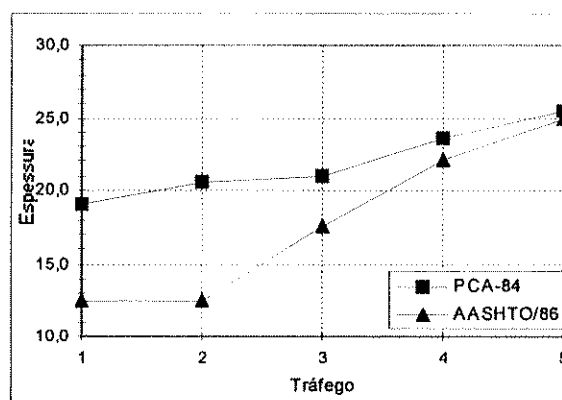


$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

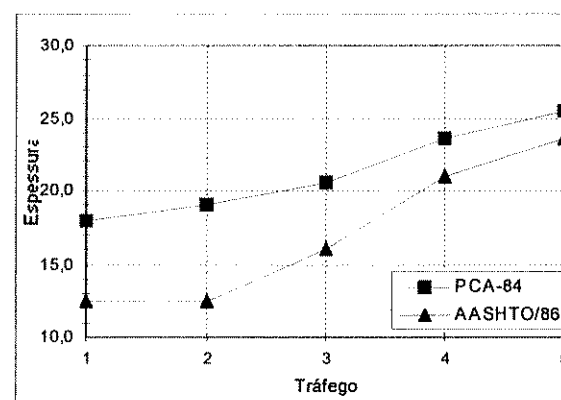
**Figura 6.23.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 60 \text{ MPa/m}$  (Pav.c/barras e s/acost.)



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$



$M_R = 4,5 \text{ MPa}$



$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

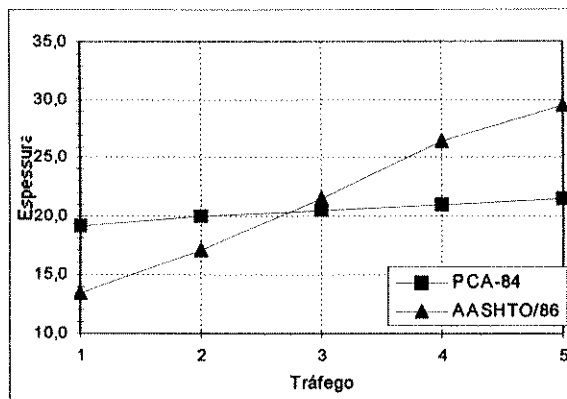
**Figura 6.24.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 100 \text{ MPa/m}$  (Pav.c/barras e s/acost.)

#### ***6.2.4. Pavimentos com barras de transferência e com acostamento de concreto***

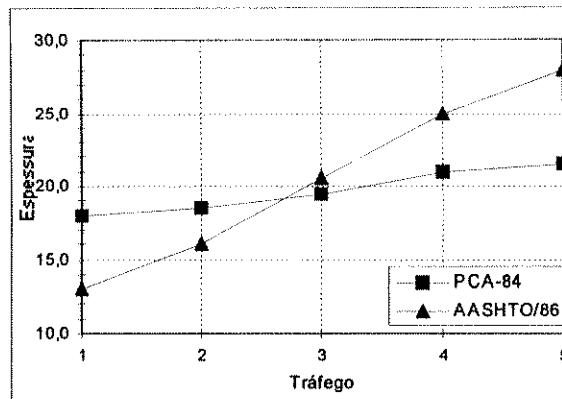
Os gráficos das espessuras obtidas pelos métodos da PCA-84 e da AASHTO estão nas figuras 6.25 e 6.26.

