

TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA

ESTRADAS

APOSTILA DE PROJETO DE PAVIMENTO

Prof. Dr. Edson de Moura

Disponível em: www.professoredmoura.com.br

2º semestre / 2025

ÍNDICE

PLANO DE ENSINO-APRENDIZAGEM - EMENTA	11
PREFÁCIO	14
AULA 01 – HISTÓRIA DA PAVIMENTAÇÃO, DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS	1
1.1 - História da Pavimentação no Mundo	1
1.2 - Definição de Pavimento	5
1.3 - Classificações de Pavimentos	6
AULA 02 – CLASSIFICAÇÃO DE VEÍCULOS	9
2.1 – Introdução	9
2.2 - Veículo Representativo	11
2.2.1 - Legislação Relativa Às Dimensões e Pesos dos Veículos	11
2.2.2 – Resolução N.º 12, de 06/02/98	12
2.2.3 - Circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVC)	14
2.2.4 - Resoluções Relativas a Cargas Excepcionais.....	15
2.3 - VEÍCULOS DE PROJETO	22
2.3.1 - Veículos Adotados na Classificação do DNIT	24
AULA 03 - COMPOSIÇÃO DO TRÁFEGO PARA FINALIDADE DE PROJETO ESTRUTURAL.....	56
3.1 - Introdução	56
3.2 - Contagem de campo (exemplo)	59
3.3 - Determinação do VDM	60
3.4 - Fator de equivalência de carga (FEC)	62
3.5 - Fator de eixo	65
3.6 – Fator de veículo.....	65
AULA 04 - DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO	73
4.1 – Considerações iniciais	73
4.2 – Dimensionamento de pavimentos – Método do CBR - Histórico.....	74
4.3 – Critério do CBR.....	75
4.4 – USACE	76

4.5 – Espessura X CBR	77
4.6 – Critério de Cobertura utilizado pelo USACE	77
4.7 – Seção transversal típica de pavimento flexível	78
4.8 – Água no pavimento.....	79
4.9 – Influência da água no dimensionamento de pavimentos	81
4.10 – Coeficiente de equivalência Estrutural	82
4.11 - Determinação das Espessuras das Camadas.....	84
4.12 - Exemplos de dimensionamento	86
AULA 05 – PMSP IP-04/2004 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS PARA TRÁFEGO LEVE E MÉDIO..	92
5.1 – Introdução	92
5.2 – Estudo Geotécnico	92
5.2.1 – Serviços preliminares de campo	92
5.2.2 - Serviços de Escritório	93
5.3 – Classificação dos Tipos de Tráfego.....	94
5.4 – Considerações sobre o Subleito.....	95
5.5 – Espessura Total do Pavimento	96
5.5.1 – Espessura da Camada de Rolamento	97
5.5.2 – Espessuras das demais camadas	97
5.5.3 – Espessuras mínimas de base recomendadas	99
5.5.4 – Características estruturais de base recomendadas	99
5.6 – Coeficiente de Equivalência Estrutural	100
5.7 – Exemplos de dimensionamento	101
5.8 – Superestruturas tipos.....	107
AULA 06 – ANÁLISE MECANICISTA	109
6.1 – Análise mecanicista de estruturas de pavimentos	109
6.1.1 – Teoria da Elasticidade Aplicada à Pavimentos	109
6.1.1.1 - Deformações em pavimentos flexíveis	111
6.1.1.2 - Sistemas de múltiplas camadas	112
6.1.2 - Modelos para verificação à fadiga	114

6.1.3 - Camada de rolamento de misturas asfálticas	115
6.1.4 - Camada de cimentada	118
6.1.5 -Subleito	119
6.3 - Módulo e Espessuras Equivalentes (Equivalência Deflectométrica).....	121
6.4 - Análise mecanicista - IP 08 PMSP	124
6.5 - Modelos para avaliação mecanicista	126
6.6 - Programas computacionais	143
6.3.2.3 – Tensão vertical – topo do subleito	158
6.6 - MEDINA - MÉtodo de DIMensionamento NAcional de pavimentos	158
7.1 - Histórico	163
7.2 - Serventia	163
7.3 – Equação de Desempenho	165
AULA 8 - DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO DE CONCRETO	175
8.1 – Introdução	175
8.2 – Regra de dano liner cumulativo – Palmgren-Miner.....	176
8.3- Métodos	180
8.3.1 – Método da PCA (1966)	181
8.3.2 – Método da PCA (1984)	181
8.3.2.1 - Procedimento.....	184
8.3.2.2 - Tráfego	187

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição das tensões nos pavimentos: rígido, semirrígidos e flexível.....	7
Figura 2 - Pneu comum de rodagem dupla e de rodagem singela com extralargo.....	11
Figura 3 - Vista do eixo traseiro com rodagem singela com pneus extralargos.....	11
Figura 4 - Balanço traseiro e entre eixos.....	12
Figura 5 - Dimensões e pesos de veículos até 45 t.....	17
Figura 6 - Dimensões e pesos de veículos até 74 t.....	17
Figura 7 - Configurações de eixos.....	18
Figura 8 - Configurações das suspensões.....	18
Figura 9 - Configurações dos eixos de semirreboques.....	18
Figura 10 - Capacidade legal, veículos com 2 eixos.....	19
Figura 11 - Capacidade legal, veículos com 3 eixos.....	19
Figura 12 - Capacidade legal, veículos com 4 eixos.....	20
Figura 13 - Capacidade legal, veículos com 4 eixos.....	21
Figura 14 - Capacidade legal (resumo).....	21
Figura 15 - Dimensões (Resumo).....	22
Figura 16 - Carga máxima (Resumo).....	22
Figura 17 - CO veículos comerciais rígidos, não.....	23
Figura 18 - O - veículos comerciais rígidos de maiores dimensões não articulados.....	23
Figura 19 - SR - veículos comerciais articulados, compostos de uma unidade tratora simples (cavalo mecânico) e um semirreboque.....	24
Figura 20 - RE - veículos comerciais com reboque, composto de uma unidade tratora simples, um semirreboque e um reboque.....	24
Figura 21 - Classe dos veículos.....	28
Figura 22 - Contagem quantitativa e qualitativa de veículos.....	59
Figura 23 - Espessura da camada granular sobre o subleito em função do CBR - CURVA - B.....	75
Figura 24 - Espessura da camada granular sobre o subleito em função do CBR - Curvas A e B.....	76
Figura 25 - Seção típica de um pavimento flexível.....	78

Figura 26 - Formas de penetração de água na estrutura do pavimento	79
Figura 27 - Ábaco para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis- DNER (1981).....	84
Figura 28 - Simbologia das camadas.....	85
Figura 29 - Ábaco de Dimensionamento para tráfego leve e médio SIURB/PMSP - (adaptação do método do Corpo de Engenheiros - USACE).....	96
Figura 30 - Esquema elucidativo PMSP para tráfego médio.	98
Figura 31 - Esquema elucidativo PMSP para tráfego leve com base mista	98
Figura 32 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais	100
Figura 33 - Associação de camadas.....	103
Figura 34 - Superestruturas tipo de pavimentos para tráfego leve.....	107
Figura 35 - Superestruturas tipos de pavimentos para tráfego médio	108
Figura 36 - Sistema elástico generalizado de múltiplas camadas.....	111
Figura 37 - Estrutura de uma camada sob ação de uma carga.	112
Figura 38 - Base padrão das curvas de influência das tensões Burmister para duas camadas.....	113
Figura 39 - Tensões: verticais, horizontais e de cisalhamento sob ação da carga	114
Figura 40- Pontos críticos considerados para análise dos parâmetros.	114
Figura 41 - Módulo equivalente - Palmer e Barber.....	121
Figura 42 - Guide Pratique de Dimensionnement - LCPC.....	122
Figura 43 - ESRD - parâmetros dimensionais considerados nas equações da IP-08 PMSP para determinação das deflexões, tensões de tração e deformação de tração	124
Figura 44- Estrutura submetida ao programa Elsym 5 para análise das tensões deformações e deslocamentos.	145
Figura 45 - 1º quadro do programa Elsym 5.....	145
Figura 46 - 2º quadro do programa Elsym 5 - dados das camadas	146
Figura 47 - 3º quadro - dados da carga.....	146
Figura 48 - 4º quadro - Locais dos pontos para avaliação	147
Figura 49 - Menu de novos dados.....	148
Figura 50 - Menu principal.....	148

Figura 51 - Menu de resultados - 1ª camada (0,01 cm).....	149
Figura 52 - Tensões normais e radiais do 1º ponto da 1ª. camada.....	149
Figura 53 - Deformações normais e radiais do 1º ponto da 1ª. camada.	150
Figura 54 - Deslocamentos normais e radiais do 1º ponto da 1ª. camada	151
Figura 55 - Tensão normais e radiais do 2º ponto da 1ª. camada	151
Figura 56 - deformação normais e radiais do 2º ponto da 1ª. camada	151
Figura 57 - deslocamentos normais e radiais do 2º ponto da 1ª. camada	152
Figura 58 - Menu de resultados da 2ª camada	152
Figura 59 - Tensão normais e radiais 2ª camada	152
Figura 60 - Deformações normais e radiais 2ª camada	153
Figura 61 - Deslocamentos normais e radiais 2ª camada.....	153
Figura 62 - Menu de resultados da 3ª camada	153
Figura 63 - Tensões normais e radiais 3ª camada	154
Figura 64 - Deformações normais e radiais 3ª camada	154
Figura 65 - Deslocamentos normais e radiais 3ª camada	154
Figura 66 - Menu de resultados da 5ª camada	155
Figura 67 - Tensões normais e radiais 5ª camada	155
Figura 68 - deformações normais e radiais 5ª camada.....	155
Figura 69 - Deslocamentos normais e radiais 5ª camada	156
Figura 70 - Tela inicial do Medina.....	159
Figura 71 - Incremento de material - Medina.....	160
Figura 72 - Determinação do número N - Medina	160
Figura 73 - Descritivo como resultado do dimensionamento	161
Figura 74 - Características do loop da pista da AASHTO ROAD TEST	163
Figura 75 - Os seis loops da AASHTO ROAD TEST	163
Figura 76 - Detalhe de um dos loops.....	163
Figura 77 - Esquema da serventia de um dado pavimento	164

Figura 78 - Determinação do coeficiente estrutural do concreto asfáltico a_1	166
Figura 79 - Esquema elucidativo da estrutura das camadas - AASHTO/93	170
Figura 80 - Igualdade entre os lados esquerdo e direito.....	171
Figura 81 - Igualdade entre os lados esquerdo e direito para camada de base	172
Figura 82 - Igualdade entre os lados esquerdo e direito para camada de base.....	172
Figura 83 - Distribuição de cargas nos pavimentos rígido e flexível.....	175
Figura 84 - Pavimento de concreto simples	176
Figura 85 - Pavimento de concreto simples com barra de transferência	176
Figura 86 - Pavimento de concreto com armadura descontínua sem função estrutural	176
Figura 87 - Pavimento de concreto com armadura contínua sem função estrutural	176
Figura 88 - Pavimento de concreto armado	176
Figura 89 - Espectro de amplitude de ciclos de tensões.....	177
Figura 90- Curva S-N.....	177
Figura 91 - Placa com carregamento pontual - tensões horizontais de tração (-) e compressão (+).....	178
Figura 92 - Curva S-N definida por três níveis de tensões	179
Figura 93 - Resolução	179
Figura 94 - Equações analíticas de Westergaard.....	181
Figura 95 - Representação esquemática da placa de reação	184
Figura 96 - Sistema de fixação dos extensômetros sobre a placa de reação	184
Figura 97 - Sistema de reação (caminhão)	185
Figura 98 - Hastes de sustentação	185
Figura 99 - Curva para determinação de k	185
Figura 100 - Esquema da relação entre k_1 e k_2	186
Figura 101 - Roteiro para determinação da tensão de tração a flexão	189
Figura 102 - Ábaco de Picket e Ray - Determinação da tensão de tração (σ_t) - eixo simples	193
Figura 103 - Ábaco de Picket e Ray - Determinação da tensão de tração (σ_t) - eixo tandem duplo	194
Figura 104 - Ábaco de Picket e Ray - Determinação da tensão de tração (σ_t) - eixo tandem triplo	195

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais dimensões básicas dos veículos de projeto.....	24
Tabela 2 - Correspondência das tarifas de pedágio pelas diversas categorias de veículos	26
Tabela 3 - Fatores de veículos na etapa de estudo preliminar	58
Tabela 4 - Fatores de veículos na etapa de estudo básico e preliminar	59
Tabela 5 - Fatores de distribuição do volume de tráfego.....	61
Tabela 6 - VDM na faixa crítica.....	62
Tabela 7 - Fatores de equivalência de carga - USACE (DNER, 1998).....	63
Tabela 8 - Equações para determinação dos FECs da AASHTO	64
Tabela 9 - FECS USACE E AASHTO	64
Tabela 10 - Determinação do FV	66
Tabela 11 - Determinação do número N para um período de 10 anos com taxa de 2,65%/ano PA	67
Tabela 12 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais DNIT	83
Tabela 13 - Espessuras de revestimento asfálticos	83
Tabela 14 - Ensaios geotécnicos para subleito natural	92
Tabela 15 - Ensaios geotécnicos para subleito com camada de revestimento primário.....	93
Tabela 16 - Classificação de Vias - Tráfego Leve e Médio	95
Tabela 17- Valores das espessuras Hsl em função dos índices de CBR.....	96
Tabela 18 - Tipo de material do revestimento e espessura mínima	97
Tabela 19 - espessuras mínimas de base recomendadas.....	99
Tabela 20 - Valores mínimos de CBR e máximos de expansão para materiais de base e sub-bases.....	100
Tabela 21 - Pontos críticos e parâmetros monitorado	110
Tabela 22 - Modelos de fadiga para deformação de tração (ϵ_t) na fibra inferior do revestimento asfáltico	116
Tabela 23 - Valores Usuais de Coeficiente de Poisson	117
Tabela 24 - Valores Usuais de Módulo de Resiliência ou Elasticidade	117
Tabela 25- Coeficientes A e B para solo classificados pela MCT.....	119

Tabela 26 - Curvas de fadiga de material cimentado encontrados na literatura	119
Tabela 27 - Valores dos coeficientes dos modelos de regressão para determinação da deformação vertical ($\epsilon_{v(adm)}$) no topo do subleito da literatura.....	120
Tabela 28 - Deformação, tração e deflexão de estruturas de pavimentos - IP 08 PMSP	124
Tabela 29 - Coeficientes A e B determinado por regressão linear da curva de fadiga de solo cimento Ceratti (1991)	125
Tabela 30 - Parâmetros considerados no modelo σ_t da BGTC	127
Tabela 31 - Parâmetros considerados no modelo de deflexão de pavimento com três camadas e base cimentada	127
Tabela 32 - Estruturas dos pavimentos I e II dimensionadas pelo método do CBR	128
Tabela 33 - Relação da tensão de diferentes espessuras de BGTC para distintos valores de módulos do subleito e espessuras do revestimento.....	129
Tabela 34 - Parâmetros considerados no modelo de deformação de tração da fibra inferior e tensão de tração na flexão.....	133
Tabela 35 - Estrutura do pavimento invertido	133
Tabela 36 - Resultados da avaliação mecanicista do revestimento asfáltico do pavimento invertido ...	134
Tabela 37 - Resultados da avaliação mecanicista da camada cimentada do pavimento invertido.....	134
Tabela 38 - Relação das tensões e deformações da camada de subleito do pavimento invertido	135
Tabela 39 - Resultado da estrutura do pavimento invertido após análise mecanicista	135
Tabela 40 - Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 1.....	138
Tabela 41- Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 2	138
Tabela 42- Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 3	138
Tabela 43 - Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 4	139
Tabela 44 - Estruturas dos pavimentos I e II	139
Tabela 45 - Espessuras e MRs e valores da relação N_F / N_P	140
Tabela 46 - Resumo dos parâmetros de análise da estrutura	157
Tabela 47 - Valores de módulo de resiliência associado a sazonalidade	165
Tabela 48 - Coeficiente estruturais das camadas de base e sub-base.....	167
Tabela 49 - tempo de escoamento de 50% da água adsorvida	167

Tabela 50 - Valore de m_i - coeficiente de drenagem.....	167
Tabela 51 - Valores especificados de Z_r	168
Tabela 52 - Materiais, módulos de resiliência e coeficientes estruturais	168
Tabela 53 - Espessuras mínimas do revestimento e de bases granulares em função do N	169
Tabela 54 - Valores de $SN+1$	171
Tabela 55 - Valores de $SN + 1$ para camada de base.....	172
Tabela 56 - Valores de $SN + 1$ para camada de base.....	172
Tabela 57 - valores de SN , a_i e m_i	173
Tabela 58 - Estrutura do pavimento conforme dimensionamento da AASHTO	174
Tabela 59 - Relação de tensões ao número admissível de repetições de carga	183
Tabela 60 - Aumento de k devido à presença de sub-base granular de várias espessuras com mesmo valor de CBR.....	186
Tabela 61 - Coeficiente k em função de k_2 e k_1 para espessuras de sub-base de 10, 15 e 20 cm.....	187
Tabela 62 - Coeficiente k para diferentes espessuras e materiais de sub-bases	187
Tabela 63- Dimensionamento n. 1 de placa de concreto	190
Tabela 64 - Dimensionamento n. 2 de placa de concreto.....	191
Tabela 65 - Dimensionamento n. 3 de placa de concreto.....	192
Tabela 66 - Dimensionamento n. 4 de placa de concreto.....	192

PLANO DE ENSINO-APRENDIZAGEM - EMENTA

2025

1. IDENTIFICAÇÃO

Departamento: TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA**Curso:** Superior de Tecnologia em Construção Civil - Modalidade Movimento de Terra e Pavimentação.**Disciplina:** Projeto de Pavimento**Sigla:** PROJ PAV**Código:** 4308**Carga Horária Semanal:** 04 ha**Carga Horária Total:** 80 ha**Disciplina** obrigatória ☒ optativa ☐ eletiva ☐ laboratório ☐**Número Máximo de Alunos:** 40**Período:** Noturno**Semestre:** 4º**Professor Responsável:** Dr. Edson de Moura**Professor(es):** Dr. Edson de Moura**Auxiliar(es) Docente:**

2. EMENTA

Dimensionamento de pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos.

3. OBJETIVOS

- a) Identificar as características dos métodos de dimensionamento: empírico, semi empírico e teórico.
- b) Dimensionar pavimentos flexíveis e semirrígidos.

c) Aplicar os procedimentos de dimensionamento de pavimento rígido.

4. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

- 1) Tipos de Dimensionamento: empírico, semi-empírico e racionais ou teóricos.
- 2) Tráfego de projeto: cargas rodoviárias, lei da balança, interação carga-estrutura.
- 3) Equivalência entre cargas - Fator de Equivalência de Carga FEC) conforme USACE e AASHTO:
 - a) FEC - de carga,
 - b) FEC_{ESRD} - eixo simples roda dupla,
 - c) FEC_{ETD} - eixo tandem duplo e,
 - d) FEC_{ETT} - eixo tandem triplo.
- 4) Composição do tráfego: contagem de veículos, fator de veículo e número N.
- 5) Conceitos dos métodos de dimensionamento: CBR, USACE, DNIT e do DER-SP, da Resiliência e da AASHTO.
- 6) Projeto de pavimentos flexíveis do DNIT e da PMSP.
- 7) Projeto de pavimentos de concreto
- 8) Tensões e deslocamentos na estrutura do pavimento: teoria da elasticidade, fadiga dos materiais, tensões, deformações e deslocamentos.

5. ESTRATÉGIAS

Aulas expositivas com recursos áudio visuais: quadro negro, data show, e retro-projetor.

Os alunos acompanham a matéria através de notas de aula, anteriormente adquiridas.

Nessas notas de aulas contém exercícios propostos e resolvidos.

Atividade extraclasse (exercícios, relatórios etc.), até 16 ha.

6. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

O processo de avaliação consiste na aplicação de quatro provas denominadas de P₁, P₂, P₃ e P₄. O aluno está aprovado se a média final for $\geq 6,0$ obtida pela equação:

$$MF = (P_1 * P_2 * P_3 * P_4)^{0,25} \geq 6,0 \text{ Aprovado}$$

onde: M_F = Média Final

P₁, P₂, P₃ e P₄ = Provas

Para média final inferior a 6,0, o aluno deverá fazer provas de exame e obter nota superior a 6,0 para as provas que o aluno não atingiu nota 6,0.

7. REFERÊNCIAS

7.1. Bibliografia básica

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

7.2. Bibliografia complementar

MEDINA, Jacques de. **Mecânica dos pavimentos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: UFRJ Editora, 1997. 380 p.

RESPONSÁVEL PELA DISCIPLINA

Prof. Dr. Edson de Moura

CHEFE DO DEPARTAMENTO

Profa. Leila Meneguelli

“Porque os pavimentos no Brasil apresentam condições de rolamento ruins, quanto à economia e segurança para o usuário e o custo dos serviços de manutenção são elevados?”

Excesso de carga – devido à ausência de balanças rodoviárias, a prática de excesso de carga é, notoriamente, uma realidade nacional. A concepção de uma estrutura de uma rodovia, tem como premissa: a quantidade, os tipos e principalmente a carga dos veículos que irão trafegar, expresso pelo número N (normalmente para período de 10 anos de projeto), caso nessa estrutura, quando em serviço, ocorram a passagens de veículos com excessos de cargas, não computado, o período de 10 anos, inicialmente considerado, pode ocorrer prematuramente.

Materiais - Os materiais empregados na construção de nossas rodovias, assemelham-se quanto a qualidade dos materiais, normalmente, empregados em rodovias de outros países. Principalmente, materiais empregados em camadas de bases, sub-bases e reforços de subleito. Mesmo os materiais da camada de rolamento, apresentam características análogas aos materiais dos revestimentos encontrados em outros países, visto que, os materiais devem atender às normas que preconizam e atestam a sua qualidade.