Pela análise destas figuras, podemos comentar:

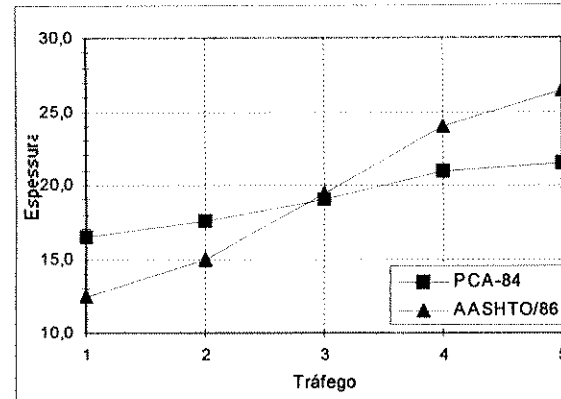
- 1º) Para  $k = 60$  MPa/m, até o tráfego 2, as espessuras obtidas pelo método da AASHTO são sempre menores do que as obtidas pelo método da PCA-84 para todos os valores do módulo de ruptura; no entanto, do tráfego 3 ao tráfego 5 houve uma inversão desta situação;
- 2º) Para  $k = 100$  MPa/m, até o tráfego 3, as espessuras obtidas pelo método da AASHTO são sempre menores do que aquelas obtidas pelo método da PCA-84; no entanto, do tráfego 4 ao tráfego 5 o método da PCA produziu espessuras menores; e,
- 3º) Para as situações com barras de transferência sem e com acostamento de concreto (itens 6.2.3 e 6.2.4), vemos que o método da PCA-84 chega a reduzir a espessura em até 6,5 cm para o tráfego 5 pela utilização do acostamento, enquanto que o método da AASHTO produz uma redução máxima de 1,5 cm.



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$

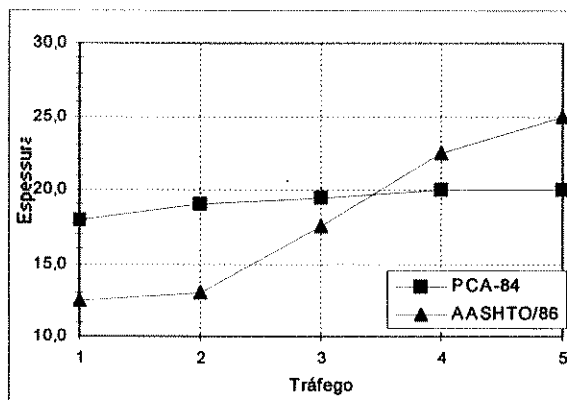


$M_R = 4,5 \text{ MPa}$

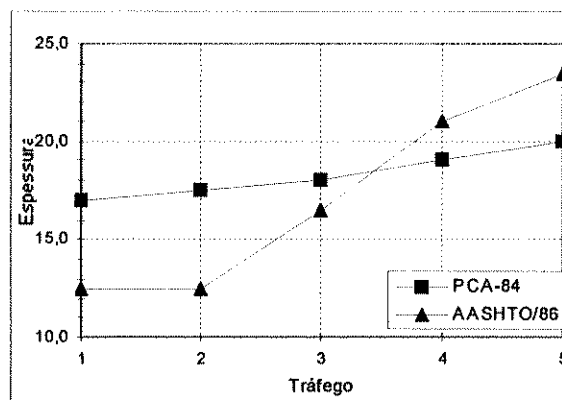


$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

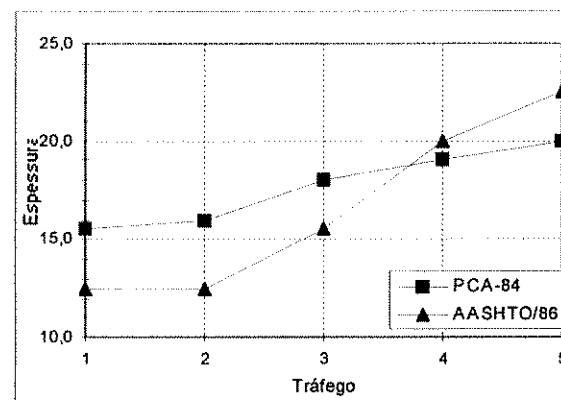
**Figura 6.25.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 60 \text{ MPa/m}$  (Pav.c/barras e c/acost.)



$M_R = 4,1 \text{ MPa}$



$M_R = 4,5 \text{ MPa}$



$M_R = 5,0 \text{ MPa}$

**Figura 6.26.** Gráfico Espessura x Tráfego (PCA-84 e AASHTO/86)  
 $k = 100 \text{ MPa/m}$  (Pav.c/barras e c/acost.)

## 7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

- 1<sup>a</sup>) Para a situação sem barras e sem acostamento de concreto, vemos através das figuras 6.19 e 6.20 que os valores obtidos pelo PCA-66 são bem menores do que os obtidos pelos métodos da AASHTO e PCA-84, contrariando a afirmação de Motta e Rabello (10) que encontrou semelhança nos resultados obtidos pelos métodos da AASHTO e PCA-66. Afirma também Motta e Rabello, que o método da PCA-84 conduz a maiores espessuras do que o da AASHTO, o que para essa situação concordamos;
- 2<sup>a</sup>) Analisando-se as figuras (6.21 e 6.22) e (6.25 e 6.26), vemos que o método da AASHTO apresenta maiores espessuras do que o da PCA-84, contrariando o que afirma Motta e Rabello com relação a esses dois métodos;
- 3<sup>a</sup>) O coeficiente de recalque do sistema subleito-sub-base ( $k$ ), de um modo geral, tem pouca influência na determinação da espessura, no entanto, para os métodos da PCA, ao se passar de 60 para 100 MPa/m, a espessura sofre uma redução em torno de 2,0 cm para ambos os métodos, já em relação ao método da AASHTO, essa redução está em torno de 3,5 cm, confirmando ter maior influência na redução o método da AASHTO. Para essa consideração, afirma Motta e Rabello que a influência maior é para o PCA-84, o que provamos o contrário;
- 4<sup>a</sup>) Ainda sobre a influência do valor de “ $k$ ”, vimos no item 5.4.3.2 que o procedimento original da AASHTO produz o dobro do valor obtido pelo DNER (5), no entanto as espessuras obtidas são muito próximas, basta comparar os quadros (5.34 a 5.37) e (5.39 a 5.42);
- 5<sup>a</sup>) Com relação à resistência à tração na flexão do concreto, o aumento produz sempre

redução na espessura da placa, porém nem sempre isto ocorre para o PCA-84, basta examinar os quadros (5.17 a 5.20);

- 6<sup>a</sup>) Quanto ao tráfego o PCA-66 é indiferente, pois o método ignora o tráfego solicitante, cuja relação de tensões seja menor ou igual a 0,50. Com relação aos métodos da PCA-84 e AASHTO/86 o tráfego afeta a espessura final, porém ambos possuem situações de maior ou menor influência, o que concordamos com Motta;
- 7<sup>a</sup>) Com relação a utilização das barras de transferência, concordamos com as afirmações de Motta e Rabello, pois a sua utilização, produz uma redução significativa na espessura da placa;
- 8<sup>a</sup>) Afirma finalmente Motta e Rabello, que a existência do acostamento de concreto tem pouca influência para o método da AASHTO, o que concordamos; porém, para o caso do PCA-84, ela afirma que isto não resulta em mudança alguma, e desta afirmação discordamos totalmente, pois basta comparar os quadros 5.17 e 5.18 ou 5.19 e 5.20, onde se vê reduções para os tráfegos 4 e 5 em torno de 5,0 cm e 7,0 cm, respectivamente;
- 9<sup>a</sup>) Com relação ao pavimento estruturalmente armado, vimos que o valor de “k” tem pouca influência no cálculo da armadura e que a sua eficiência precisa ser observada aqui no Brasil, embora temos comprovação do seu desempenho em estradas e aeroportos da Suécia; e,
- 10<sup>a</sup>) Com relação a perda de suporte da sub-base considerada no método da AASHTO, vimos que para uma sub-base granular, considerando os limites máximo e mínimo, os valores de “k” variam em torno de 10 vezes, porém as espessuras variam em 2,0 cm. Considerando uma sub-base tratada e levando em conta os limites máximo e mínimo, os valores de “k” variam em torno de 4 vezes, porém as espessuras sofrem uma variação em torno de 3,0 cm, conforme o item 5.4.3.3.