Construção – o processo de edificação de obras públicas no Brasil, não só de obras rodoviárias, mas obras civis em geral, requer atenção. Em obras viárias, devido ao elevado custo, é competência do poder público administrar os recursos. A falta de controle tecnológico na execução de obras viárias é um dos principais causadores da má qualidade de nossas vias. Espessuras insuficiente, compactação aquém da ideal, ausência de drenagem, usinagem inadequada de misturas asfálticas, dentre outros fatores, propiciam a redução da vida útil da rodovia.

Conservação – falta de manutenção preventiva. As intervenções de restauração são realizadas quando os pavimentos apresentam condições precárias na sua estrutura e nem sempre essas intervenções contemplam as premissas técnicas necessárias para a correta restauração.

Projeto – a concepção de projetos inadequados, como número N inferior ao real, erros no dimensionamento das camadas, análise mecanicista malfeita, além de outros parâmetros, resulta em estruturas com qualidade inferior, propiciando a ruptura prematura do pavimento.

Não aleatoriamente, em primeiro lugar foi colocado o excesso de carga, sem dúvida esse parâmetro causa danos a estrutura que somente com intervenções profundas se pode corrigir. Em seguida, materiais e após a construção, problemas construtivos e mesmo a escolha de materiais inadequados são práticas recorrentes na construção e manutenção de nossas rodovias, e por fim, o projeto, dificilmente o projeto é colocado a prova, pois os pavimentos entram em colapso prematuramente, ocasionados por erros construtivos, escolha dos materiais inadequados e principalmente por excesso de carga.

Em resposta ao questionamento, a reduzida malha rodoviária nacional, somada a péssima qualidade ao rolamento coloca o usuário em condições de pouca segurança e, por conseguinte a custo elevado de trafegabilidade. A demora do poder público na intervenção da via para correção de defeitos, acaba por deteriorar a estrutura da via demasiadamente o que resulta em um custo muito superior de manutenção quando da ocasião de intervenção.

O correto dimensionamento de pavimentos é de fundamental importância, entretanto, associar à má qualidade de nossas vias somente a erros de projetos se está incorrendo em erro.

1.1 - História da Pavimentação no Mundo

O relato "História da Pavimentação no Mundo" foi extraído do livro "Pavimentação Asfáltica Formação Básica Para Engenheiros" encontrado no site:

www.ufjf.br/pavimentacao/files/2011/08/Pavimentação-Asfáltica-cap1.pdf

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança).

No Brasil, Bittencourt (1958) apresenta um apanhado desta história desde os primeiros povos organizados até o início do século XX. Destaca-se também o esforço de Prego (2001) de concluir a ação iniciada em 1994 pela ABPv, por meio de sua Comissão para Elaborar a Memória da Pavimentação, que nomeou inicialmente o Engenheiro Murillo Lopes de Souza para escrever sobre o tema.

Percorrer a história da pavimentação nos remete à própria história da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento.

Como os pavimentos, a história também é construída em camadas e, frequentemente, as estradas formam um caminho para examinar o passado, daí serem uma das primeiras buscas dos arqueólogos nas explorações de civilizações antigas.

- EGITO

- Uma das mais antigas estradas pavimentadas implantadas não se destinou a veículos com rodas, mas a pesados trenós destinados ao transporte de cargas elevadas. Para construção das pirâmides (2600-2400 AC), vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte. Atrito era amenizado com umedecimento constante (água, azeite, musgo molhado)

- ÁSIA

- ✓ Estrada de Semíramis (600a.C.) - entre as cidades da Babilônia (região da Mesopotâmia - em grego, região entre rios - que abrangia na antiguidade aproximadamente o que é hoje o território do Iraque) e Ecbatana (reino da Média, no planalto Iraniano); cruzava o Rio Tigre; transformou-se hoje em estrada asfaltada

- ✓ Estrada Real (500a.C.) - na Ásia Menor ligando iônia (Éfeso) do Império Grego ao centro do Império Persa, Susa; vias com até 2000 km de extensão
 - ✓ À época de Alexandre, o Grande (anos 300a.C.), havia a estrada de Susa até Persépolis (aproximadamente a 600km ao sul do que é hoje Teerã, capital do Irã), passando por um posto de pedágio, as Portas Persas, possibilitando o tráfego de veículos com rodas desde o nível do mar até 1.800m de altitude
-
- Velhos caminhos da China (200 A/C) e Índia
 - Destaque: Estrada da Seda, uma das rotas de comércio mais antigas e historicamente importantes devido a sua grande influência nas culturas da China, Índia, Ásia e também do Ocidente.
 - Localizada na região que separa a China da Europa e da Ásia, nas proximidades de um dos mais hostis ambientes do planeta, o Deserto de Taklimakan, cercado ao N pelo Deserto de Gobi e nos outros 3 extremos pelas maiores cadeias de montanha do mundo, Himalaya, Karakorum e Kunlun.
 - A Estrada da Seda não existia apenas com o propósito do comércio da seda, mas de diversos outros bens como ouro, marfim, animais e plantas exóticas. O bem mais significativo carregado nesta rota não era a seda, mas a religião, o budismo.
 - Apogeu da estrada foi na dinastia Tang (anos 600d.C.) e, após um período de declínio, voltou a se tornar importante com o surgimento do Império Mongol sob a liderança de Gêngis Khan (anos 1200d.C.), por ser o caminho de comunicação entre as diversas partes do Império.
 - Um dos visitantes mais conhecidos e melhor documentado na história da estrada foi Marco Pólo, negociante veneziano, que iniciou suas viagens com apenas 17 anos em 1271 (Bohong, 1989).
 - O declínio da estrada se deu ainda no século XIII com o crescimento do transporte marítimo na região. O interesse na rota ressurgiu no final do século XIX após expedições arqueológicas européias.
 - Embora seja reconhecida a existência remota de sistemas de estradas em diversas partes do globo, construídas para fins religiosos (peregrinações) e comerciais, ficou atribuída aos romanos a arte maior do planejamento e construção viária.
 - Visando, entre outros, objetivos militares de manutenção da ordem no vasto território do Império, que se inicia com Otaviano Augusto no ano 27a.C., deslocando tropas de centros estratégicos para as localidades mais longínquas, os romanos foram capazes de implantar um sistema robusto construído com elevado nível de critério técnico.
 - O sistema viário romano já existia anteriormente à instalação do Império, embora ele tenha experimentado grande desenvolvimento a partir de então.

- Portanto, há mais de 2000 anos os romanos já possuíam uma boa malha viária, contando ainda com um sistema de planejamento e manutenção. A mais extensa das estradas contínuas corria da Muralha de Antonino, na Escócia, à Jerusalém, cobrindo aproximadamente 5.000km (Hagen, 1955).
- A partir da queda do Império Romano (476d.C.), e durante os séculos seguintes, as novas nações européias fundadas perderam de vista a construção e a conservação das estradas.
- A França foi a primeira, desde os romanos, a reconhecer o efeito do transporte no comércio, dando importância à velocidade de viagem. Carlos Magno, no final dos anos 700 e início dos anos 800, modernizou a França, semelhantemente aos romanos, em diversas frentes: educacional, cultural e também no que diz respeito ao progresso do comércio por meio de boas estradas.
- Séculos X a XII de pouco cuidado com os Caminhos Reais da França; este descuido é uma das causas da decadência da Europa civilizada. Mudança significativa no reinado de Felipe Augusto (1180-1223), a partir do qual a França passa a ter novamente a preocupação de construir novas estradas e conservá-las.
- Os ingleses, observando a forma como eram calçados os caminhos da França, conseguiram construir as vias mais cômodas, duráveis e velozes da Europa, o que foi importante para o progresso da indústria e comércio do país.
- A partir da experiência na Inglaterra, Escócia e França, e de sua própria experiência nas províncias de Portugal, Mascarenhas Neto (1790) apresenta um *Tratado para Construção de Estradas*, numa preciosa referência para o meio rodoviário.
- Já à época havia uma grande preocupação com diversos aspectos hoje sabidamente importantes de considerar para uma boa pavimentação: drenagem e abaulamento; erosão; distância de transporte; compactação; sobrecarga; marcação.
- O autor discorre ainda sobre fundos específicos para construção e administração das estradas, reconhecendo a importância do pedágio em alguns casos.

- AMÉRICA
 - ✓ Império Inca (1400's), Peru (Equador, Argentina, Bolívia, Chile)
 - O alemão Alexander Von Humboldt, combinação de cientista e viajante que durante os anos de 1799 e 1804 realizou expedições científicas por várias partes da América do Sul, qualifica as estradas dos incas como "*os mais úteis e estupendos trabalhos realizados pelo homem*"
 - Sistema viário avançado (pedestres e animais de carga); 30 a 40.000km; definiram a rede peruana de estradas.

- A estrada do sol: Trechos de 1m até 16m de largura, presença de armazéns e refúgios espaçados ao longo da estrada, pontes, túneis, contenções, drenos, etc.

- ✓ Império Maia (300's AC), México - ligando centros, povoados e portos do mar; *sacbeob* - estradas brancas.

- 1560 - Caminho do Mar - ligação São Vicente - Piratininga ⇒ recuperada em 1661 como Estrada do Mar ⇒ em 1790 vira Calçada de Lorena
- 1792 - Estrada Santos - São Paulo: lajes de pedra
- 1726 - Caminho do Ouro - Minas ao Rio - Resquícios em Parati e várias outras cidades. Também chamada Estrada Real (Estrada Velha de Parati e Nova que vai para o Rio de Janeiro)
- 1854 - Primeira ferrovia no Brasil - Mauá a Raiz da Serra (RJ)
- 1865 - Estrada de rodagem *União e Indústria* (144km) ligando Petrópolis a Juiz de Fora (foto) - primeira estrada a usar macadame como base/revestimento no Brasil

⇒ Até aqui era usual o calçamento de ruas com pedras importadas de Portugal

- 1906 - Calçamento asfáltico em grande escala na cidade do Rio de Janeiro - CAN (Trinidad)- Prefeito Rodrigues Alves
- 1913 - Rodovia Santos - São Paulo
- 1922 - Estrada Rio - Petrópolis - Pavimento de concreto *Malha ferroviária brasileira: 3.000km*
- 1937 - Criação do DNER (atual DNIT)
- 1942 - Contato com engenheiros norte-americanos que construíram pistas de aeroportos e estradas de acesso durante a 2ª Guerra Mundial (Belém, Fortaleza, Natal, Recife, Maceió e Salvador) - CBR.
- 1942 - 1.300km de rodovias pavimentadas, uma das menores extensões da América Latina. 1945 - Rodovia Rio - Bahia
- 1950 - Pavimentação da Rodovia Rio - São Paulo (Dutra):
 - ✓ Sem estudo geotécnico, com espessuras constantes de 35cm (20cm de base de macadame hidráulico e 15cm de um revestimento de macadame betuminoso por penetração dosado pela regra "a quantidade de ligante é a que o agregado pede".
- Melhoria das estradas vicinais.
- 1959 - Criações da Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv)
- 1960 - Fim do Governo de Juscelino Kubistchek- criação de Brasília - Estradas radiais e Plano Nacional de Viação
Malha ferroviária totalizava 38.000km
- 1964 - Alguns projetos de pavimentação do Governo militar:
 - ✓ Transamazônica
 - ✓ Ponte Rio - Niterói.
- 1986 - 95.000km de rodovias pavimentadas: 45.000km federais e 50.000km estaduais e municipais

- 1988 - 140.000km de rodovias pavimentadas (maior extensão da América Latina) Malha ferroviária: 30.000km
- 1996 - *Inícios do programa de concessões*
- 2002 - 165.000km de rodovias pavimentadas 55.000km federais
- 1.600.000km de rodovias não pavimentadas (federais, estaduais e municipais)
- *Malha ferroviária: 29.000km*
- 2007 - 196.000km de rodovias pavimentadas com 55.000km federais
- 1.700.000km de rodovias não pavimentadas (federais, estaduais e municipais)
- *Malha ferroviária: 25.000km*
- Produção de Asfalto: 1.800.000t/ano

Condição precária em grande parte da malha federal, muitos acidentes geotécnicos, quedas de pontes, taludes, etc. Alguns estados têm ampliado sua malha e introduzido novas técnicas de pavimentação.

1.2 - Definição de Pavimento

Pavimento conforme definição do DNIT (2017) é: "Estrutura construída após a terraplenagem, destinada a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos, a melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e a resistir aos esforços horizontais tornando mais durável a superfície e rolamento".

Uma definição mais ampla: pavimento é uma **estrutura** constituída de **diversas camadas de diversos materiais** num **espaço semi-infinito** construída para **resistir as solicitações das cargas repetidas e itinerantes e ações do ambiente no horizonte temporal de projeto**.

Estrutura: arcabouço destinado a resistir, em função de seu esqueleto, a esforços externos e internos.

Diversas camadas: essa estrutura é constituída por diversas camadas de forma que todas devem estar intimamente unidas e, com a ação da carga do tráfego as tensões de tração/compressão tanto as verticais com horizontais estejam distribuídas de forma a não gerar acúmulo de tensões em uma única camada.

Diversos materiais: as camadas da estrutura do pavimento são constituídas por diferentes materiais, como: solo, brita, solo-cimento, BGT, mistura asfáltica, concreto etc.

Espaço semi-infinito: o espaço considerado até onde a ação da carga pode ser detectada. Toma-se como referência a profundidade de 1,5 m.

Resistir as solicitações das cargas: o pavimento deve ser dimensionado de forma a resistir a ação das cargas dos veículos. Os veículos aqui considerados são caminhões, reboques, semirreboques e ônibus. Os veículos de passeios (automóveis, vans e pick-ups) não possuem cargas significativas para serem consideradas no dimensionamento dos pavimentos.

Cargas repetidas e itinerantes: cargas cíclicas e que pode não ocorrer no mesmo local, embora, os pavimentos possuam tráfego canalizado.

Ações do ambiente: o pavimento ocorre ao longo de extensões significativas, atravessando regiões com climas e relevo distintos, principalmente em um país como o Brasil que possui dimensões continentais. Dai, a necessidade da compreensão do clima, do relevo e também da eventual mudança no tipo de tráfego e a consideração dessas variáveis no projeto do pavimento.

Horizonte temporal de projeto: o projeto deve ser realizado considerando uma vida útil de serviço do pavimento superior o mais longo possível.

O que é um bom pavimento? - Um bom pavimento deve, necessariamente, apresentar três requisitos básicos:

- a. *Conforto ao usuário* - possuir superfície que propicie uma rolagem suave, sem vibrações, ausência de solavancos e também de forma a causar o menor ruído possível para o motorista e para as propriedades lindeiras à via.
- b. *Segurança ao usuário*¹ - o pavimento deve ser concebido com um traçado condizente com a velocidade diretriz e ter uma rugosidade superficial e inclinação transversal de forma a permitir rapidamente o escoamento da água da chuva propiciando uma melhor aderência pneu/pavimento.
- c. *Econômico* - apresentar uma solução técnica de projeto e execução que conduza ao menor custo para a implantação da obra.

Observe-se que os três parâmetros acima são desafios impostos aos técnicos rodoviários, que trabalham em projetos ou atuam diretamente em obras como executores ou em controle tecnológico e também aos órgãos administradores como os DERs e as Concessionárias.

1.3 - Classificações de Pavimentos

¹ Registra-se que para o usuário a segurança se confunde com conforto, já para os técnicos rodoviários, segurança e conforto são parâmetros distintos.

Os pavimentos podem ser classificados em três grupos distintos: pavimento flexível, pavimento rígido e pavimento semirrígido. Observe-se que essa classificação relaciona-se a estrutura do pavimento e não a sua funcionalidade.

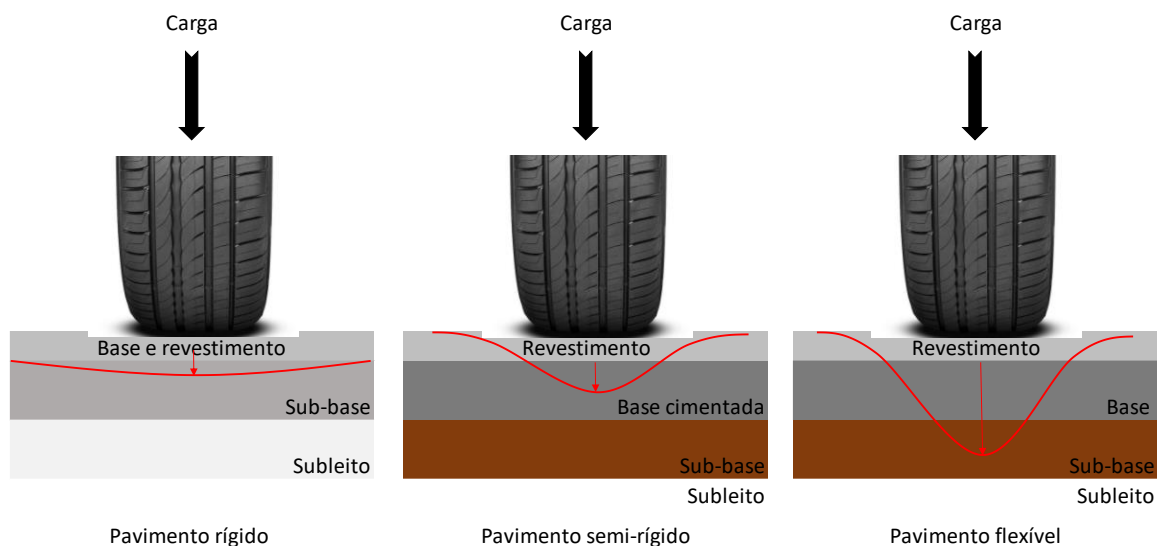
A definição de pavimento flexível segundo o DNIT (2017) é: "Pavimento que consiste em uma camada de rolamento asfáltica e de base, constituída de uma ou mais camadas, que se apoia sobre o leito da estrada sendo que a camada de rolamento pode-se adaptar-se à deformação da base quando solicitada."

Para pavimento rígido o mesmo órgão define como: "Pavimento cujo revestimento é constituído de concreto de cimento."

Temo ainda o pavimento semirrígido cuja definição dada pelo DNIT (2017) é: "Pavimento que tem uma deformabilidade maior que o rígido e menor que o flexível constituído de uma base semiflexível (solo-cal, solo-cimento, solo alcatroado, etc.) e de camada superficial flexível (concreto asfáltico, tratamento superficial betuminoso)."

Estão apresentadas na Figura 1 as características estruturais, a forma como as tensões atuam e os respectivos deslocamentos nos pavimentos rígidos, semirrígidos e flexíveis.

Figura 1 - Distribuição das tensões nos pavimentos: rígido, semirrígidos e flexível



Fonte: própria

Enquanto uma dada carga atuante sobre um pavimento flexível impõe nessa estrutura um campo de tensões muito concentrado, nas proximidades do ponto de aplicação dessa carga, em um pavimento rígido, verifica-se um campo de tensões bem mais disperso, com os efeitos da carga distribuídos de maneira semelhante em toda a dimensão da placa. Para pavimentos que possuem uma camada cimentante, denominados de semirrígidos, as tensões e, por conseguinte, os deslocamentos se apresentam intermediários às encontrados nas outras estruturas. Figura 01.

Alguns autores não fazem uso do termo semirrígido para classificar pavimentos com presença de base cimentada, apresentam unicamente duas classes: rígidos e flexíveis.

Observe-se que os conceitos acima expostos para os tipos de pavimentos estão associados aos tipos de materiais empregados. Yoder & Witczak (1975) não fazem uso das terminologias de pavimento rígido e/ou pavimento flexível, mas como os esforços sobre si aplicados são distribuídos no solo da fundação (subleito).

Sem grandes intenções, uma das importâncias de uma correta classificação de pavimentos nos auxilia na correta identificação dos possíveis defeitos futuros quando o pavimento estiver em vida de serviço.

Por exemplo, um pavimento denominado de semirrígido, quando apresenta problemas de trincas por fadiga na camada de rolamento nos induz a associar o problema a base cimentada, pois os deslocamentos esperados para esse tipo de pavimento são de pequenas amplitudes, uma vez a base trincada ela apresenta-se em blocos, conforme a solicitação através da carga dos veículos esses blocos se movem e transferem à camada de rolamento deslocamentos que acabam propiciando o aparecimento de trincas. Ocorre que se a mistura asfáltica se apresenta com problemas de usinagem, como massa queimada ou mesmo baixo teor de ligante asfáltico, certamente trincas aparecerão e o problema não está associado a problemas com a base.

Outro tipo de não conformidade que pode ocorrer em classificar os pavimentos conforme o material empregado é, por exemplo: um pavimento com camada de rolamento, base e sub-base de material asfáltico conhecido como "*full depth asphalt pavement*" foi um tipo de pavimento bastante empregado nos EUA e no Brasil nas décadas de 70 e 80, hoje muito empregado na França.

Com base na classificação do DNIT trata-se de um pavimento flexível, entretanto, devido às características visco-elásticas do material empregado, ligante asfáltico, juntamente com a baixa temperatura de serviço, a viscosidade do ligante asfáltico aumenta significativamente, fazendo com que o módulo de resiliência desse material aumente em até dez vezes. Nessas condições, esse tipo de pavimento apresenta comportamento de características mais próximas de um pavimento rígido que propriamente dito como pavimento flexível.

Bibliografia

Yoder E.J & Witczak M.W. *Principles of Pavement Design* 2nd, (1975)

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, *Glossário de Termos Técnicos Rodoviários*, 2017

2.1 – Introdução

Estrutura de pavimentos são dimensionadas, basicamente, em função de dois *inputs*: CBR do subleito e o número N compatível com o período de projeto se, para pavimentos de características flexíveis ou semirrígidos 10 anos, se pavimento em concreto 20 anos. Como será visto adiante o número N refere-se ao número de vezes que um eixo simples de rodagem dupla (ESRD) de 8,2 t irá solicitar o pavimento durante o período de projeto. O fator de equivalência de carga (FEC) exerce papel fundamental na sua determinação, pois com esse fator é possível converter cargas superiores em cargas análogos ao eixo de 8,2 t, de forma que, o dano causado à estrutura do pavimento seja equivalentes. Assim, cargas atuantes no pavimento não contempladas na composição do número N, inevitavelmente, causaram danos que levará a estrutura a ruína precocemente. De forma análoga, se cargas não consideradas na formulação do número N solicitarem o pavimento, o período de projeto, certamente, diminuirá.