## 8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Após exaustivos cálculos e observações do comportamento dos métodos analisados, chegou-se as conclusões atuais, baseadas tão somente nos dados inicialmente considerados e nas metodologias preconizadas pelos respectivos métodos, destacando-se, por sua maior relevância, as seguintes conclusões:

- 1<sup>a</sup>) Efetivamente, as barras de transferência, além de produzir uma redução significativa na espessura, promovem também uma maior proteção à sub-base;
- 2<sup>a</sup>) O coeficiente de recalque do sistema subleito-sub-base tem pouca influência na determinação da espessura da placa;
- 3<sup>a</sup>) Que a utilização do acostamento tem muita influência na redução da espessura da placa para o método da PCA-84 e pouca para o método da AASHTO;
- 4<sup>a</sup>) A possível erosão da sub-base tem para o método da PCA-84 um peso muito grande no dimensionamento do pavimento;
- 5<sup>a</sup>) Para as cargas consideradas neste trabalho, o dimensionamento do pavimento pelo PCA-66 foi praticamente comandado pelo eixo simples, os eixos tandem duplo e triplo tiveram de pouca a nenhuma influência, respectivamente;
- 6<sup>a</sup>) Que o pavimento estruturalmente armado, além de apresentar vantagem econômica sobre o pavimento de concreto simples, é menos suscetível as deficiência dos subleito;
- 7<sup>a</sup>) Que o método da AASHTO apresenta pouca sensibilidade aos parâmetros perda de suporte ( $P_s$ ) e coeficiente de recalque do subleito; e,
- 8<sup>a</sup>) Finalmente, vimos que para a maioria das alternativas de pavimento estudado, o dano por erosão da sub-base tem um peso muito grande no dimensionamento do

pavimento para o método da PCA-84 e pouca influência para o método da AASHTO.

Após o exposto e com base nas análises feitas e nas comparações numéricas efetuadas, deu origem a uma série de dúvidas que merecem ser investigadas futuramente e que são aqui listadas como recomendações:

- 1ª) No momento que se optar por um tipo e espessura de sub-base, já que o sistema subleito-sub-base tem pouca influência na determinação da espessura da placa, sugerimos que o pavimento seja dimensionado apenas pelo coeficiente de recalque do subleito e que a sub-base utilizada tenha a função de uniformizar o suporte do subleito e de evitar o bombeamento, conforme as observações feitas nos itens 4.2.1.1 e 4.2.1.2;
- 2ª) Muitas vezes os pavimentos de concreto falham e a sub-base não apresenta a tal erosão, por isso, sugiro que sejam feitos futuros estudos visando aprimorar tal fator, uma vez que o método original já faz tal referência;
- 3ª) Que seja desconsiderado do método da AASHTO, em função do tipo de solo e do clima do nosso país, o cálculo do dano relativo (quadro 5.38).

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AASHTO: Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C., 1986.
2. BRADBURY, R.D. – Reinforced Concrete Pavements. Washington, D.C., Wire Reinforced Institute, 1938.
3. CHILDS, L.D., COLLEY, B.E., et. al. – Tests to Evaluate Concrete Pavement Subbases. Journal Of The Highway Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 83, nº HW3, July, 1957.
4. CHILDS, L.D., KAPERINICK, J.W. – Tests of Concrete Pavements on Gravel Subbases. Journal of the Highway Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 84, nº HW3, Oct. 1958.
5. DNER (1989). Manual de Pavimentos Rígidos. Projeto e Dimensionamento – Operação e Conservação. Vol. 2 – Rio de Janeiro.
6. HILSDORF, H. K. e KESLER, C.E. – Fatigue Strenght of Concrete Under Varying Flexural Stresses. American Concrete Institute, Proc. Detroit, 63 (10) 1059-76, Oct. 1966.
7. JIANG Y., DARTER, M. I. et. al. – Analysis of Current State Rigid Pavement Design Practices in United States. Transportation Research Record, nº 1525, Washington, D.C., 1996.
8. KELLEY, E.F. – Application of the Results of Research to the Structural Design of Concrete Pavements. Public Roads, Washington, D.C. vol. 20 N. 5, Jul. 1939.
9. LOSBERG, Anders – Designs Methods for Structurally Reinforcement Concrete Pavements. In Transactions of Chalmers University of Thecnology, Gothemburg, Sweden, 1961.

10. MOTTA, L.M.G. e NETO, M.P. Rabello – Considerações a Respeito do Dimensionamento de Pavimentos Rígidos. 28ª Rap. – ABPV – Belo Horizonte, 1994.
11. PACKARD, Robert G. – Design of Concrete Airport Pavement. Portland Cement Association (PCA). Engineering Bulletin, 1973.
12. PICKETT, Gerald e RAY, G.K. Influence Charts for Concrete Pavements. American Society of Civil Engineers, Proc., New York, 76:1-26, Apr. 1950.
13. PITTA, Márcio Rocha. Dimensionamento dos Pavimentos Rodoviários de Concreto. São Paulo, ABCP, 1990 (ET-14).
14. PITTA, Márcio Rocha. Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto pelo Método PCA/84. São Paulo, ABCP, 1992 (ET-97).
15. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). – Thickness Design for concrete pavements. Chicago, 1966 (HB-35).
16. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). – Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. Canadian Edition, Ottawa, 1984.
17. RODRIGUES, Públio P.F. e PITTA, M.R. Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Estruturalmente Armados. ABCP – IBTS, 1998.
18. SANTOS, Lauro M. dos. Cálculo de Concreto Armado Segundo a Nova NB-1 e o CEB, LMS, vol. 1, 2ª ed., 1983.
19. SPRINGENSCHMID, R. – Design Concepts of Concrete Pavements in Europe. International Conference on Concrete Pavement Design, 1977.
20. TELLER, L.W., SUTHERLAND, E.C. The Structural Design of Concrete Pavements. Public Roads, Washington, D.C., v. 16, n. 8, Part. 1, n. 9, Part. 2, n. 10, Part. 3, 1935; v. 17, n. 7, Part. 4, 1936; v. 23, n. 8, Part. 5, 1943.
21. THOMPSON, Marshal. R., e DEMPSEY, BARRY. J. – Subgrade Soils: an Important Factor in Concrete Pavement Design. International Conference on Concrete Pavement Design, Purdue University West Lafayette, Indiana, U.S., Feb. 1977.
22. VALENZUELA, R., GUZMÁN, N. et. al. – Comportamiento a Fadiga de los Hormigones de Pavimento Usados en Chile. 25ª Rap. – ABPV – São Paulo, 1991.

23. WESTERGAARD, H.M. Computation of Stress in Concrete ROADS, Proceedings of the Fifth Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington, D.C., 1925, v.5, p: 90-112.
24. WESTERGAARD, H.M. Stress in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. Public Roads, Washington, D.C., 7(2):25-35, Apr. 1926.
25. WESTERGAARD, H.M. Theory of Concrete Pavement Design. Proceedings of the Seventh Annual Meeting of the Annual Highway Research Board. Washington, D.C., 1927.
26. WESTERGAARD, H.M. Analytical Tools for Judging Results of Structural Tests of Concrete Pavements. Public Roads, Washington, D.C., 14(10):185-88, Dec., 1933.
27. WESTERGAARD, H.M. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields. American Society of Civil Engineers, Oct. 1947.
28. YODER, E. J., e WITCZAK, M.W. – Principles of Pavement Design, 2<sup>a</sup> ed., John Wiley e Sons, New York, 1975.

## **10. ABSTRACT**

This work is about the comparative analysis of the performance of the methods of rigid pavements design concerning the PCA and AASHTO/86 and the design of the structurally reinforced pavements aiming at analysing their individual variations when parameters are changed.

To reach the foreseen objectives, variations were made in the traffic, modulus of subgrade reaction “k” and in the modulus of rupture of the concrete with the purpose of observing their sensibility.

On the whole, the results demonstrated that, as regards the procedures indicated by the applied methods, there are parameters that have a greater influence in the reduction of the thickness of the pavement. One example is the dowels for the PCA and AASHTO methods and the concrete shoulder for the PCA-84. There are also other parameters that demonstrate indicate few sensibility in the design of the pavement.