Assim, foi necessário a disciplinação de cargas por eixo, que primeiramente, foi introduzida pelo Estado de São Paulo, em 1960, que publicou a lei sobre o peso bruto dos veículos. Em 1961, o governo Federal baixou um decreto federal no 50.903/61, que tratava exclusivamente dos limites de cargas por eixo, vindo com ela a "lei da balança". Não se previu, no entanto, qualquer multa ou punição para os infratores. Somente em 1968 o Decreto federal foi incorporado pelo Decreto no 62.127/68, que regulamentou a Lei no 5.108/66, que modificava o Código Nacional de Trânsito (Contran). Os limites de pesos por eixo eram de 5 t no eixo dianteiro, 10 t por eixo isolado, 8,5 t por eixo em tandem e 40 t de peso bruto total. A Lei no 7.408/85 introduziu tolerância de 5% no peso por eixo e no peso bruto total na pesagem dos veículos de carga. O decreto nº 98.933 de 1990 autorizou o limite de carga do eixo dianteiro de 5 para 6 t.

Em 1998, devido às pressões dos caminhoneiros e transportadores, o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) foram modificados por meio de Resolução n. 104 do Contran que manteve a tolerância de 5% no peso bruto total (PBT) ou peso bruto total combinado (PBTC), mas aumentou de 5% para 7,5% a tolerância por eixo e extinguiu a multa por excesso nos eixos. Se há excesso por eixo, mas o PBT ou PBTC está dentro da tolerância, é permitido remanejar ou transbordar a carga, para sanar a irregularidade. Se houver excesso no PBT ou PBTC, este excesso será multado e transbordado antes que o veículo prossiga viagem.

Embora exista a lei da balança, resolução 258/07 (em substituição da lei no 7408/85) do Contran, que limitava a carga por eixo, o avanço tecnológico da indústria automobilística, produzindo caminhões capazes de transportar cargas mais pesadas, impele os órgãos regulamentadores a abrirem concessões, como as alterações de configurações de eixos permitidas. A Resolução 184, de 2005, autoriza alguns caminhões a circularem com PBTC de 48,5 toneladas, ao invés do limite de 1998 de 45,0 toneladas, e de algumas configurações, que também seguiam o mesmo limite de 45,0 toneladas, estarem

autorizadas a circular com 57 toneladas - eixo triplo com rodagens duplas (12 pneus) com eixos distanciados, totalizando nesta combinação, outrora tandem triplo, a circular com 30 toneladas (3x10 toneladas).

Recentemente, através da Lei 13.103/2015 - denominada de Lei do Motorista que além da alteração da legislação sobre o descanso do motorista, contempla ainda algumas alterações que amenizam a legislação dos pesos e dimensões.

O mais importante deles é o artigo 16, que alterou a lei no 7.408/85, mantendo a tolerância para verificação por meio de balança em 5% no peso bruto total (PBT), mas elevando para 10% a tolerância por eixo.

Com a edição da lei no 13.103/2015, desaparece a tolerância intermediária de 7,5% resolução n. 104 do Contran (1998). A tolerância na pesagem por eixo passa a ser de 10%, independentemente de o peso bruto total estar ou não dentro dos limites legais. Isso torna a legislação um pouco mais benevolente.

Em 2021 entra em vigor a Lei nº 14.229 de 21 de outubro de 2021 que estabelece o percentual de tolerância por eixo de 12,5%.

O número de tolerâncias fica reduzido para três:

- 12,5% para efeito de transbordo ou remanejamento da carga;
- 5% para efeito de verificação do peso bruto total (PBT), Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e Capacidade Máxima de Tração (CMT);

Com o avanço tecnológico acentuado que vem ocorrendo na indústria automobilística, estão produzindo veículos mais econômicos, mais seguros e mais velozes, não só na linha de veículos leves, mas também nos veículos pesados. Um segmento de destaque nesse avanço tecnológico da indústria automobilística diz respeito às indústrias fabricantes de pneus. Os pneus extralargos (**Figura 2**) vêm se popularizando nos últimos anos pelas vantagens econômicas que proporciona, e seu uso está regulamentado pela resolução Nº 62/98 do CONTRAN. Cabe lembrar, no entanto, que no artigo 1º dessa resolução, regulamenta o uso do pneu do tipo 385/65 R 22.5 em semirreboques e reboques dotados de suspensão pneumática com eixos em tipo tandem não tracionados (**Figura 3**).

Figura 2 – Pneu comum de rodagem dupla e de rodagem singela com extralargo



Figura 3 – Vista do eixo traseiro com rodagem singela com pneus extralargos



A somatória de reduzida malha rodoviária pavimentada do Brasil, com mais de 50% em condições precárias, aumentos de carga transportada por veículo, e ainda o aumento do volume de cargas transportadas pelo modo rodoviário nos últimos anos, impõe ao técnico rodoviário o desafio de melhorar as características dos pavimentos rodoviários, tanto em condições funcionais como principalmente em características estruturais do pavimento. As melhorias funcionais dizem respeito à economia no transporte e à segurança dos usuários; as melhorias estruturais dizem respeito à redução de custos de manutenção pelos órgãos responsáveis pela via, seja público ou privado. A falta de previsibilidade da periodicidade das manutenções também leva a custos adicionais operacionais, de logística de obras, de interdições e de desgaste de imagem dos órgãos responsáveis pela manutenção.

O texto a seguir foi extraído do Manual de Estudo de Tráfego do DNIT 2006 - publicação do IPR 723

2.2 - Veículo Representativo

Há diversos aspectos a serem considerados no que diz respeito aos veículos que trafegam nas rodovias, dependendo da natureza dos estudos em análise e de sua finalidade. No que se refere as principais características consideradas para a determinação do número N são, a carga máxima transportada e a configuração dos eixos.

2.2.1 - Legislação Relativa Às Dimensões e Pesos dos Veículos

Neste item serão apresentadas informações relativas a pesos e dimensões de veículos utilizados com mais frequência nos estudos de tráfego. Maiores detalhes constam do manual Quadro de Fabricantes de Veículos, elaborado pelo DNIT e disponibilizado em seu site na internet. Desse manual foram extraídas outras informações consideradas adequadas para inclusão em vários itens do presente trabalho.

2.2.2 – Resolução N.º 12, de 06/02/98

O Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN, usando da competência que lhe confere o inciso I, do art. 12, da Lei 9.503, de 23 de setembro de 1997, que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro - CTB, estabeleceu, limites de dimensões e peso para veículos em trânsito livre. Transcreve-se a seguir o que se considerou de interesse para a elaboração de estudos de tráfego.

Art. 1º. As dimensões autorizadas para veículos, com ou sem carga, são as seguintes:

I - largura máxima: 2,60m;

II - altura máxima: 4,40m;

III - comprimento total:

a) veículos simples: 14,00m;

b) veículos articulados: 18,15m;

c) veículos com reboques: 19,80m.

Os limites para o comprimento do balanço traseiro de veículos de transporte de passageiros e de cargas são os seguintes:

I - nos veículos simples de transporte de carga, até 60% (sessenta por cento) da distância entre os dois eixos, não podendo exceder a 3,50m (três metros e cinquenta centímetros);

II - nos veículos simples de transporte de passageiros:

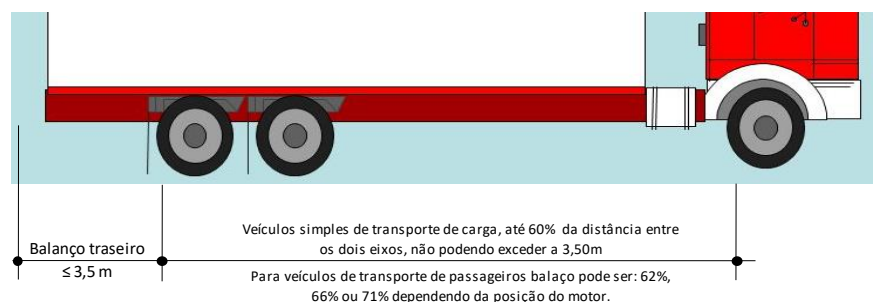
a) com motor traseiro: até 62% (sessenta e dois por cento) da distância entre eixos;

b) com motor central: até 66% (sessenta e seis por cento) da distância entre eixos;

c) com motor dianteiro: até 71% (setenta e um por cento) da distância entre eixos.

A distância entre eixos, prevista no parágrafo anterior, será medida de centro a centro das rodas dos eixos dos extremos do veículo conforme é apresentado na **Figura 4**.

Figura 4 – Balanço traseiro e entre eixos



Os limites máximos de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículo, nas superfícies das vias públicas, são os seguintes:

- I - peso bruto total por unidade ou combinações de veículos: 45 t;
- II - peso bruto por eixo isolado: 10 t;
- III - peso bruto por conjunto de dois eixos em tandem, quando a distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas for superior a 1,20 m e inferior ou igual a 2,40m: 17 t;
- IV - peso bruto por conjunto de dois eixos não em tandem, quando a distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40 m: 15 t;
- V - peso bruto por conjunto de três eixos em tandem, aplicável somente a semi-reboque, quando a distância entre os três planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20m e inferior ou igual a 2,40 m: 25 t;
- VI - peso bruto por conjunto de dois eixos, sendo um dotado de quatro pneumáticos e outro de dois pneumáticos interligados por suspensão especial, quando a distância entre os dois planos verticais que contenham os centros das rodas for:
 - a) inferior ou igual a 1,20m: 9 t;
 - b) superior a 1,20 m e inferior ou igual a 2,40m: 13,5 t.

Considerar-se-ão eixos em tandem dois ou mais eixos que constituam um conjunto integral de suspensão, podendo quaisquer deles ser ou não motriz.

Quando, em um conjunto de dois eixos, a distância entre os dois planos verticais paralelos, que contenham os centros das rodas, for superior a 2,40 m, cada eixo será considerado como se fosse isolado.

Em qualquer par de eixos ou conjunto de três eixos em tandem, com quatro pneumáticos em cada, com os respectivos limites legais de 17 t e 25,5 t, a diferença de peso bruto total entre os eixos mais próximos não deverá exceder a 1.700 kg.

As configurações de eixos duplos com distância dos dois planos verticais, que contenham os centros das rodas, inferior a 1,20m, serão regulamentadas por este Conselho, especificando os tipos de planos e peso por eixo, após ouvir o órgão rodoviário específico do Ministério dos Transportes.

Os limites máximos de peso bruto por eixo e por conjunto de eixos, estabelecidos no artigo anterior, só prevalecem:

- I - se todos os eixos forem dotados de, no mínimo, quatro pneumáticos cada um;

II - se todos os pneumáticos, de um mesmo conjunto de eixos, forem da mesma rodagem e calçarem rodas no mesmo diâmetro.

Nos eixos isolados, dotados de dois pneumáticos, o limite máximo de peso bruto por eixo será de seis toneladas, observada a capacidade e os limites de peso indicados pelo fabricante dos pneumáticos.

No conjunto de dois eixos, dotados de dois pneumáticos cada, desde que direcionais, o limite máximo de peso será de doze toneladas.

2.2.3 - Circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVC)

De um modo geral, veículos com mais de duas unidades, incluída a unidade tratora, exigem autorização especial para trafegar. O comprimento máximo dos rodotrens e treminhões está limitado pelas autoridades de trânsito a 30 m. A Resolução nº 68, de 23 de setembro de 1998, e alterações introduzidas pelas Resoluções 76/98 e 164/04 estabelecem as normas regulamentares para circulação desses veículos. Transcreve-se a seguir o que se considerou de interesse para a elaboração de estudos de tráfego.

As combinações de Veículos de Carga - CVC com mais de duas unidades, incluídas a unidade tratora, só deverão circular portando Autorização Especial de Trânsito - AET.

Ficam dispensadas da AET as Combinações de Veículos de Carga -CVC, com Peso Bruto Total Combinado - PBTC, superior a 45 toneladas e até 57 toneladas, desde que atendam aos seguintes requisitos:

- I. máximo de 7 (sete) eixos;
 - II. comprimento máximo de 19,80 metros e mínimo de 17,50 metros;
 - III. unidade tratora do tipo cavalo mecânico;
 - IV. acoplamento com pino rei e quinta roda.
- (Alteração introduzida pela Resolução 164/04).

Para concessão de Autorização Especial de Trânsito - AET, o Órgão Executivo Rodoviário da União, dos Estados, dos Municípios ou do Distrito Federal, deverá observar os seguintes requisitos mínimos:

- I - a Combinação de Veículos de Carga - CVC não poderá possuir Peso Bruto Total Combinado - PBTC superior a 74 toneladas e seu comprimento não poderá ultrapassar a 30 metros, respeitados os tipos de Combinações previstos no Anexo I;
- II - os limites legais de Peso por Eixo previstos no Decreto 2.069/96 e na Resolução n.º 12/98 - CONTRAN;

Nas Combinações com Peso Bruto Total Combinado - PBTC de no máximo 57 t, o cavalo mecânico poderá ser de tração simples e equipado com 3º eixo, respeitados os outros limites previstos no § 1º e, a Autorização Especial de Trânsito - AET expedida pelos Órgãos Executivos Rodoviários terá validade em todas as vias de suas respectivas circunscrições. (Alteração introduzida pela Resolução 76/98).

A critério do Órgão Executivo Rodoviário responsável pela concessão da Autorização Especial de Trânsito - AET, nas vias de duplo sentido de direção, poderá ser exigida a existência de faixa adicional para veículos lentos nos segmentos em rampa com aclive e comprimentos superiores a 5% e 500 m, respectivamente.

O trânsito de Combinações de Veículos de que trata esta Resolução será do amanhecer ao pôr do sol e sua velocidade máxima de 80 km/h.

Para Combinações cujo comprimento seja de no máximo 19,80 m, o trânsito será diuturno.

Nas vias com pista dupla e duplo sentido de circulação, dotadas de separadores físicos e que possuam duas ou mais faixas de circulação no mesmo sentido, poderá ser autorizado o trânsito noturno das Combinações que excedam o comprimento previsto no parágrafo anterior.

Em casos especiais, devidamente justificados, poderá ser autorizado o trânsito noturno de comprimento das Combinações que excedam 19,80 m, nas vias de pista simples com duplo sentido de circulação, observados os seguintes requisitos:

- I - volume de tráfego no horário noturno de no máximo 2.500 veículos;
- II - traçado de vias e suas condições de segurança, especialmente no que se refere à ultrapassagem dos demais veículos;
- III - distância a ser percorrida;
- IV - colocação de placas de sinalização em todo o trecho da via, advertindo os usuários sobre a presença de veículos longos;

2.2.4 - Resoluções Relativas a Cargas Excepcionais

O transporte de cargas excepcionais e o trânsito de veículos especiais devem atender além do disposto no Código de Trânsito Brasileiro, às Instruções para o Transporte de Cargas Indivisíveis e Excedentes em Peso e/ou Dimensões e para o Trânsito de Veículos Especiais constantes da Resolução 2264/81 do Conselho de Administração do DNIT na sessão 40 de 07/12/1981 e alterada pela Resolução 2471/89, sessão 39 de 08/12/1989.

Nestas Instruções são apresentadas no Art. 4 as definições de carga indivisível e veículos especiais, bem como outras necessárias, as quais deverão ser observadas quando da aplicação dos limites de peso por eixo para veículos trafegando com Autorização Especial de Trânsito - AET.

- I - Carga Indivisível: a carga unitária, representada por uma única peça estrutural ou por um conjunto de peças fixadas por rebiteagem, solda ou outro processo, para fins de utilização direta como peça acabada ou, ainda, como parte integrante de conjuntos estruturais de montagem ou de máquinas ou equipamentos, e que pela sua complexidade, só possa ser montada em instalações apropriadas;
- II - Conjunto: a composição de veículo transportador mais carga;
- III - Combinação de Veículos: a composição de 1 (um) ou 2 (dois) veículos tratores, com semirreboque (s) e/ou reboque (s);
- IV - Veículo Especial: aquele construído com características especiais e destinado ao transporte de carga indivisível e excedente em peso e/ou dimensão, incluindo-se entre esses os semirreboques dotados de mais de 3 (três) eixos com suspensão mecânica, assim como aquele dotado de equipamentos para a prestação de serviços especializados, que se configurem como carga permanente;
- V - Comboio: o grupo constituído de 2 (dois) ou mais veículos transportadores, independentes, realizando transporte simultâneo e no mesmo sentido, separados entre si por distância mínima de 30 m (trinta metros) e máxima de 100 m (cem metros);

Embora estudos específicos de tráfego tenham que considerar a realidade do país, em eventuais recomendações a serem feitas deverão sempre ser levado em conta as limitações legais apresentadas.

Cabe observar ainda, que a lei 7.408/85 determinou que fosse atribuída uma tolerância de 5% ao limite de 45.000 kg para o PBT, passando o limite para a autuação para 47.250 kg.

Através da Resolução n.º 104 de 21/12/99, o CONTRAN alterou a tolerância para o excesso de peso por eixo de 5% para 7,5%. As Figuras 5 a 16 a seguir, são ilustradas, através de desenhos, os limites de dimensões e pesos dos veículos estabelecidos pela legislação.

Figura 5 - Dimensões e pesos de veículos até 45 t

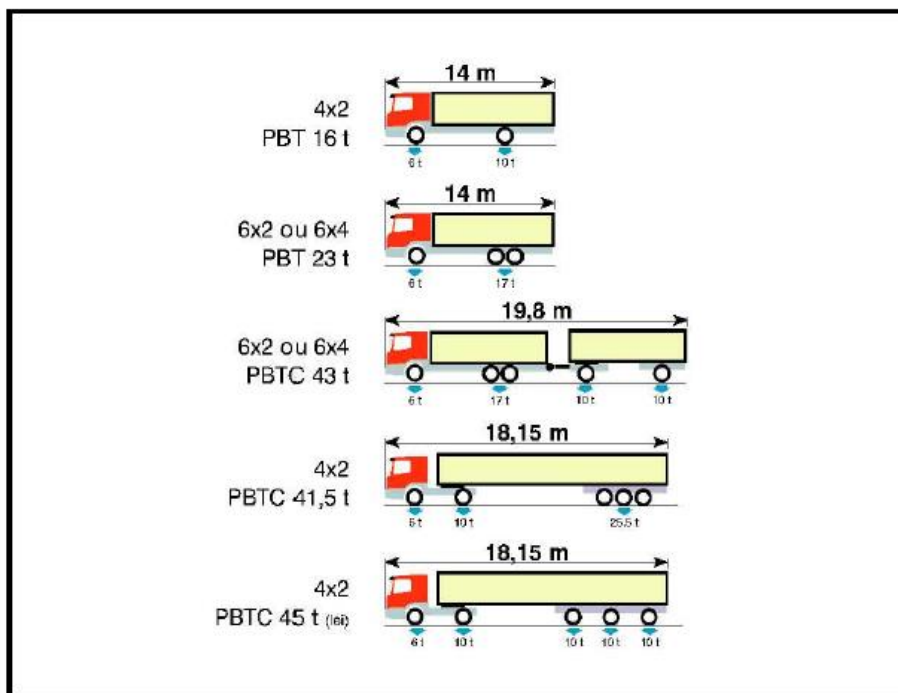


Figura 6 - Dimensões e pesos de veículos até 74 t

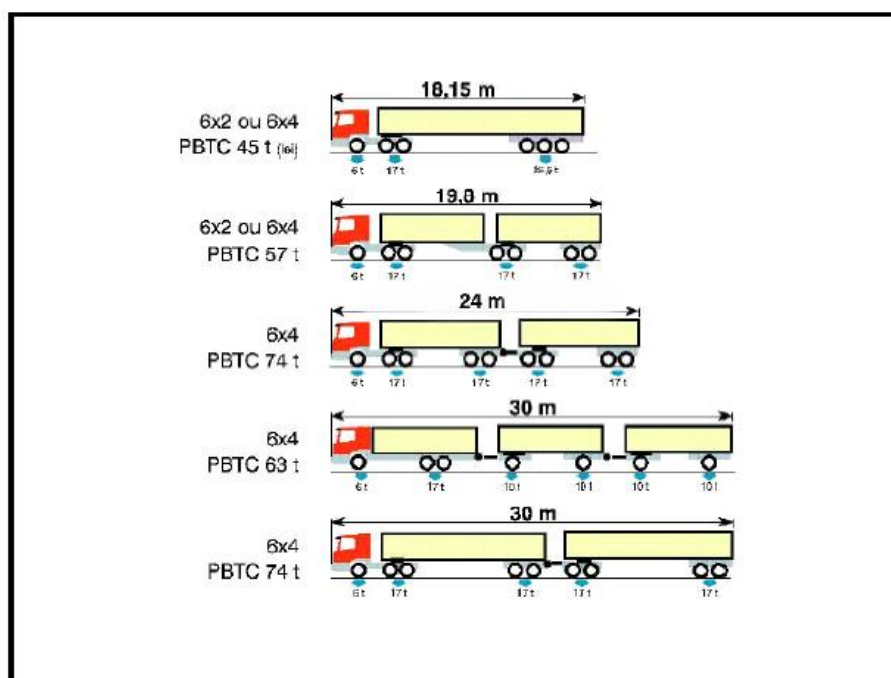


Figura 7 - Configurações de eixos

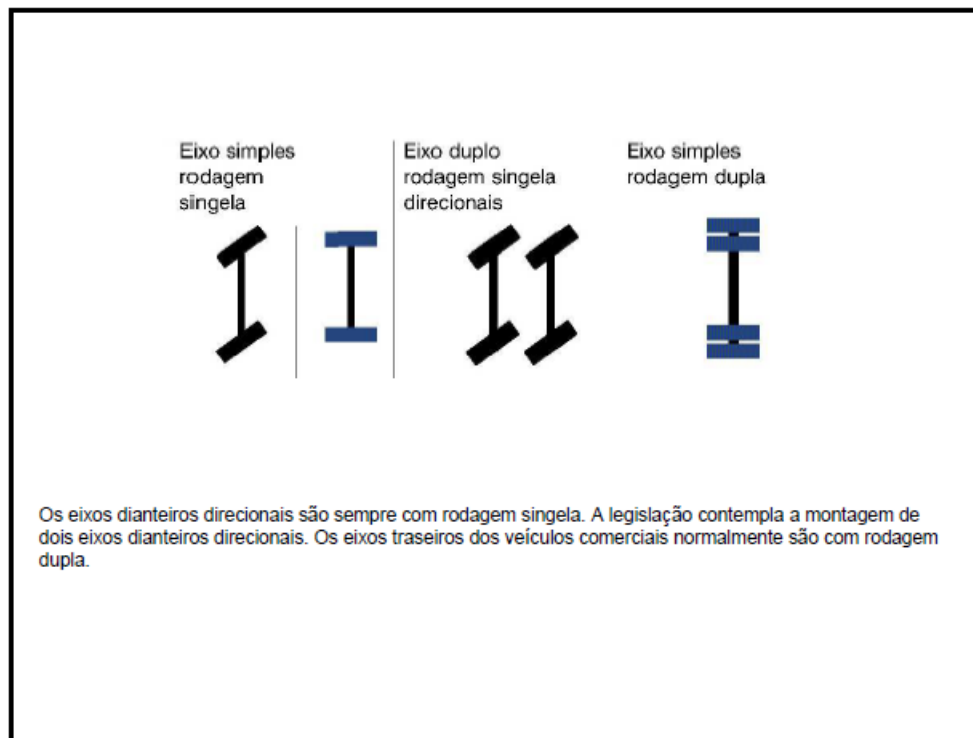


Figura 8 - Configurações das suspensões

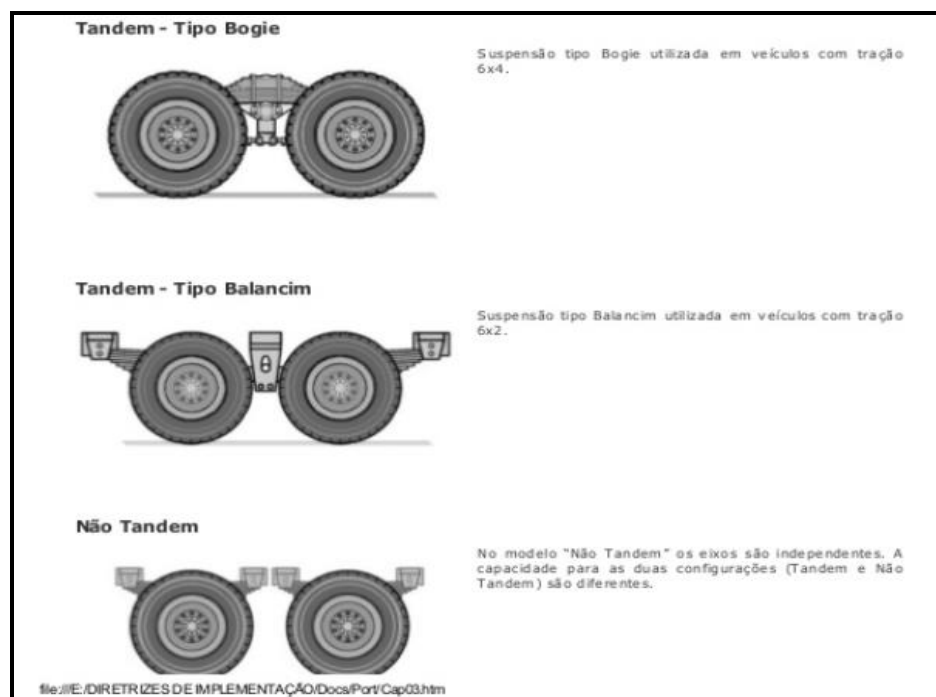


Figura 9 - Configurações dos eixos de semirreboques

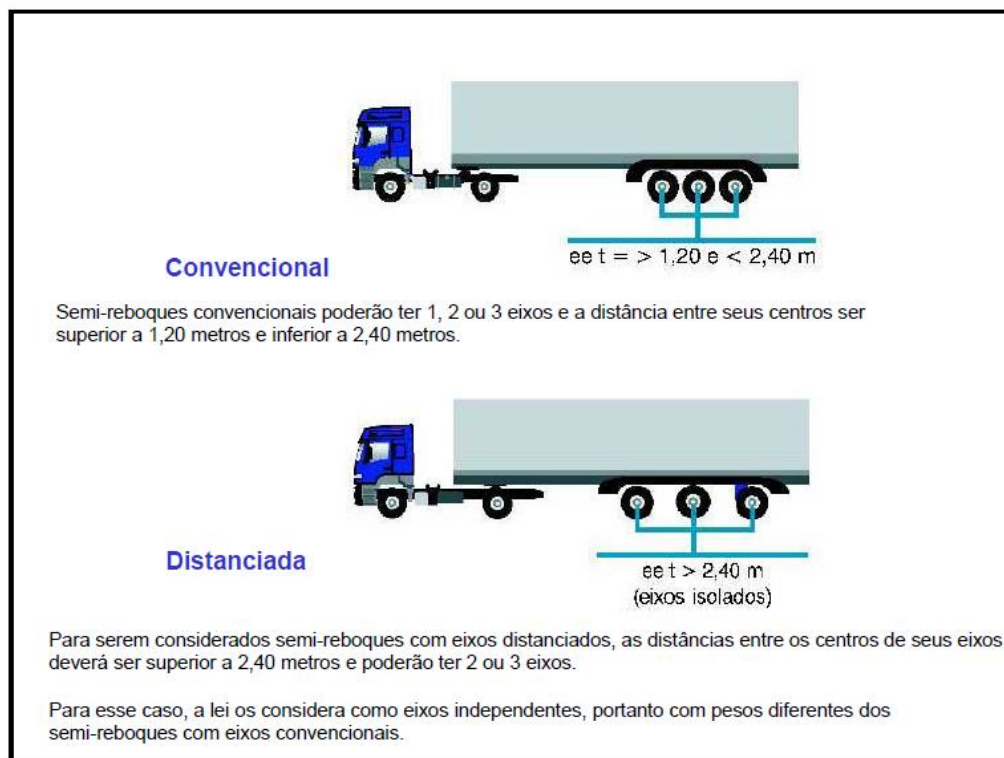


Figura 10 - Capacidade legal, veículos com 2 eixos

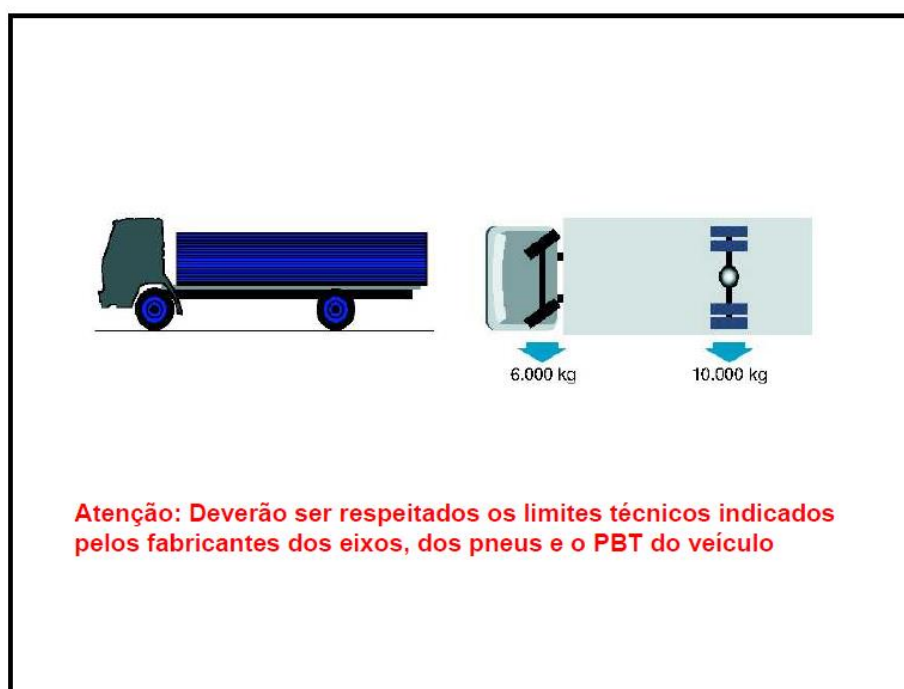


Figura 11 - Capacidade legal, veículos com 3 eixos

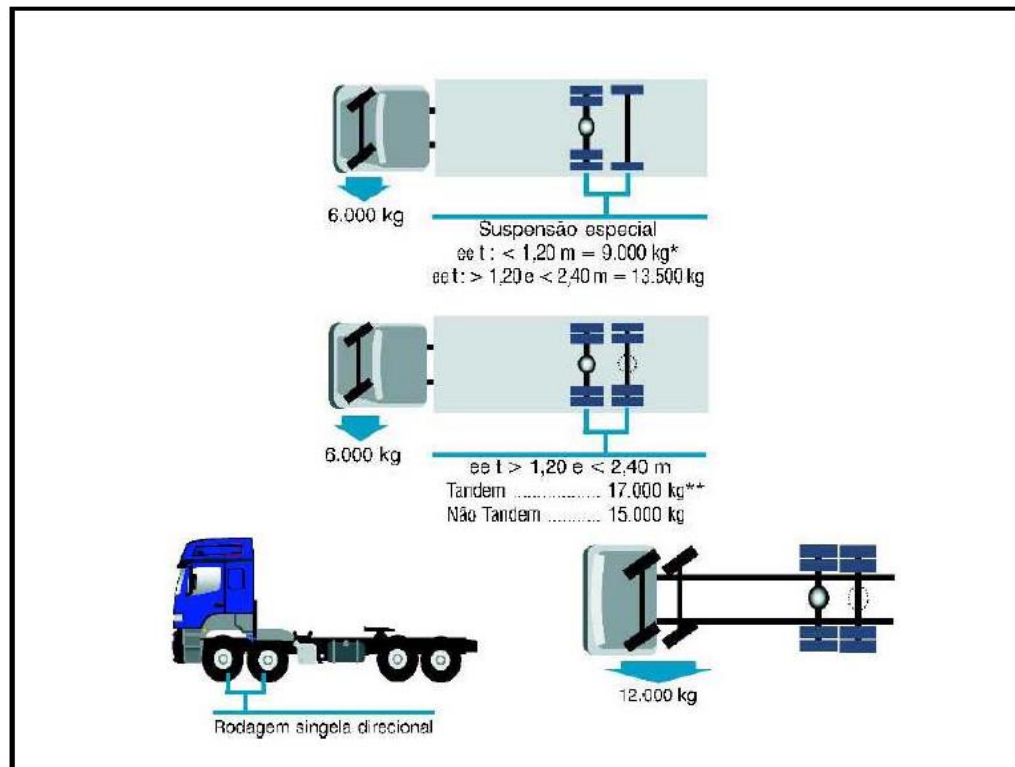


Figura 12 - Capacidade legal, veículos com 4 eixos

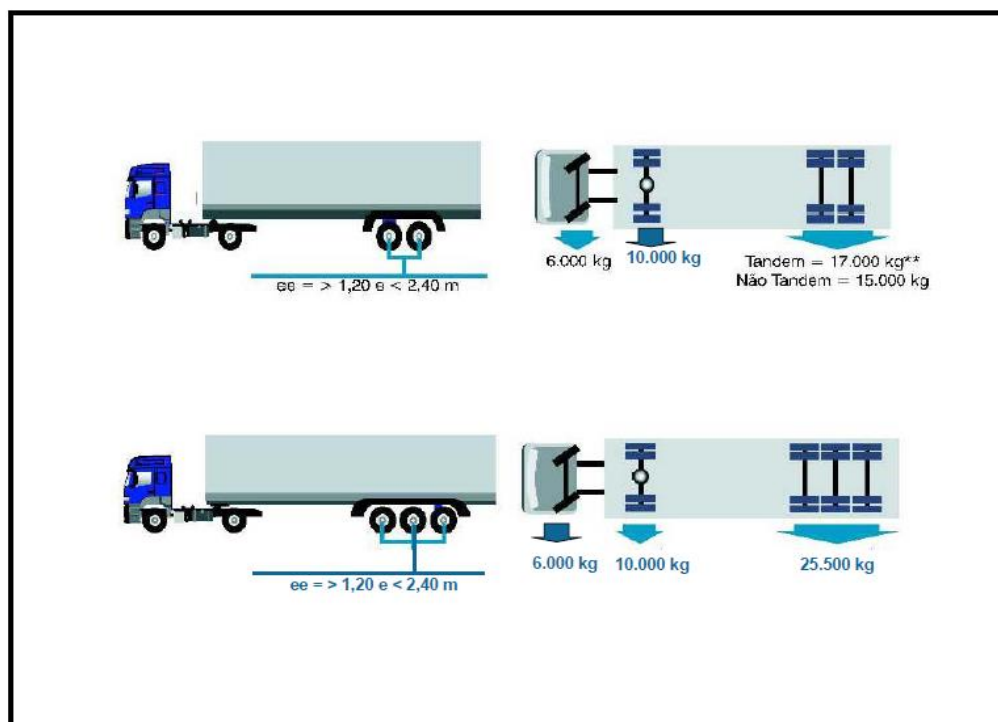


Figura 13 - Capacidade legal, veículos com 4 eixos

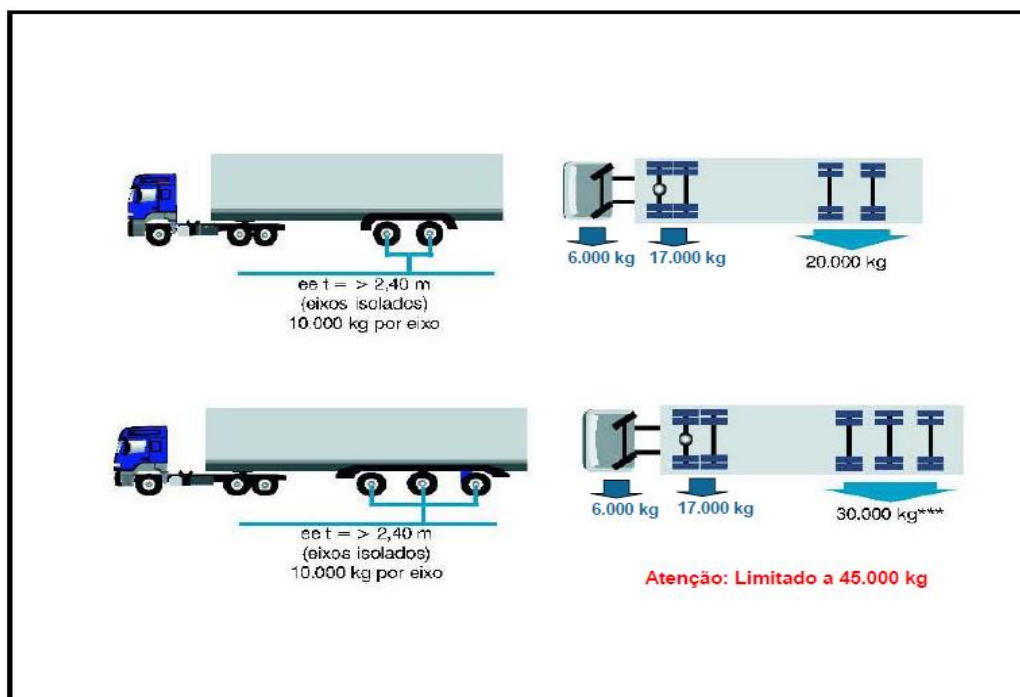


Figura 14 - Capacidade legal (resumo)

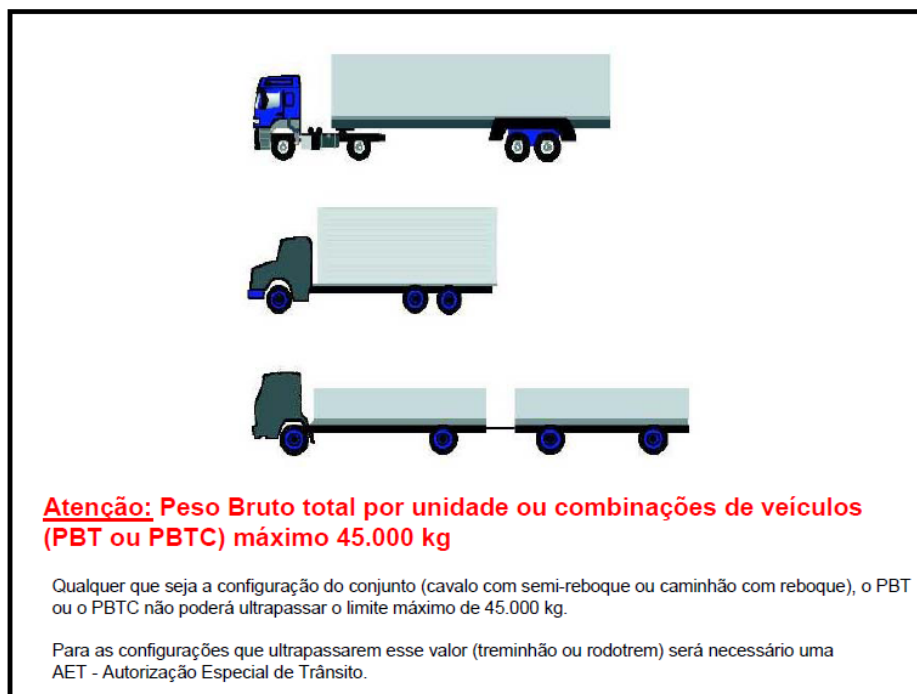


Figura 15 - Dimensões (Resumo)

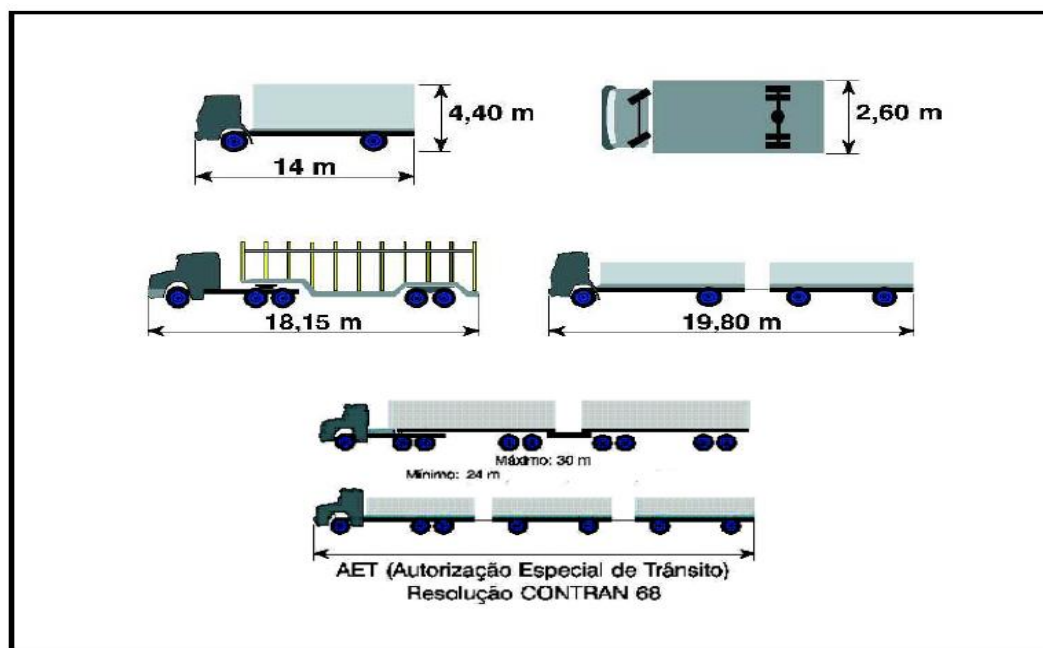


Figura 16 - Carga máxima (Resumo)



Configuração	Distância entre eixos (ee)	Qtde. de Eixos	Qtde. de Pneus	Suspensão	Carga máxima autorizada
		1	2		6
		1	4		10
		2	4		12
	Menor que 1,20m	2	6	Especial	9
	De 1,20 a 2,40m	2	6	Especial	13,5
	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	2	8	Tandem	17
				Não Tandem	15
	Maior que 1,20 e menor que 2,40 m	3	12	Tandem	25,5
	Maior que 2,40 m	2	8		20
	Maior que 2,40 m	3	12		30

2.3 - VEÍCULOS DE PROJETO

Para fins de uma dada exigência de projeto para finalidades viárias é necessário examinar todos os tipos de veículos em circulação, selecionando-os em classes e estabelecendo a representatividade dos veículos dentro de cada classe em função do objeto de projeto. A grande variedade de veículos existentes conduz à escolha, para fins práticos, de tipos representativos que, por exemplo, em dimensões e limitações de manobra, excedam a maioria dos de sua classe. A estes veículos é dada a designação de veículos de projeto, os quais são definidos como veículos cujo peso, dimensões e características de operação servirão de base para estabelecer os controles do projeto de rodovias e suas interseções.

O Manual de Projeto de Interseções, DNIT, 2005, classifica os veículos usuais em cinco categorias, a serem adotadas em cada caso conforme as características predominantes do tráfego:

VP - Representa os veículos leves (veículos de passeio), física e operacionalmente assimiláveis ao automóvel, incluindo minivans, vans, utilitários, pick-ups e similares.

CO - Representa os veículos comerciais rígidos, não articulados (**Figura 17**). Abrangem os caminhões e ônibus convencionais, normalmente de dois eixos e quatro a seis rodas.

O - Representa os veículos comerciais rígidos de maiores dimensões (**Figura 18**). Entre estes incluem-se os ônibus urbanos longos, ônibus de longo percurso e de turismo, bem como caminhões longos, frequentemente com três eixos (tracção), de maiores dimensões que o veículo CO básico. Seu comprimento aproxima-se do limite máximo legal admissível para veículos rígidos.

Figura 17 – CO veículos comerciais rígidos, não articulados.



Figura 18 – O - veículos comerciais rígidos de maiores dimensões não articulados



SR - Representa os veículos comerciais articulados, compostos de uma unidade tratora simples (cavalo mecânico) e um semirreboque (**Figura 19**). Seu comprimento aproxima-se do limite máximo legal para veículos dessa categoria.

RE - Representa os veículos comerciais com reboque. É composto de uma unidade tratora simples, um semirreboque e um reboque (**Figura 20**), frequentemente conhecido como bitrem. Seu comprimento é o máximo permitido pela legislação.

Figura 19 – SR - veículos comerciais articulados, compostos de uma unidade tratora simples (cavalo mecânico) e um semirreboque



Figura 20 – RE - veículos comerciais com reboque, composto de uma unidade tratora simples, um semirreboque e um reboque



Na Tabela 1 são resumidas as principais dimensões básicas dos veículos de projeto recomendados para utilização nos projetos de rodovias brasileiras, interseções e instalações correlatas.

Tabela 1 - Principais dimensões básicas dos veículos de projeto

Designação do veículo tipo Características	Veículos leves (VP)	Caminhões e ônibus convencionais (CO)	Caminhões e ônibus longos (O)	Semi-reboques (SR)	Reboques (RE)
Largura total	2,1	2,6	2,6	2,6	2,6
Comprimento total	5,8	9,1	12,2	16,8	19,8
Raio min. da roda externa dianteira	7,3	12,8	12,8	13,7	13,7
Raio min. da roda interna traseira	4,7	8,7	7,1	6,0	6,9

2.3.1 - Veículos Adotados na Classificação do DNIT

O DNIT (2006) apresenta no manual Quadro de Fabricantes de Veículos, uma classificação dos veículos comerciais que circulam no país e as características específicas dos veículos dos diversos fabricantes instalados no Brasil. O site www1.dnit.gov.br/rodovias/pesagem/ dá acesso à página.

Pesagem, que apresenta duas opções: Peso Máximo por Veículo e Postos de Pesagem; a primeira opção leva ao manual Quadro de Fabricantes de Veículos e a segunda à relação dos postos de pesagem existentes.

A classificação dos veículos adotada pelo DNIT constante da Figura 13 apresenta as configurações básicas de cada veículo ou combinação de veículos, bem como número de eixos, seu PBT máximo e sua classe.

Entende-se por configuração básica a quantidade de unidades que compõem o veículo, os números de eixos e grupos de eixos, independentemente da rodagem, apresentados sob a forma de silhueta.

A rodagem é definida pela quantidade de pneumáticos por eixo. Assim sendo, rodagem simples indica que cada eixo possui apenas 1 (um) pneumático em cada extremidade e rodagem dupla, cada eixo possui 2 (dois) pneumáticos em cada extremidade.

Os eixos equipados com pneus extralargos (single) na medida 385/65R22.5 são considerados como eixos com rodagem dupla e só podem ser utilizados em reboques e semi-reboques conforme a Resolução n.º 62, de 22 de maio de 1998, do CONTRAN.

As diversas classes são representadas por um código alfanumérico, por exemplo, 2S3. No código adotado, o primeiro algarismo representa o número de eixos do veículo simples ou da unidade tratora, enquanto que o segundo algarismo, caso exista, indica a quantidade de eixos da(s) unidade(s) rebocada(s). As letras significam:

C = veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator + reboque;

S = veículo trator (cavalo mecânico) + semirreboque;

I = veículo trator + semirreboque com distância entre eixos > 2,40 m (eixos isolados);

J = veículo trator + semirreboque com um eixo isolado e um eixo em tandem;

D = combinação dotada de 2 (duas) articulações;

T = combinação dotada de 3 (três) articulações;

Q = combinação dotada de 4 (quatro) articulações;

X = veículos especiais;

B = ônibus.

Exemplos:

3C = caminhão simples com 3 eixos

3C3 = caminhão simples com 3 eixos + 1 reboque com 3 eixos

2S3 = caminhão trator (cavalo mecânico) com 2 eixos + semirreboque com 3 eixos

2I2 = caminhão trator com 2 eixos + semirreboque com 2 eixos isolados

3D3 = caminhão simples com 3 eixos + reboque especial com 3 eixos

3Q4 = caminhão simples com 3 eixos + 2 reboques com 4 eixos - treminhão

3T6 = caminhão trator com 3 eixos + 2 ou 3 semirreboques com 6 eixos - rodotrem ou tritrem

3X6 = caminhão trator com 3 eixos + reboque com 6 eixos - carga excepcional

Para os veículos simples existem as classes:

2CB - exclusiva para ônibus dotado de 2 (dois) eixos, sendo o traseiro de rodagem dupla.

3CB - exclusiva para ônibus dotados de conjunto de eixos traseiro duplo, um com 4 (quatro) e outro com 2 (dois) pneumáticos;

4CB - exclusiva para ônibus dotados de 2 (dois) eixos direcionais;

4CD - exclusiva para caminhões dotados de 2 (dois) eixos direcionais. A classe X é composta por combinações de veículos para carga especializada, com mais de 9 (nove) eixos, para o transporte de cargas excepcionais em peso ou dimensões, trafegando com AET.

Além dessas classes de veículos comerciais são incluídas as definições usuais para veículos leves, necessárias para estudos de tráfego e de capacidade.

P - Carro de Passeio, com dois eixos com rodagem simples, incluindo jeeps e kombis.

U - Veículo Utilitário, com dois eixos com rodagem simples, compreendendo caminhões leves (2 eixos com rodagem simples), pick-ups, furgões, vans e micro-ônibus.

M - Motocicletas, motonetas e bicicletas a motor.

B - Bicicletas.

Convém observar que nos mais recentes editais de concessão rodoviária do DNIT, para fins de definição de tarifas é considerado os valores da Tabela 2, em que se verifica que a tarifa é função do número de eixos e da rodagem dos veículos.

Tabela 2 - Correspondência das tarifas de pedágio pelas diversas categorias de veículos

Categoria	Tipo de veículos	N.º de eixos	Rodagem	Multiplicador da tarifa
1	Automóvel, caminhoneta e furgão	2	simples	1,00
2	Caminhão-ônibus, Caminhão- trator e furgão	2	dupla	2,00
3	Automóvel com semi-reboque e caminhoneta com semi-reboque	3	simples	3,00
4	Caminhão, caminhão-trator, Caminhão-trator com semi-reboque e ônibus	3	dupla	3,00
5	Automóvel com reboque e Caminhoneta com reboque	4	simples	4,00
6	Caminhão com reboque e Caminhão-trator com semi-reboque	4	dupla	4,00
7	Caminhão com reboque e Caminhão-trator com semi-reboque	5	dupla	5,00
8	Caminhão com reboque e Caminhão-trator com semi-reboque	6	dupla	6,00
9	Motocicletas, motonetas e Bicicletas a motor	2	simples	0,50

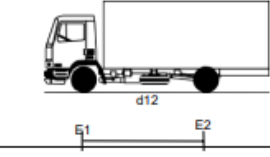
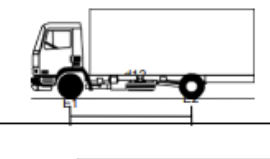
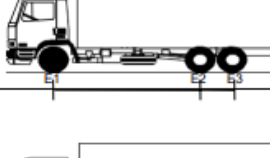
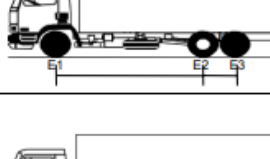
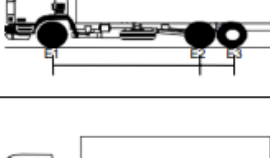
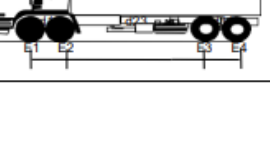
Essa classificação é de grande utilidade para os levantamentos de tráfego a serem executados, já que permitem a estimativa de:

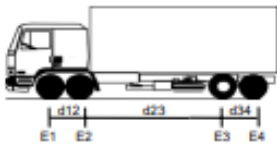
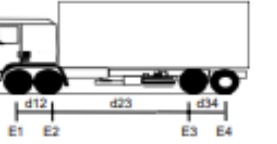
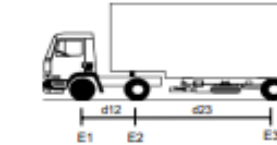
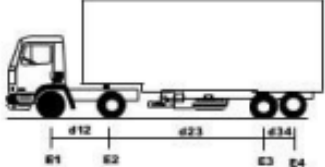
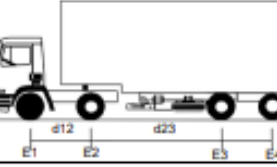
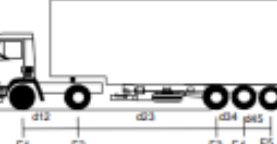
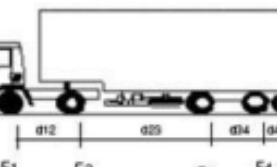
- ✓ números "N" utilizados nos projetos de pavimentos flexíveis;
- ✓ intervalos de carga dos diferentes eixos utilizados no projeto de pavimentos rígidos;
- ✓ valores ESALF utilizados nos estudos de avaliação econômica feita com os sistemas HDM (*Highway Development and Management*);
- ✓ receitas das praças de pedágio nas concessões rodoviárias.

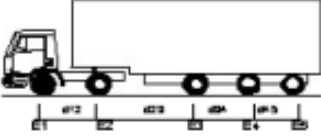
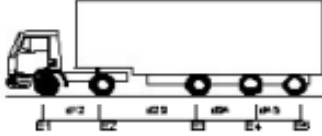
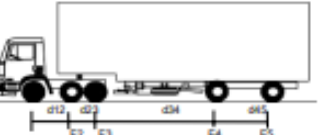
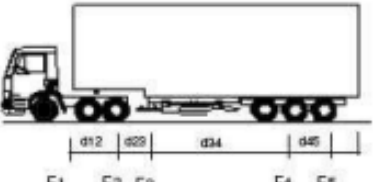
Na Figura 21 (conjunto de 28 figuras) estão apresentadas as classes dos veículos associados: silhueta, número de eixos, peso bruto total (PBT) ou capacidade máxima total (CMT), caracterização, classe e código, dos veículos que dispõem a autorização especial de trânsito (AET)

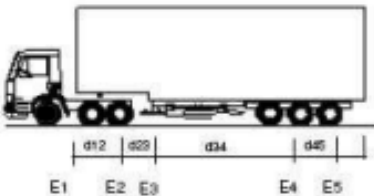
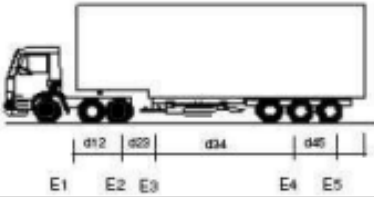
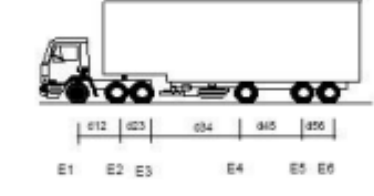
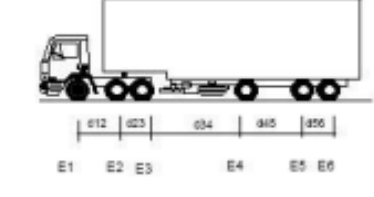
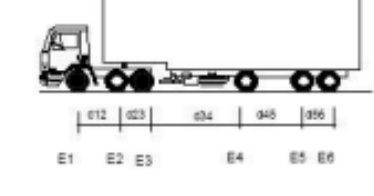
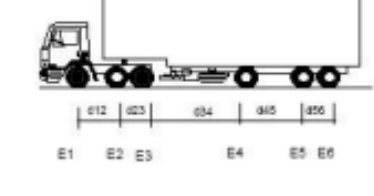
Figura 21 – Classe dos veículos

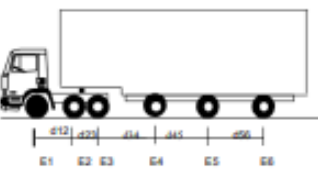
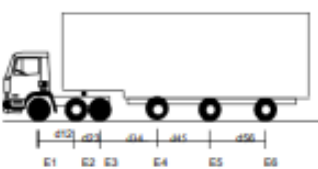
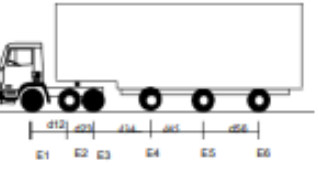
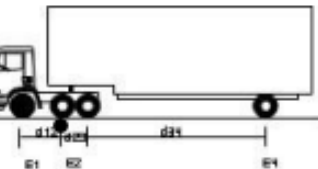
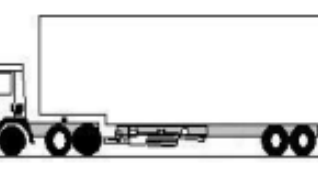
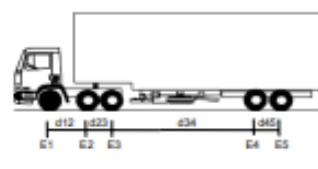
VEÍCULOS QUE NÃO NECESSITAM DE AET:

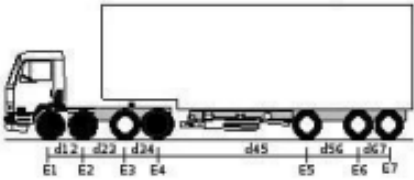
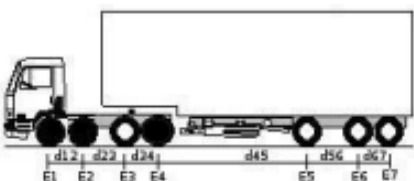
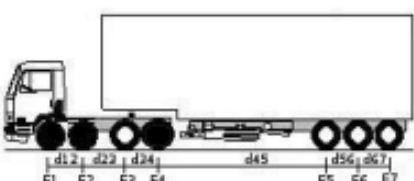
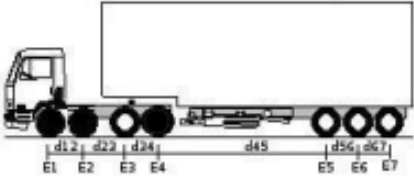
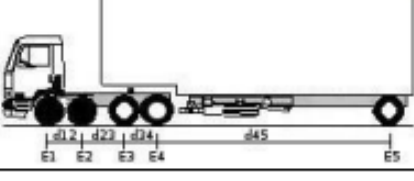
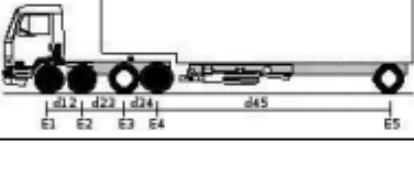
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	2 / 2	12 / (12,6)	CAMINHÃO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. $d12 \leq 3,50$ m	2CC	120
	2 / 2	16 / (16,8)	CAMINHÃO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d12 > 3,50$ m	2C	65
	2 / 3	23 / (24,15)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. $d12 > 2,40$ m $1,20 < d23 \leq 2,40$ m	3C	67
	2 / 3	19,5 / (20,475)	CAMINHÃO TRUCADO COM EIXO TRASEIRO MISTO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d12 > 2,40$ m $1,20 < d23 \leq 2,40$ m	3CD	103
	2 / 3	19,5 / (20,475)	CAMINHÃO TRUCADO COM EIXO TRASEIRO MISTO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d12 > 2,40$ m $1,20 < d23 \leq 2,40$ m	3DC	121
	2 / 4	31,5 / (33,075)	CAMINHÃO SIMPLES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3E4 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. $d12 > 2,40$ m $1,20 < d23, d34 \leq 2,40$ m	4C	69
	2 / 4	29 / (30,45)	CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. $d23 > 2,40$ m $1,20 < d12, d34 \leq 2,40$ m	4CD	70

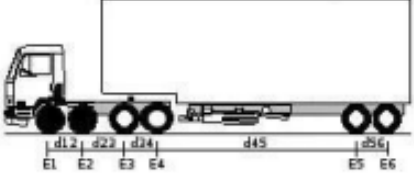
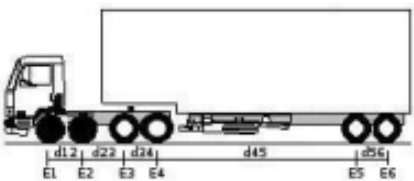
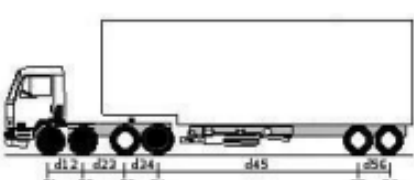
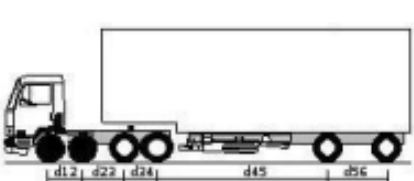
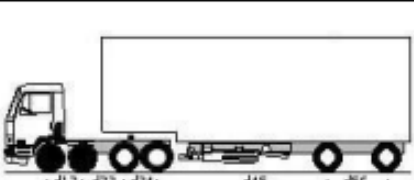
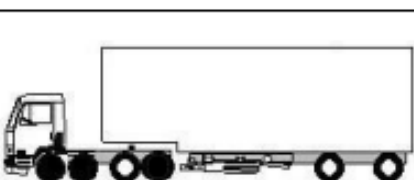
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	2 / 4	25,5 / (26,775)	CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d23 > 2,40$ m $1,20$ m $< d12, d34 \leq 2,40$ m	4DD	122
	2 / 4	25,5 / (26,775)	CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d23 > 2,40$ m $1,20$ m $< d12, d34 \leq 2,40$ m	4DC	123
	3 / 3	26 / (27,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d12, d23 > 2,40$ m	2S1	68
	3 / 4	33 / (34,65)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. $d12, d23 > 2,40$ m $1,20$ m $< d34 \leq 2,40$ m	2S2	71
	4 / 4	36 / (37,8)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d12, d23, d34 > 2,40$ m	2I2	80
	3 / 5	41,5 / (43,575)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3E4E5 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. $d12, d23 > 2,40$ m $1,20$ m $< d34, d45 < 2,40$ m	2S3	74
	4 / 5	43 / (45,15)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. $d12, d23, d34 > 2,40$ m $1,20$ m $< d45 < 2,40$ m	2I1	84

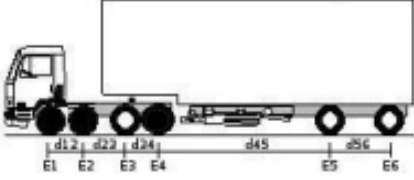
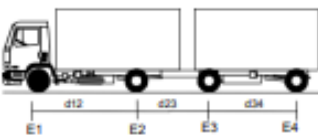
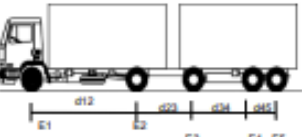
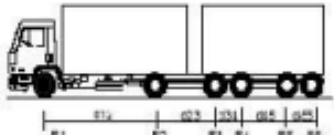
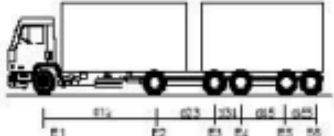
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 5	45 / (47,25) Res. Contran 210/06 Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23, d34, d45 > 2,40 m	2F3	82
	5 / 5	46 / (48,30) Res. Contran 210/06 Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (Comp. Máx. = 18,60m).	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23, d34, d45 > 2,40 m	2F3	82
	3 / 4	33 / (34,65)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m	3S1	72
	4 / 5	43 (45,15)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m	3I2	81
	4 / 5	39,5 (41,475)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m	3D2	124
	3 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO+ SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5E6 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d56 < 2,40 m	3S3	78

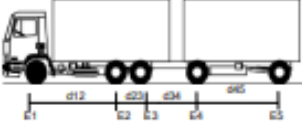
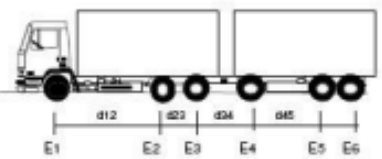
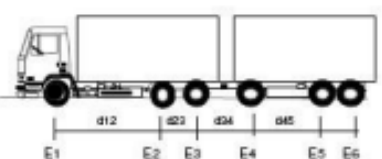
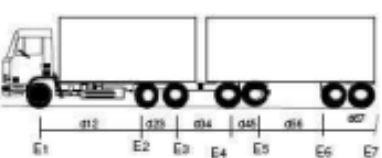
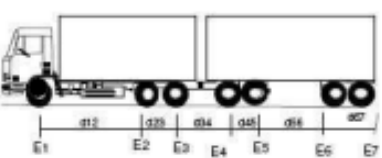
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	3 / 6	48,5 / (50,925) Res. Contran 210/06 Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO+ SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5E6 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d56 ≤ 2,40 m	3S3	78
	3 / 6	45 / (47,25)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO+ SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5E6 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d56 ≤ 2,40 m	3D3	125
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 ≤ 2,40 m	3I1	85
	4 / 6	50 / (52,5) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 ≤ 2,40 m	3I1	85
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton.. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 ≤ 2,40 m	3DI	128
	4 / 6	46,5 / (48,825) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 ≤ 2,40 m	3DI	128

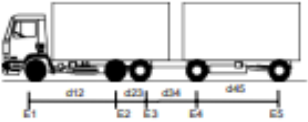
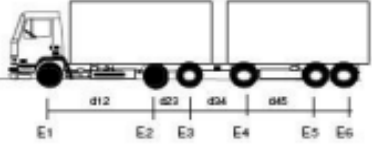
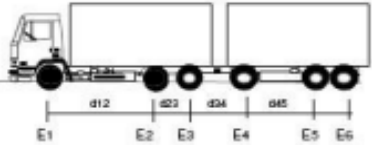
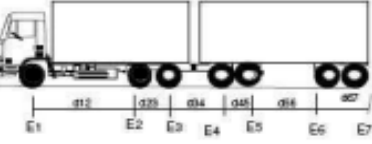
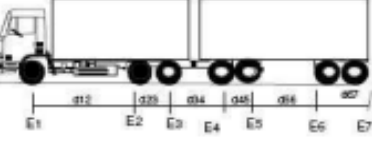
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO+ SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m	3I3	83
	5 / 6	53 / (55,65) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO+ SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m	3I3	83
	5 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO+ SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m	3ID	127
	5 / 6	49,5 / (51,975) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO+ SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m	3ID	127
	3 / 4	29,5 / (30,975)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m	3D1	128
	3 / 5	36,5 / (38,325)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 < 2,40 m	32D	129
	3 / 5	40 / (42)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 < 2,40 m	3S2	75

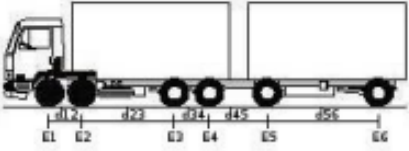
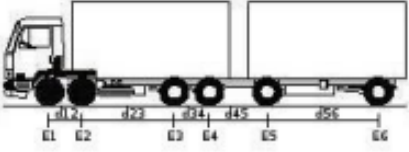
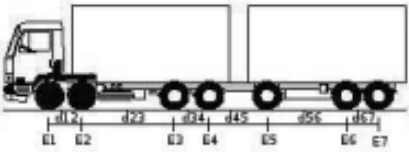
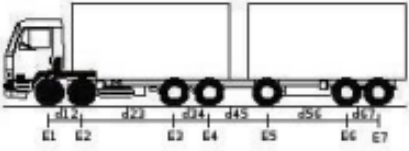
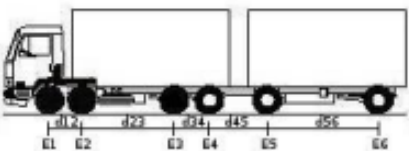
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d67 ≤ 2,40 m	4DI	130
	4 / 7	52,5 / (55,125) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d67 ≤ 2,40 m	4DI	130
	3 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5E6E7 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56, d67 ≤ 2,40 m	4D3	131
	3 / 7	51 / (53,55) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5E6E7 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56, d67 ≤ 2,40 m	4D3	131
	3 / 5	39 / (40,95)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40 m	41C	132
	3 / 5	35,5 / (37,275)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40 m	4D1	133

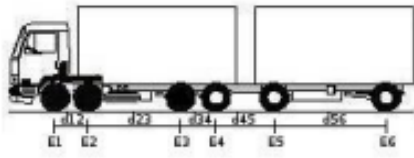
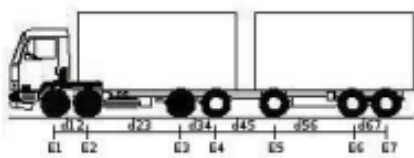
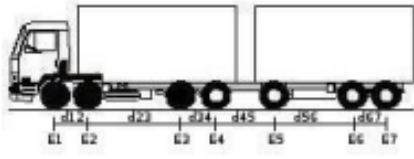
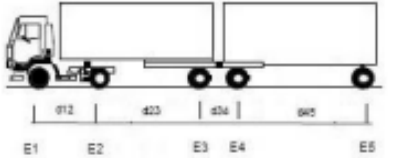
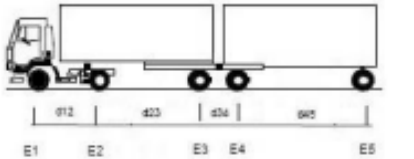
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	3 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56 ≤ 2,40 m	42C	134
	3 / 6	46 / (48,3) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56 ≤ 2,40 m	42C	134
	3 / 6	42,5 / (44,625)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56 ≤ 2,40 m	402	135
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40 m	4I2	136
	4 / 6	49 / (51,45) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40 m	4I2	136
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40 m	4ID	137

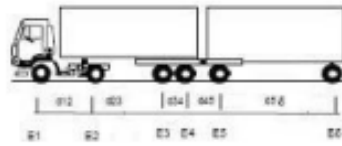
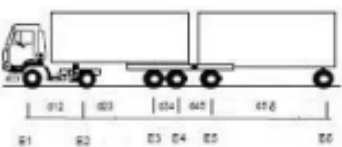
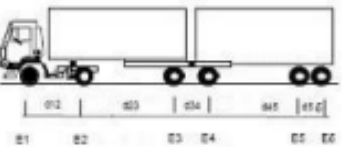
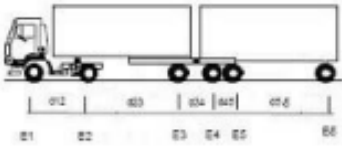
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 6	45,5 / (47,775) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 16m (comp. Máx. = 18,60m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI- REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40 m	4D	137
	4 / 4	36 / (37,8) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m	2C2	73
	4 / 5	43 (45,15) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m 1,20 m < d45 < 2,40	2C3	76
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo simples; carga máxima 10,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d34, d56 ≤ 2,40	2R4	96
	4 / 6	50 / (52,5) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo simples; carga máxima 10,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d34, d56 < 2,40	2R4	96

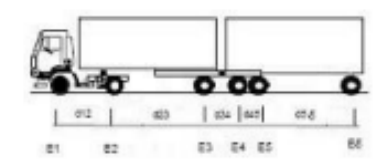
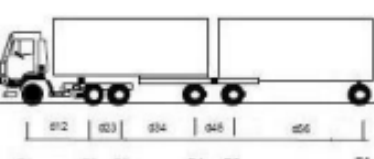
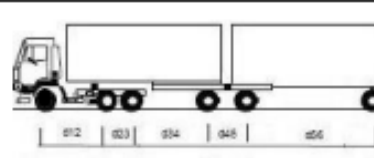
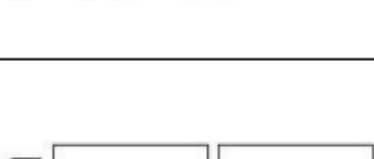
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 5	43 (45,15) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3C2	77
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	ROMEU E JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 < 2,40 m	3C3	79
	4 / 6	50 / (52,5) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	ROMEU E JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 < 2,40 m	3C3	79
	4 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	ROMEU E JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 < 2,40 m	3D4	91
	4 / 7	57 / (59,85) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	ROMEU E JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 < 2,40 m	3D4	91

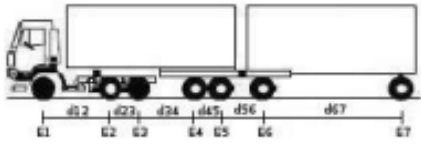
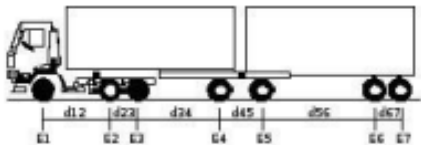
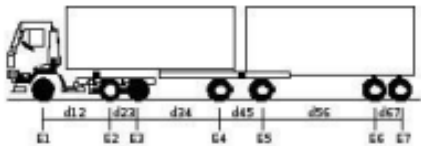
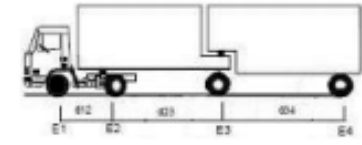
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 5	39,5 (41,475) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após a publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3DD	138
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	ROMEUE JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 < 2,40 m	33D	139
	4 / 6	46,5 / (48,825) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após a publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	ROMEUE JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 < 2,40 m	33D	139
	4 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	ROMEUE JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 ≤ 2,40 m	34D	140
	4 / 7	53,5 / (56,175) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após a publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	ROMEUE JULIETA (caminhão trucado + reboque) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 ≤ 2,40 m	34D	140

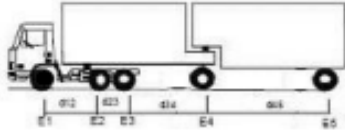
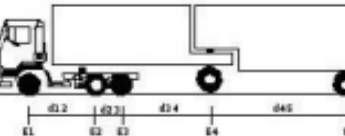
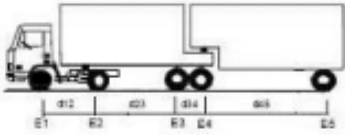
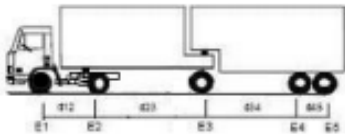
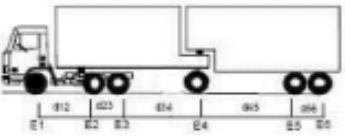
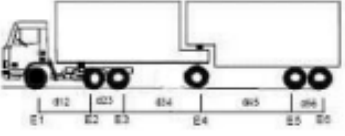
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40	4R2	95
	4 / 6	49 / (51,45) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40	4R2	95
	4 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d67 < 2,40	4R3	97
	4 / 7	56 / (58,8) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d67 ≤ 2,40	4R3	97
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40	42D	141

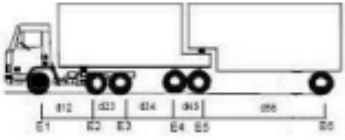
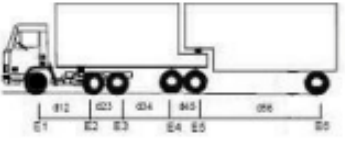
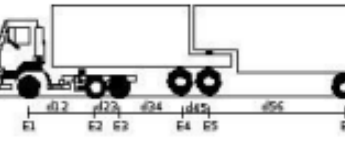
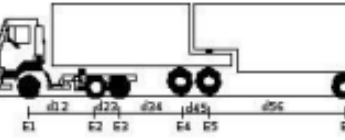
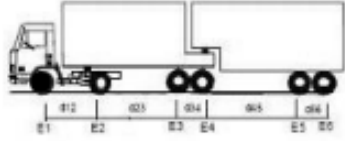
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 6	45,5 / (47,775) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40	42D	141
	4 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d67 < 2,40	43D	142
	4 / 7	52,5 / (55,125) Caso tenha comprimento total até 19,80m. Superior a 19,80m será necessário portar AET (somente para reboques registrados até 30 dias após e publicação desta Portaria) (comp. Máx. = 25,0m)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d67 ≤ 2,40	43D	142
	5 / 5	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d34, d45, d56 > 2,40 m	2N3	98
	5 / 5	46 / (48,3) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d34, d45, d56 > 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2N3	98

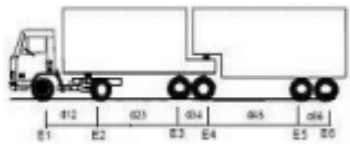
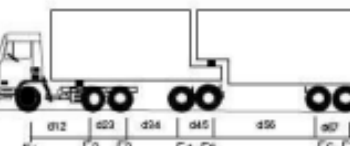
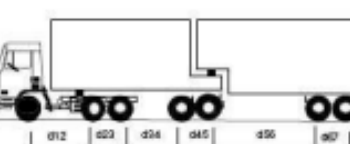
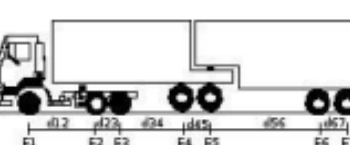
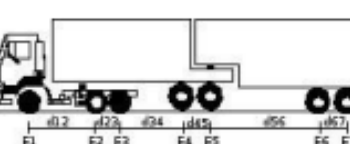
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d34 < 2,40 m	2N4	100
	5 / 6	53 / (55,65) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,5m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d34 < 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2N4	100
	5 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d56 < 2,40 m	2J4	102
	5 / 6	53 / (55,65) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,5m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d56 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2J4	102
	5 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d45 < 2,40 m	2L4	101

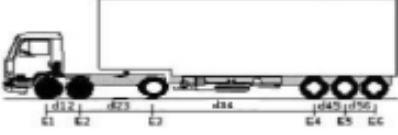
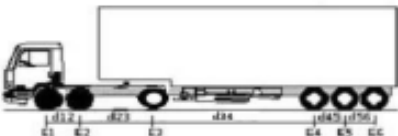
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 6	53 / (55,65) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,5m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d45 < 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2L4	101
	5 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m	3N3	99
	5 / 6	53 / (55,65) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,5m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3N3	99
	5 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3DN	143
	5 / 6	49,5 / (51,975) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,5m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3DN	143

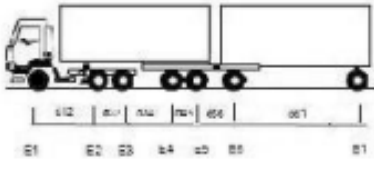
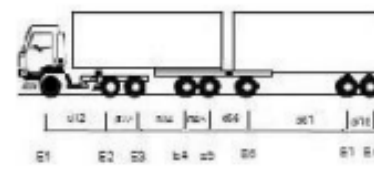
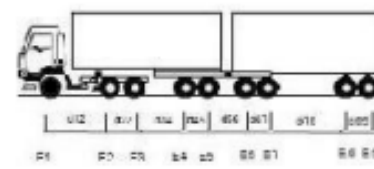
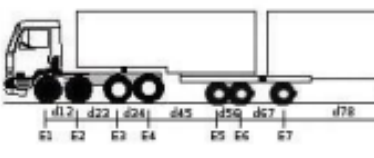
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d56, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3ND	144
	5 / 7	56,5 / (59,325) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,5m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d56, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3ND	144
	5 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d67 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3IJ	145
	5 / 7	56,5 / (59,325) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,5m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d67 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3IJ	145
	4 / 4	36 / (37,8)	CAMINHÃO TRATOR + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2DL	116

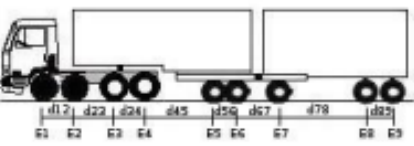
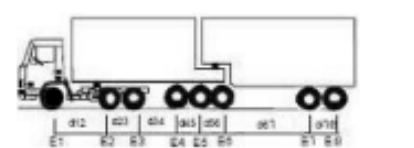
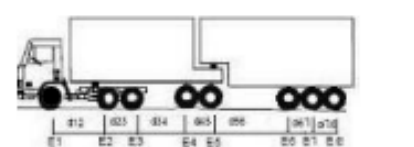
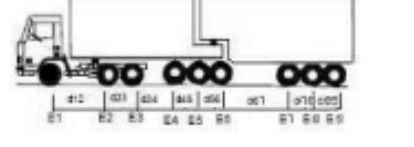
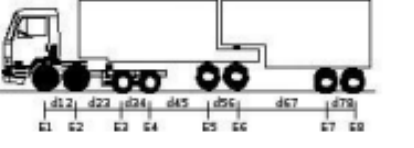
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 5	43 (45,15)	CAMINHÃO TRATOR + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3DL	104
	4 / 5	39,5 (41,475)	CAMINHÃO TRATOR + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 < 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3DJ	148
	4 / 5	43 (45,15)	CAMINHÃO TRATOR + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d34 < 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2LD	105
	4 / 5	43 (45,15)	CAMINHÃO TRATOR + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m 1,20 m < d45 < 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2JD	108
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 < 2,40 m	3JD	107
	4 / 6	50 / (52,5) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 < 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3JD	107

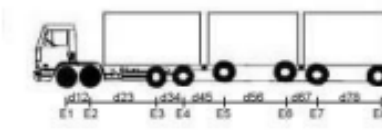
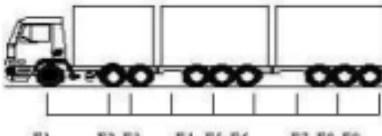
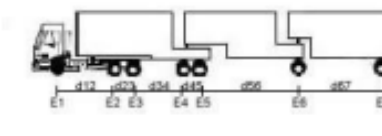
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 < 2,40 m	3LD	108
	4 / 6	50 / (52,5) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3LD	108
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3DT	147
	4 / 6	46,5 / (48,825) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3DT	147
	4 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	CAMINHÃO TRATOR + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d34, d56 < 2,40 m	2D4	109

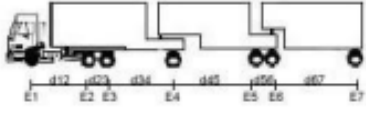
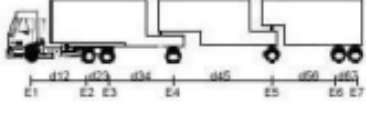
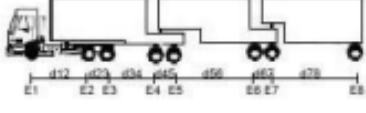
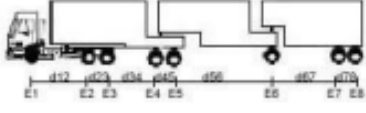
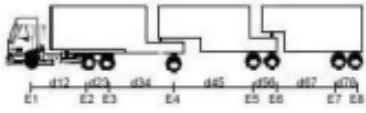
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 6	50 / (52,5) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d34, d56 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	2D4	109
	4 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	BI TREM ARTICULADO (caminhão trator trucado + dois semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 ≤ 2,40 m	3T4	118
	4 / 7	57 / (59,85) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	BI TREM ARTICULADO (caminhão trator trucado + dois semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3T4	118
	4 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 17,50m	BI TREM ARTICULADO (caminhão trator trucado + dois semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 ≤ 2,40 m	3TD	148
	4 / 7	53,5 / (56,175) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total igual ou superior a 17,50m (comp. Máx. = 19,80m)	BI TREM ARTICULADO (caminhão trator trucado + dois semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 ≤ 2,40 m Para comprimento entre 19,80m e 30m o veículo deve portar AET.	3TD	148

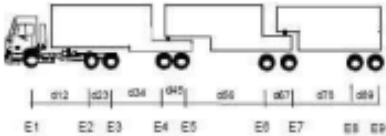
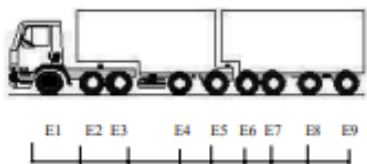
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	3 / 6	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16,00m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E12 = eixo duplo; carga máxima 12,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3E4E5 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d23, d34 > 2,40 m 1,20 m < d45, d56 ≤ 2,40 m	4DS	187
	3 / 6	47,5 / (49,87) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total superior ou igual a 16,00m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E12 = eixo duplo; carga máxima 12,0 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E3E4E5 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d23, d34 > 2,40 m 1,20 m < d45, d56 ≤ 2,40 m	4DS	187
	3 / 7	45 / (47,25) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total inferior a 16,00m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E12 = eixo duplo; carga máxima 12,0 ton. E34 = eixo duplo; carga máxima 17,0 ton. E567 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12 d34, d56, d67 < 2,40 m	4DT	188
	3 / 7	54,5 / (57,225) Res. Contran 210/06. Caso tenha comprimento total superior ou igual a 16,00m (comp. Máx. = 19,80m)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI-REBOQUE E12 = eixo duplo; carga máxima 12,0 ton. E34 = eixo duplo; carga máxima 17,0 ton. E567 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d23, d45 > 2,40 m 1,20 m < d12 d34, d56, d67 < 2,40 m	4DT	188

SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 7	60 / (63) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d12, d34, d45, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 < 2,40 m	3N4	113
	5 / 8	67 (70,35) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E7E8 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d78 < 2,40 m	3J5	114
	5 / 9	74 / (77,7) comprimento entre 25m e 30m	RODOTREM (caminhão trator trucado + semi-reboques + reboque com dolly) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E8E9 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56, d78 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67, d89 < 2,40 m	3T6	93
	5 / 8	66 (69,3) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E8 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. d23, d45, d67, d78 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56 < 2,40 m	4D4	149

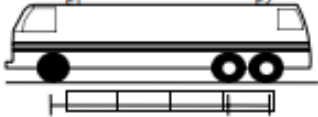
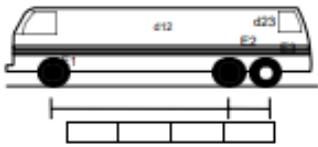
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 9	73 (76,65) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI-REBOQUE + REBOQUE E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. E8E9 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45, d67, d78 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56, d89 < 2,40 m	4D5	150
	4 / 8	65,5 / (68,775) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5E6 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. E7E8 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d56, d78 < 2,40 m	3V5	110
	4 / 8	65,5 / (68,775) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7E8 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d12, d34, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67, d78 < 2,40 m	3P5	111
	4 / 9	74 / (77,7) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5E6 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. E7E8E9 = conjunto de eixos em tandem triplo; carga máxima 25,5 ton. d12, d34, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d56, d78, d89 < 2,40 m	3M6	112
	4 / 8	63 / (66,15) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E7E8 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d23, d45, d67, > 2,40 m 1,20 m < d12, d34, d56, d78 < 2,40 m	44D	151

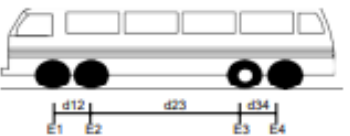
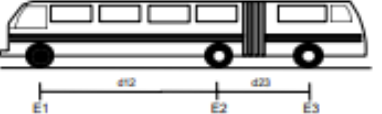
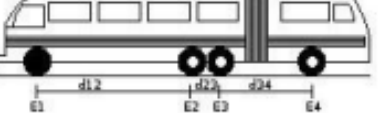
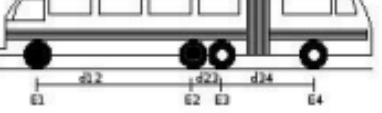
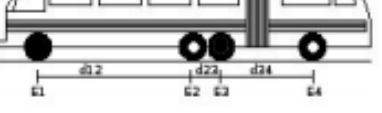
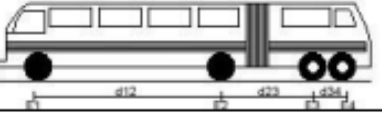
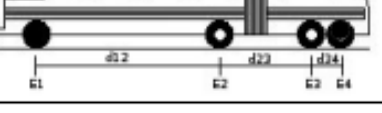
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	6 / 7	63 / (66,15) comprimento entre 25m e 30m	TREMINHÃO (caminhão trucado + dois reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d56, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m	3Q4	92
	6 / 8	70 / (73,5) comprimento entre 25m e 30m	TREMINHÃO DE OITO EIXOS E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E8 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45, d67, d78 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 < 2,40 m	3M5	115
	6 / 8	69 / (72,45) comprimento entre 25m e 30m	TREMINHÃO DE OITO EIXOS E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E8 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d23, d45, d56, d67, d78 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 < 2,40 m	4R4	174
	4 / 9	74 / (77,7) comprimento entre 25m e 30m	TREMINHÃO DE NOVE EIXOS (caminhão trucado + dois reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5E6 = eixo triplo; carga máxima 25,5 ton. E7E8E9 = eixo triplo; carga máxima 25,5 ton. d12, d34, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d56, d78, d89 < 2,40 m	3Q6	117
	5 / 7	60 / (63) comprimento entre 25m e 30m	TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d56, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45 ≤ 2,40 m	3QD	175

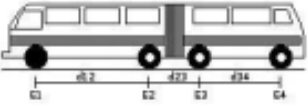
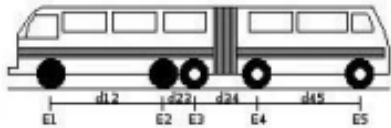
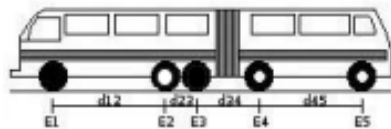
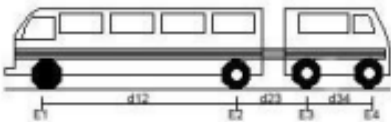
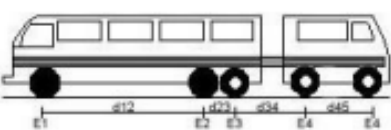
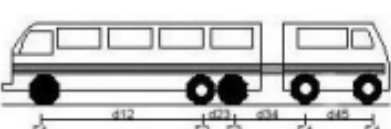
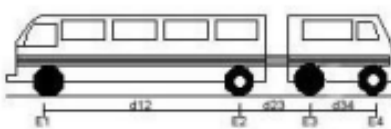
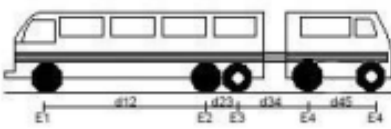
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 7	60 / (63) comprimento entre 25m e 30m	TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E7 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56 ≤ 2,40 m	3DQ	176
	5 / 7	60 / (63) comprimento entre 25m e 30m	TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45, d56 > 2,40 m 1,20 m < d23, d67 ≤ 2,40 m	3SD	177
	5 / 8	67 / (70,35) comprimento entre 25m e 30m	TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E8 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d56, d78 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67 < 2,40 m	3D5	178
	5 / 8	67 / (70,35) comprimento entre 25m e 30m	TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E7E8 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d78 < 2,40 m	3DS	179
	5 / 8	67 / (70,35) comprimento entre 25m e 30m	TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5E6 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E7E8 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d45, d67 > 2,40 m 1,20 m < d23, d56, d78 < 2,40 m	3SD	180

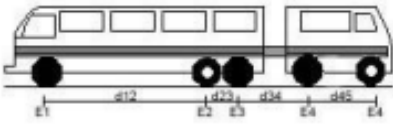
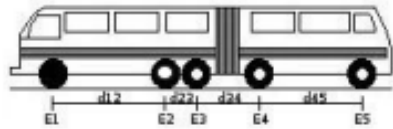
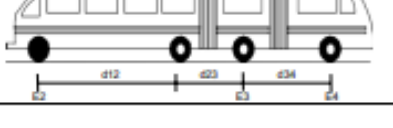
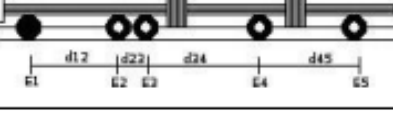
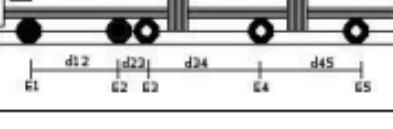
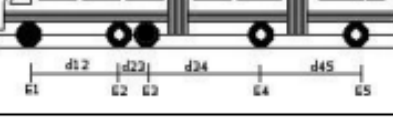
SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	5 / 9	74 / (77,7) comprimento entre 25m e 30m	TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi-reboques) E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4E5 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E8E9 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d34, d56, d78 > 2,40 m 1,20 m < d23, d45, d67, d89 < 2,40 m	3R6	119
	7 / 9	80 / (84) comprimento entre 25m e 30m	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + DOIS SEMI-REBOQUES E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo simples; carga máxima 10 ton. E5 = eixo simples; carga máxima 10 ton. E6E7 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E8 = eixo simples; carga máxima 10 ton. E9 = eixo simples; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45, d56, d78, d89 > 2,40 m 1,20 m < d23, d67 < 2,40 m	3D6	94

ÔNIBUS

SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	2 / 2	12 / (12,6)	ÔNIBUS E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. $d12 \leq 3,50$ m	2BC	152
	2 / 2	16 / (16,8)	ÔNIBUS E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d12 > 3,50$ m	2CB	153
	2 / 3	23 / (24,15)	ÔNIBUS TRUCADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. $d12 > 2,40$ m	3BC	154
	2 / 3	19,5 / (20,475)	ÔNIBUS TRUCADO MISTO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d12 > 2,40$ m	3CB	87
	2 / 3	19,5 / (20,475)	ÔNIBUS TRUCADO MISTO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d12 > 2,40$ m	3BB	155
	2 / 3	19,5 / (20,475)	ÔNIBUS TRUCADO MISTO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d12 > 2,40$ m	3BB	155
	2 / 3	22 / (23,1)	ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d23 > 2,40$ m $1,20 \text{ m} < d12 \leq 2,40$	3DB	156
	2 / 4	2 / 4	ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d23 > 2,40$ m $1,20 \text{ m} < d12 \leq 2,40$	29 / (30,1)	25

SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	2 / 4	25,5 / (26,775)	ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL MISTO E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. d23 > 2,40 m 1,20 m < d12, d34 ≤ 2,40	4BD	158
	3 / 3	26 / (27,3)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23 > 2,40 m.	2B1	159
	3 / 4	33 / (34,65)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34 > 2,40 m. 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3B1	160
	3 / 4	29,5 / (30,975)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34 > 2,40 m. 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3BD	161
	3 / 4	29,5 / (30,975)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34 > 2,40 m. 1,20 m < d23 ≤ 2,40	31B	162
	3 / 4	29 / (30,45)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. d12, d23 > 2,40 m. 1,20 m < d34 ≤ 2,40	2B2	163
	3 / 4	29,5 / (30,975)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. d12, d23 > 2,40 m. 1,20 m < d34 ≤ 2,40	2BD	164
	3 / 4	29,5 / (30,975)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. d12, d23 > 2,40 m. 1,20 m < d34 ≤ 2,40	2DB	165

SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 4	36 / (37,8)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m	2BI	186
	4 / 5	39,5 / (41,475)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3IB	187
	4 / 5	39,5 / (41,475)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3BI	188
	4 / 4	36 / (37,8)	ÔNIBUS COM REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m	2RB	181
	4 / 5	39,5 / (41,475)	ÔNIBUS COM REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3RB	182
	4 / 5	39,5 / (41,475)	ÔNIBUS COM REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3BR	183
	4 / 4	32 / (33,6)	ÔNIBUS COM REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m	2BR	184
	4 / 5	35,5 / (37,275)	ÔNIBUS COM REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	B3R	185

SILHUETA	GRUPO/ Nº EIXOS	PBT ou PBTC / (5%)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4 / 5	35,5 / (37,275)	ÔNIBUS COM REBOQUE E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	BR3	188
	4 / 5	43 / (45,15)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	B3I	169
	4 / 4	36 / (37,8)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E3 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d23, d34 > 2,40 m	2BB	170
	4 / 5	43 / (45,15)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	32B	171
	4 / 5	39,5 / (41,475)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	3B2	172
	4 / 5	39,5 / (41,475)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. E5 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34, d45 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40	B3	173

3.1 - Introdução

Número N é o número de solicitações da carga de um eixo padrão (ESRD) de 8,2 t (18.000 psi) que um pavimento será submetido em sua vida de serviço. Na determinação do número N são considerados fatores relacionados à composição do tráfego referentes a cada categoria de veículo, aos pesos das cargas transportadas e sua distribuição nos diversos tipos de eixos dos veículos, tipos de veículos aqui considerados conforme classificação do DNIT (2006) são: CO - comerciais rígidos, não articulados, caminhões e ônibus convencionais, O - comerciais rígidos de maior dimensão, SR - comerciais articulados e um semirreboque e RE - comerciais com reboque - unidade tratora simples, um semirreboque e um reboque denominado de bitrem. Seus valores anuais e acumulados durante o período de projeto são calculados com base nas projeções do tráfego, sendo necessário para isso o conhecimento qualitativo e quantitativo da sua composição presente e futura. Esse conhecimento é obtido por meio das pesagens, pesquisas de origem e destino, contagens volumétricas classificatórias e pesquisas de tendências da frota regional ou nacional, (Equação 01)

$$N = 365 * P * V_m * FE * FEC * FR \quad 1$$

Onde:

- N = número de solicitações da carga de 8,2 t
- P = período em anos
- V_m = VDM admitindo uma taxa de crescimento
- FE = fator de eixo
- FEC = fator de equivalência de carga
- FR = fator climático regional
- FV = FE * FEC

O procedimento para a determinação do número N consiste basicamente em realizar, contagem quantitativa e qualitativa dos veículos de interesse de forma a determinar do volume diário médio (VDM) ou volume médio (V_m). A contagem é realizada na faixa mais solicitada, quando em rodovias com duas ou mais faixas por direção, caso em pistas simples a contagem pode ser unidirecional ou bidirecional, se bidirecional, deve-se determinar a porcentagem da direção de maior fluxo. O número N é determinado para uma única faixa de rolamento (a mais solicitada). Além da contagem quantitativa e qualitativa, determina-se o fator de carga (FC), também denominado de fator de equivalência de carga (FEC) e por fim o fator de eixo (FE). Com esses parâmetros, através da equação 1 se obtém o número N para o 1º ano e com a taxa de crescimento (linear ou geométrica) determinar o valor de N para o período de projeto.

A norma do DER-SP IP-DE-P00/001 - Projeto de pavimento, descreve as etapas para a determinação do número N conforme é apresentado na equação 2.

A equação 2

$$N = \sum_{i=1}^P N_i \quad (2)$$

Onde: N = número equivalente de operações de eixo simples de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

P = período de projeto igual a 10 anos para pavimento flexível e 20 anos para pavimento rígido;

i = 1 = ano de início da vida de projeto;

N_i = número equivalente de operações do eixo simples (ESRD) padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado durante o ano "i".

N_i da equação 2, é função do volume acumulado de veículos comerciais, fatores de veículo e climático e é determinado pela equação 3.

$$N_i = V_{ti} * FV * FR \quad (3)$$

Onde: V_{ti} = volume total acumulado de veículos comerciais por sentido na faixa de projeto durante o ano "i";

FV = fator de veículo de frota, que é função do método empregado;

FR = fator climático regional

V_{ti} variável da equação 3 é função do VDM_c, distribuição direcional e da porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto e é determinado pela equação 4.

$$V_{ti} = VDM_c * 365 * D * F_p \quad (4)$$

Onde: V_{ti} = volume total acumulado de veículos comerciais por sentido na fx. de projeto durante o ano "i";

VDM_c = volume diário médio de veículos comerciais total durante o ano "i";

D = distribuição direcional (%)

F_p = porcentagens de veículos comerciais na faixa de projeto (%)

O volume diário médio de veículos comerciais, VDM_c, na etapa de estudo preliminar deve ser baseado no Caderno de Estatística de Tráfego do DER/SP. Já nas etapas de projetos básico e

executivo devem ser realizadas contagens de tráfego de acordo com a Instrução de Projeto de Elaboração de Estudos de Tráfego.

Para a determinação do FV da frota, é necessário inicialmente determinar o fator equivalente de operações de cada um dos veículos que trafegarão sobre o pavimento, que é o produto entre o fator de eixo, FE, e o fator de carga, FC - equação 5.

$$FV = FE * FC \quad (5)$$

FE é um fator que transforma o tráfego em número de veículos padrão de passagens de eixo equivalente (ESRD). Para tanto, calcula-se o número de eixos dos tipos de veículos que passarão pela via pela equação 6.

$$FE = (p_2/100) * 2 + (p_3/100) * 3 + + (p_n/100) * n \quad (6)$$

Onde: p2 = porcentagem de veículos de 2 eixos

p3 = porcentagem de veículos de 3 eixos

pn = porcentagem de veículos de n eixos

Exemplo

O FE na Tabela ao lado, que apresenta as porcentagens dos veículos correspondentes aos números de eixos, é o produto da porcentagem pelo número de eixos e o FE é somatória = 5,17.

N. eixos	%	FE
2	11	11/100*2 = 0,22
3	10	0,30
4	22	0,88
5	14	0,70
6	18	1,08
7	13	0,91
9	12	1,08
Σ	100	5,17

Entretanto, caso não se consigam dados de pesagens de veículos e se autorizados pela fiscalização do DER/SP, podem ser adotados os valores de fatores de veículos indicados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Fatores de veículos na etapa de estudo preliminar

Classificação dos Veículos		FV			Combinação de Eixos				Nº de Eixos
		Flexível		Rígido	ESRS	ESRD	ETD	ETT	
Classe	Tipo	USACE	AASHTO						
Médio	Com. 1	1,98	1,36	1,37	1	1	0	0	2
Pesado	Com. 2	4,49	1,05	1,66	1	0	1	0	3
Semi-Reb.	Com. 3	9,89	3,04	5,26	1	1	0	1	5
Ônibus	Com. 4	2,39	1,06	1,28	1	1	0	0	2

Tabela 4 - Fatores de veículos na etapa de estudo básico e preliminar

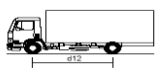
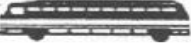
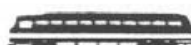
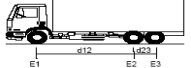
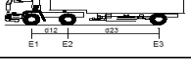
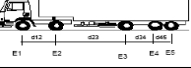
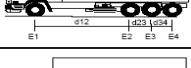
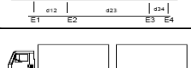
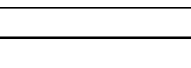
Classificação dos Veículos		FV			Combinação de Eixos				Nº de Eixos
		Flexível		Rígido	ESRS	ESRD	ETD	ETT	
Classe	Tipo	USACE	AASHTO						
2C (16)	Com. 1	0,09	0,11	0,11	1	1	0	0	2
2C (22)	Com. 2	2,78	1,89	1,91	1	1	0	0	2
3C (20)	Com. 3	2,28	0,55	0,93	1	0	1	0	3
3C (22)	Com. 4	5,44	1,27	1,97	1	0	1	0	3
2S1	Com. 5	4,09	2,81	2,99	1	2	0	0	3
2S2	Com. 6	8,70	3,14	3,96	1	1	1	0	4
2S3	Com. 7	10,27	3,32	5,95	1	1	0	1	5
3S3	Com. 8	9,42	1,90	5,01	1	0	1	1	6
3D4	Com. 9	17,28	4,09	6,25	1	0	3	0	7
3D6	Com. 10	14,02	3,27	5,08	1	0	4	0	9
Ôn. (2C)	Ônibus 2	2,81	1,88	1,90	1	1	0	0	2
Ôn. (3C)	Ônibus 3	2,21	0,71	1,02	1	1	0	0	3

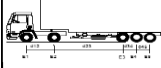
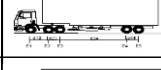
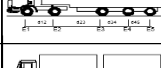
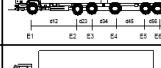
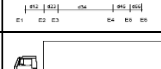
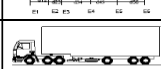
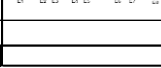
3.2 - Contagem de campo (exemplo)

Várias maneiras podem ser empregadas para a obtenção de contagens de veículos em campo. As contagens obtidas em praças de pedágio, pode ser tomada com o mais fiel possível. Entretanto, normalmente, contagens são realizadas em curtos espaços de tempo, algumas horas do dia, muitas vezes, em dias não consecutivos e em meses também alternados. Através de alguns modelos matemáticos pode-se obter o número N com relativa precisão.

A título de exemplo de determinação do número N, foi realizado um levantamento de campo por meio de filmagem dos veículos que solicitam somente a 3ª faixa. Foram 15 horas de filmagem entre 6:00 h e 21:00 h, distribuídas em três dias 24, 25 e 26/01/2017 (quarta, quinta e sexta feira), na Rodovia BR 376 SC trecho de subida de serra. Através dessa filmagem foi possível quantificar o volume de veículos por classes. Apresenta-se na Figura 22 o resultado da contagem do volume de veículos correspondentes às classes e números de eixos.

Figura 22 - Contagem quantitativa e qualitativa de veículos

Nº EIXOS	CLASSE	VOLUME	ILUSTRAÇÃO
2	2C	109	
	2CB	8	
TOTAL		117	
3	3CB	8	
	3C	540	
	2S1	12	
TOTAL		560	
4	2J3	5	
	4C	0	
	2S2	90	
	2C2	1	
TOTAL		96	

5	2S3	527	
	3S2	5	
	2I3	5	
	2C3	0	
TOTAL		537	
6	3C2	9	
	3S3	407	
	3I3	48	
	3J3	13	
	3C3	2	
TOTAL		479	
7	3D4	219	
TOTAL		219	
9	3T6	31	
TOTAL		31	
GERAL		2039	

3.3 - Determinação do VDM

O Departamento de Estrada de Rodagem do Estado de São Paulo - DER-SP, através de um sistema permanente de contagem e controle de tráfego nas rodovias do Estado, publicou o documento técnico n. 8879/00-IX-RL-0102-0 referente a análise da variação do volume de tráfego em praças de pedágio do estado de São Paulo. Esse documento serve de subsídio para a obtenção dos fatores de distribuições diárias, semanais e mensais utilizados para a determinação do volume diário médio anual - VDMA por extrapolação dos valores do estado de São Paulo. Na tabela 5 são apresentados os fatores das distribuições baseados no documento técnico para o exemplo apresentado. Observe-se que o fator de distribuição é função dos pesos referente às horas do dia, ao dia da semana e também ao mês em que a contagem foi realizada. Por exemplo, se o mês considerado foi de um período de safra o peso certamente será maior, da mesma forma se o dia foi de fim de semana o peso será inferior visto que a circulação de veículos pesados em fins de semana é menor. O cálculo do VDMA foi determinado pela Equação 7, constante do mesmo documento.

Tabela 5 - Fatores de distribuição do volume de tráfego

doc. técnico n. 8879/00-IX-RL-0102-0

Período	Fator de distribuição (%)
Diário 16/24 h (P_{24h})	80
Semanal - quarta/quinta/sexta (dp)	48,3
Mês - janeiro/2009 (pm)	7,6

$$VDM = \frac{\left[\frac{\sum_{dp}^{ndp} VD_{dp}}{\sum_{dp}^{ndp} dp} \right]}{365 * p_m * P_{24h}} * 4,35$$

7

onde: VDM = volume diário médio ou VDMA = volume diário médio anual
 VD = volume diário resultante da contagem de 3 dias por classe de veículos
 dp = fator de variação semanal
 pm = percentual do volume anual no mês m
 P24h = fator de variação diária
 4,35 = número médio de semanas no mês

Reitero que, a equação apresentada refere-se ao tipo de levantamento executado em campo quanto aos números: de dias da semana, de meses e as horas do dia. períodos diferente, o documento apresenta equações distintas.

Temos na Tabela 06 os valores de VDMA na faixa crítica determinados com a contagem do tráfego com base em três dias semanais consecutivos, no mês de janeiro/2017 em horários entre a 6:00 h e 21:00 h. Expositivamente conclui-se que, por exemplo, para a classe 2C tivemos uma contagem de 117 unidades e após o cálculo resultou em um VDMA de 47 veículos ou seja, na ocasião da contagem devido aos pesos do período 117 veículos da classe 2C representou um valor muito acima da média anual, pois o mês de janeiro, os dias no meio da semana e o horário de 6h as 21h potencializou a contagem. Após cálculo, resultou que ao longo de todo o ano, tem-se a média de 47 veículos dessa categoria trafegando na rodovia diariamente.

Tabela 6 - VDM na faixa crítica

Classe	Tipo	Volume (3 dias)	VDMA na 3a.faixa
2C	Com. 2*	117	47
3C	Com. 3	560	227
2S2	Com. 4	96	38
2S3	Com. 5	537	217
3S3	Com. 6	479	194
3D4	Com. 7	219	88
3T6	Com. 9	31	12
		2039	823

(*) Com.2 - veículo comercial com 2 eixos

3.4 - Fator de equivalência de carga (FEC)

Os fatores que compõem o método de dimensionamento de pavimentos novos do DNER (Souza, 1966; DNER, 1996), que tem origem no trabalho de Turnbull et al. (1962), somente para eixo simples e duplo. São os chamados fatores de carga do Corpo de Engenheiros dos USA, também denominados de fatores USACE. Estes fatores transformam o efeito de cada carga para o feito de um eixo simples de roda dupla, tendo como referência o afundamento plástico no subleito, considerado a 70 cm de profundidade (Pereira, 1985). Dentre os possíveis critérios de equivalência de cargas, optou-se pela igualdade da deformação vertical máxima (deflexão máxima) verificada em uma profundidade igual à espessura total do pavimento.

Por conseguinte, as deflexões computadas e comparadas são referidas à interface pavimento/subleito, tendo como limite o padrão de 1 polegada de afundamento. Na década de 70 no Brasil surgiram os eixos triplos, e Souza (1981) propôs um FEC para este tipo de eixo, com base em fatores arbitrários não expressos pelo autor, mas tendo por base aparentemente um fator de redução de 0,85 por acoplagem de eixo. Tal hipótese foi usada à época na proposição dos pesos máximos por eixo da seguinte forma:

- o Eixo simples: 10 t
- o Eixo duplo: $(10 \text{ tf} \times 2) \times 0,85 = 17 \text{ t}$
- o Eixo triplo: $(10 \text{ tf} \times 3) \times 0,85 = 25,5 \text{ t}$

A variação do FEC, adotados pelo DNER (1998), com o peso por eixo simples, duplo ou triplo (Ps, Pd, Pt), é obtida por 6 equações (Tabela 6) em função do tipo de eixos e da carga Souza (1966, 1981),

os valores absolutos para os eixos sem carga, carregados e com excesso de 30%, esse último como hipótese, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores de equivalência de carga - USACE (DNER, 1998)

Tipo de Eixo	Faixas de Cargas (t)	Equações (P em t)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 - 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times p^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times p^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times p^{3,4720}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times p^{5,4840}$
Tandem triplo	0 - 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times p^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times p^{5,5789}$

P = peso bruto total sobre o eixo

FEC é um número que relaciona o efeito de uma passagem de qualquer tipo de veículo sobre o pavimento com o efeito provocado pela passagem de um veículo considerado padrão. Por exemplo, a passagem de um veículo que propicia um FEC = 6, significa que a passagem desse veículo equivale a seis passagens do veículo padrão. Por outro lado, um FEC = 0,5 implica em duas passagens desse veículo para se equiparar com o veículo padrão.

No método do DNER, o veículo padrão adotado é o veículo americano de 18.000 lbs/eixo simples de roda dupla - ESRD (8,2 t), sendo 9.000lbs em um semieixo. Todos os veículos previstos a utilizarem a via serão relacionados com o veículo padrão, para se obter um tráfego representado por um número

de passagens desse veículo padrão, passando tantas vezes quanto o necessário para reproduzir o efeito do tráfego diversificado que realmente vai passar pela via no período de projeto.

Num dado pavimento, uma única solicitação de um eixo com carga superior ao eixo padrão, certamente provocará uma maior deflexão do pavimento, o que implica em um maior dano à estrutura desse pavimento. Se, esse eixo tem FEC = 9 (por exemplo), entende-se que, o dano causado por esse eixo à estrutura do pavimento é 9 vezes maior que o dano causado pela passagem de um eixo padrão de 8,2 t. Também, pode-se dizer que para causar o mesmo dano ao pavimento com o eixo padrão, esse, deve solicitar o pavimento por 9 vezes.

Veículos com carga superior ao veículo padrão implica em FEC superior a unidade, por outro lado, veículos com carga inferior apresentam FEC inferior à unidade.

De forma análoga, tem-se método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO (1993) e os respectivos fatores de equivalência de carga para pavimentos flexíveis e também para pavimentos de concreto. A principal diferenciação entre esses fatores e os considerados no USACE é que os fatores da AASHTO tiveram como base o desempenho da pista experimental da AASHTO

associado à perda de serventia expresso em relação ao número estrutural (SN), que projetada a partir de 1951 e construída entre 1956 e 1958 na cidade Ottawa, Illinois - USA, teve seu tráfego, utilizado na elaboração do dimensionamento, monitorado entre 1958 e 1960. Essa diferenciação resulta em valores de número N bem inferiores quando se utiliza FEC da USACE.

Para a determinação dos FECs, da AASHTO para um número estrutural (SN = 6) estão apresentadas as equações na Tabela 8. Observe-se que as equações possuem expoente igual a 4, daí a denominação de lei da quarta potência. (BALBO, 2007).

Tabela 8 - Equações para determinação dos FECs da AASHTO

Tipo de eixo	Equação (carga P em t)
ESRS	$(P/7,77)^{4,32}$
ESRD	$(P/8,17)^{4,32}$
ETD	$(P/15,08)^{4,14}$
ETT	$(P/22,95)^{4,22}$

Para comparação são apresentados na Tabela 9 os FECs da USACE e da AASHTO correspondentes às cargas determinadas pela contagem do tráfego. Observe-se que foram consideradas três cargas para cada tipo de eixo: sem carga (vazio) carregado (carga legal) e excesso (prática em nossas rodovias) de 30% (título de exemplo).

Tabela 9 - FECS USACE E AASHTO

Tipo de eixo	Carga (tf)			FEC USACE			FEC AASHTO		
	Sobrecarga (30%)*	Carregado	Vazio	Sobrecarga (30%)*	Carregado	Vazio	Sobrecarga (30%)*	Carregado	Vazio
Simples (roda simples)	7,8	6	3	0,8	0,28	0,02	1,02	0,33	0,02
Simples (roda dupla)	13	10	5	16,97	3,29	0,13	7,44	2,39	0,12
Tandem duplo (roda dupla)	22,1	17	6	36,04	8,55	0,08	4,87	1,64	0,02
Tandem triplo (roda dupla)	33,15	25,5	9	40,19	9,3	0,13	4,72	1,56	0,02

(*) Sobrecarga de 30% como exemplo

Observe-se que para eixos em tandem duplo carregados o FEC da USACE é na ordem de 4 vezes superior ao FEC da AASHTO para eixo com excesso essa diferença chega a 7 vezes. Da mesma forma, para o eixo em tandem triplo carregado a diferença é de 6 vezes e de 9 para eixo com excesso de 30% de carga. Para os demais eixos a diferença é relativamente pequena, embora ainda superior.

Cuidados devem ser tomados na concepção de dimensionamentos de pavimentos e, principalmente, no emprego de métodos restauro de pavimentos. Por exemplo, o método DNER PRO 159/85 - Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos tem FECs com base nos procedimentos da AASHTO. Queiróz (1981, 1982).

Nota de esclarecimento: Comumente, não se considera eixo com excesso de carga na determinação do número N. Os valores considerados nessas notas de aula, referem-se única e exclusivamente para evidenciar aos alunos a importância das balanças em rodovias.

3.5 - Fator de eixo

Como mencionado anteriormente, o fator de eixo que transforma o tráfego em número de veículos padrão de passagens de eixo equivalente. Para tanto, calcula-se o número de eixos dos tipos de veículos que passarão pela via conforme apresentado na equação 6.

3.6 – Fator de veículo

De forma análoga ao FE, conforme abordado anteriormente o Fator de veículo FV, também denominado de fator de fotra é dado pela equação 5.

É apresentada na Tabela 10 a determinação do FV total (para os dados referente a Tabela 5). Dispõe-se na primeira e segunda coluna a classe dos veículos e o número de eixos em função dessas classes. Nas colunas seguintes distribuem-se as ocorrências de eixos que é função das classes desses veículos, na outra coluna o VDM de cada classe.

Na mesma tabela calcula-se a % de veículos comerciais, demonstrado na coluna seguinte. A determinação dos Fatores de Veículos (USACE - pelas Equações - Tabela 6) consiste em duas partes:

- a) FEC individual que é obtido com a multiplicação de cada ocorrência de eixo pelo FEC correspondente Tabela 9 (respeitando as condições de sobrecarga, carregado e vazio) e,
- b) FV total que se obtém multiplicando cada FEC individual pela % de veículos comerciais.

Por fim, ponderam-se as possíveis ocorrências de porcentagens de veículos que trafegam vazios, carregados e com sobrecarga e obtém-se o FV final. No exemplo foi considerado 10% de veículos com sobrecarga, 70% de veículos carregados e 20% de veículos vazios. Tabela 10.

Tabela 10 - Determinação do FV

Classificação dos Veículos		Nº de Eixos				Volume Anual (VDMA) Diário Médio	% de Veículos Comerciais	Fatores de Veículos - USACE					
Classe	Tipo	Simples (roda simples)	Simples (roda dupla)	Tandem duplo (roda dupla)	Tandem triplo (roda dupla)			FEC - Individual			FV - Total		
								Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio
2C	Com. 2	1	1	-	-	47	5,7%	17,77	3,57	0,15	1,01	0,20	0,01
3C	Com. 3	1	-	1	-	227	27,6%	36,84	8,83	0,10	10,16	2,43	0,03
2S2	Com. 4	1	-	1	-	38	4,6%	53,81	12,12	0,23	2,48	0,56	0,01
2S3	Com. 5	1	1	-	1	217	26,4%	57,96	12,87	0,28	15,28	3,39	0,07
3S3	Com. 6	1	-	1	1	194	23,6%	77,03	18,13	0,23	18,16	4,27	0,05
3D4	Com. 7	1	-	3	-	88	10,7%	108,91	25,92	0,26	11,65	2,77	0,03
3T6	Com. 9	1	-	4	-	12	1,5%	144,95	34,47	0,34	2,11	0,50	0,00
Total						823	100,0%	-	-	-	60,86	14,14	0,21
Hipótese: 70% dos veículos comerciais com carga máxima legal, 10% com sobrecarga e 20% vazios								Ponderação de carregamento			0,1	0,7	0,2
								FV = 16,02					
Tipo de Eixo		Cargas (tf)			FC-USACE								
		Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio						
simples (roda simples)		7,8	6,0	3,0	0,80	0,28	0,02						
simples (roda dupla)		13,0	10,0	5,0	16,97	3,29	0,13						
tandem duplo (roda dupla)		22,1	17,0	6,0	36,04	8,55	0,08						
tandem triplo (roda dupla)		33,2	25,5	9,0	40,19	9,30	0,13						

Determinado o FV procede-se a obtenção do número N que é o produto dos parâmetros: VDM, FV e 365 dias, Equação 8. Pode-se considerar ainda o fator direcional sendo a % de veículos comerciais na faixa mais solicitada, que no exemplo foram consideradas 100% e também o fator climático regional, nesse caso foi 1, (Tabela 11).

$$N = 365 \cdot F_v \cdot VDM \quad (8)$$

$$N = 365 \cdot 16,02 \cdot 823 = 4.812.328 = 4,81 \text{ E}+06 \text{ solicitações}$$

O valor de N = 4,81 E+06 solicitações corresponde ao período de 1 ano, considerando (por exemplo) uma taxa de crescimento de 2,65% ao ano uma progressão aritmética, Equação 9, temos os seguintes valores de N para os 10 anos subsequentes.

$$I = \frac{[2 + (p-1)tx / 100]}{2}$$

9

Onde I = índice multiplicativo da taxa
 p = período em anos
 tx = taxa

Aplicando-se a taxa para cada ano obtemos o índice que multiplicado pelo N do ano zero, obtém-se os valores de N para cada ano. Para determinação do N para o período de projeto de 10 anos deve-se somar os valores de cada ano. Na tabela 11 é apresentado o valor do N acumulado de 10 anos, 5,58 E+07 solicitações.

Tabela 11 - Determinação do número N para um período de 10 anos com taxa de 2,65%/ano PA

Ano	Período (p)	Índice (I) *	N USACE	
			Anual	Acumulado
2017	0**	1,00000	4,81E+06	4,81E+06
2018	1**	1,00000	4,81E+06	9,62E+06
2019	2	1,01325	4,87E+06	1,45E+07
2020	3	1,02650	4,94E+06	1,94E+07
2021	4	1,03975	5,00E+06	2,44E+07
2022	5	1,05300	5,06E+06	2,95E+07
2023	6	1,06625	5,13E+06	3,46E+07
2024	7	1,07950	5,19E+06	3,98E+07
2025	8	1,09275	5,26E+06	4,51E+07
2026	9	1,10600	5,32E+06	5,04E+07
2027	10	1,11925	5,38E+06	5,58E+07

(*) adotar no mínimo 4 casas após a vírgula

(**) para os períodos 0 e 1, adotar índice de 1

Nas duas tabelas abaixo são apresentadas a determinação do número N, a título de exemplo, sendo a primeira tabela com FECs da USACE, resultou em um número $N = 9,87 \text{ E}+07$ solicitações. Para os mesmos parâmetros: tráfego, taxa de crescimento e período de projeto, o valor de N com FECs da AASHTO o valor de N foi 37% menor, $N = 7,21 \text{ E}+7$, sendo a diferença somente relativa aos FECs.

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO
FEC DA (X) USACE
() AASHTO

Classificação dos Veículos		Nº de Eixos				Volume Diário Médio Anual (VDMA)	% de Veículos Comerciais	Fatores de Veículos - USACE					
Classe	Tipo	Simples (roda simples)	Simples (roda dupla)	Tandem duplo (roda dupla)	Tandem triplo (roda dupla)			Individual			Total		
								Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio
2C	Com. 2	1	1	-	-	61	0,0440	10,87	3,57	0,15	0,48	0,16	0,01
3C	Com. 3	1	-	1	-	421,10	0,3033	23,81	8,83	0,10	1,05	0,39	0,00
2S2	Com. 4	1	1	1	-	63,56	0,0458	34,10	12,12	0,23	1,50	0,53	0,01
2S3	Com. 5	1	1	-	1	357,53	0,2575	36,58	12,87	0,28	1,61	0,57	0,01
3S3	Com. 6	1	-	1	1	309,86	0,2232	24,81	318,69	0,32	1,09	14,03	0,01
3D4	Com. 7	1	-	3	-	152,18	0,1096	70,28	25,92	0,26	3,09	1,14	0,01
3T6	Com. 9	1	-	4	-	23,22	0,0167	103,45	37,48	0,53	4,55	1,65	0,02
Total						1389	1,0	Soma			13,38	18,46	0,08

Hipótese de ocorrência da distribuição de carga dos veículos na frota: 80% dos veículos carga máxima legal, 15% com sobrecarga e 5% vazios	15%	80%	5%
--	-----	-----	----

Tipo de Eixo	Cargas (tf) (adotar 20% de sobrecarga)			FC-USACE (fórmulas)			N _(ano zero) = 365*FV*VDM			FV = 16,78
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio				
simples (roda simples)	7,2	6,0	3,0	0,58	0,28	0,02	N =	8504889	8,50E+06	Solicitações
simples (roda dupla)	12,0	10,0	5,0	10,29	3,29	0,13				
tandem duplo (roda dupla)	20,4	17,0	6,0	23,23	8,55	0,08				
tandem triplo (roda dupla)	30,6	25,5	9,0	25,72	9,30	0,13				
							Determinar o valor de N para um período de 10 anos utilizando uma taxa de crescimento de 2.69%/ano.			

Classe	Tipo	Volume	VDM
2C	Com. 2	100	61
3C	Com. 3	689	421
2S2	Com. 4	104	64
2S3	Com. 5	585	358
3S3	Com. 6	507	310
3D4	Com. 7	249	152
3T6	Com. 9	38	23
			1.389

Fatores relativos a contagem

semanal (3dias) =	40,0%
mensal =	7,5%
diário =	65,0%

Ano/índice			N anual	N acumulado
ano	Ano (p)	Índice (I)		
			USACE	USACE
2013	0	1	8,50E+06	8,50E+06
2014	1	1	8,50E+06	1,70E+07
2015	2	1,01345	8,62E+06	2,56E+07
2016	3	1,0269	8,73E+06	3,44E+07
2017	4	1,04035	8,85E+06	4,32E+07
2018	5	1,0538	8,96E+06	5,22E+07
2019	6	1,06725	9,08E+06	6,13E+07
2020	7	1,0807	9,19E+06	7,04E+07
2021	8	1,09415	9,31E+06	7,97E+07
2022	9	1,1076	9,42E+06	8,92E+07
2023	10	1,12105	9,53E+06	9,87E+07

$$I = \frac{[2 + (P - 1)Tx/100]}{2}$$

$$N_{10 \text{ anos}} = 9,87E+07$$

Exercício Modelo - determinação do número utilizando o FEC da USACE

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO						FEC DA () USACE		(X) AASHTO					
Classificação dos Veículos		Nº de Eixos				Volume Diário Médio Anual (VDMA)	% de Veículos Comerciais	Fatores de Veículos - USACE					
Classe	Tipo	Simples (roda simples)	Simples (roda dupla)	Tandem duplo (roda dupla)	Tandem triplo (roda dupla)			Individual			Total		
								Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio
2C	Com. 2	1	1	-	-	61	0,0440	5,98	2,72	0,14	0,26	0,12	0,01
3C	Com. 3	1	-	1	-	421,10	0,3033	4,21	1,97	0,04	0,19	0,09	0,00
2S2	Com. 4	1	1	1	-	63,56	0,0458	9,48	4,36	0,16	0,42	0,19	0,01
2S3	Com. 5	1	1	-	1	357,53	0,2575	9,35	4,28	0,16	0,41	0,19	0,01
3S3	Com. 6	1	-	1	1	309,86	0,2232	5,21	311,83	0,26	0,23	13,73	0,01
3D4	Com. 7	1	-	3	-	152,18	0,1096	11,20	5,25	0,08	0,49	0,23	0,00
3T6	Com. 9	1	-	4	-	23,22	0,0167	14,19	6,57	0,09	0,62	0,29	0,00
Total						1389	1,0	Soma			2,62	14,83	0,04
Hipótese de ocorrência da distribuição de carga dos veículos na frota: 80% dos veículos carga máxima legal, 15% com sobrecarga e 5% vazios											15%	80%	5%

Tipo de Eixo	Cargas (tf) (adotar 20% de sobrecarga)			FC-USACE (fórmulas)			$N_{(\text{ano zero})} = 365 \cdot FV \cdot VDM$			FV = 12,26
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio				
simples (roda simples)	7,2	6,0	3,0	0,72	0,33	0,02	N =	6214546,248	6,21E+06	solicitações
simples (roda dupla)	12,0	10,0	5,0	5,26	2,39	0,12				
tandem duplo (roda dupla)	20,4	17,0	6,0	3,49	1,64	0,02				
tandem triplo (roda dupla)	30,6	25,5	9,0	3,37	1,56	0,02				
							Determinar o valor de N para um período de 10 anos utilizando uma taxa de crescimento de 2,69%/ano.			

Classe	Tipo	Volume	VDM
2C	Com. 2	100	61
3C	Com. 3	689	421
2S2	Com. 4	104	64
2S3	Com. 5	585	358
3S3	Com. 6	507	310
3D4	Com. 7	249	152
3T6	Com. 9	38	23
			1.389

Fatores relativos a contagem

semanal (3dias) =	40,0%
mensal =	7,5%
diário =	65,0%

Ano/Índice			N anual	N acumulado
ano	Ano (p)	Índice (I)	USACE	USACE
2013	0	1	6,21E+06	6,21E+06
2014	1	1	6,21E+06	1,24E+07
2015	2	1,01345	6,30E+06	1,87E+07
2016	3	1,0269	6,38E+06	2,51E+07
2017	4	1,04035	6,47E+06	3,16E+07
2018	5	1,0538	6,55E+06	3,81E+07
2019	6	1,06725	6,63E+06	4,48E+07
2020	7	1,0807	6,72E+06	5,15E+07
2021	8	1,09415	6,80E+06	5,83E+07
2022	9	1,1076	6,88E+06	6,52E+07
2023	10	1,12105	6,97E+06	7,21E+07

$$I = \frac{[2 + (P - 1)Tx/100]}{2}$$

$$N_{10 \text{ anos}} = 7,21E+07$$

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transportes e Obras de Terra

APOSTILA DE PROJETO DE PAVIMENTO

Prof. Dr. Edson de Moura

DETERMINAÇÃO DO NÚMERO
FEC DA () USACE
() AASHTO

Classificação dos Veículos		Nº de Eixos				Volume Diário Médio Anual (VDMA)	% de Veículos Comerciais	Fatores de Veículos - USACE					
Classe	Tipo	Simples (roda simples)	Simples (roda dupla)	Tandem duplo (roda dupla)	Tandem triplo (roda dupla)			Individual			Total		
								Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio
Total								Soma					

Hipótese de ocorrência da distribuição de carga dos veículos na frota: ___ dos veículos carga máxima legal, ___ com sobrecarga e ___ vazios

Tipo de Eixo	Cargas (tf) (adotar ____% de sobrecarga)			FC-USACE (fórmulas)			$N_{(ano\ zero)} = 365 \cdot FV \cdot VDM$	FV =
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio		
simples (roda simples)		6,0	3,0				N =	solicitações
simples (roda dupla)		10,0	5,0					
tandem duplo (roda dupla)		17,0	6,0					
tandem triplo (roda dupla)		25.5	9.0					
Determinar o valor de N para um período de 10 anos utilizando uma taxa de crescimento de ____/ano.								

Classe	Tipo	Volume	VDM
	Com. 2		
	Com. 3		
	Com. 4		
	Com. 5		
	Com. 6		
	Com. 7		
	Com. 9		

Fator

semanal (3dias) =	
mensal =	
diário =	

Ano/Índice			N anual USACE	N acumulado USACE
ano	Ano (p)	Índice (I)		
2013	0			
2014	1			
2015	2			
2016	3			
2017	4			
2018	5			
2019	6			
2020	7			
2021	8			
2022	9			
2023	10			

$$I = \frac{[2 + (P - 1)Tx/100]}{2}$$

N 10 anos =

() AASHTO

$$N_{10 \text{ anos}} =$$

() **AASHTO**

Classificação dos Veículos		Nº de Eixos				Volume Diário Médio Anual (VDMA)	% de Veículos Comerciais	Fatores de Veículos - USACE					
Classe	Tipo	Simples (roda simples)	Simples (roda dupla)	Tandem duplo (roda dupla)	Tandem triplo (roda dupla)			Individual			Total		
								Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio
Total								Soma					

Hipótese de ocorrência da distribuição de carga dos veículos na frota: ____ dos veículos carga máxima legal, ____ com sobrecarga e ____ vazios

Tipo de Eixo	Cargas (tf) (adotar ____% de sobrecarga)			FC-USACE (fórmulas)			$N_{(\text{ano zero})} = 365 \cdot FV \cdot VDM$	FV =
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio		
simples (roda simples)		6,0	3,0				N = solicitações	
simples (roda dupla)		10,0	5,0					
tandem duplo (roda dupla)		17,0	6,0					
tandem triplo (roda dupla)		25,5	9,0					
Determinar o valor de N para um período de 10 anos utilizando uma taxa de crescimento de ____/ano.								

Classe	Tipo	Volume	VDM
	Com. 2		
	Com. 3		
	Com. 4		
	Com. 5		
	Com. 6		
	Com. 7		
	Com. 9		

Fator

semanal (3dias) =	
mensal =	
diário =	

Ano/índice			N anual	N acumulado
ano	Ano (p)	Índice (I)	USACE	USACE
2013	0			
2014	1			
2015	2			
2016	3			
2017	4			
2018	5			
2019	6			
2020	7			
2021	8			
2022	9			
2023	10			

$$I = \frac{[2 + (P - 1)Tx/100]}{2}$$

$$N_{10 \text{ anos}} =$$

4.1 – Considerações iniciais

Dimensionar uma estrutura de pavimento é encontrar, através do uso de métodos empíricos ou mecanísticos ou ambos, as espessuras de camadas dos diversos tipos de materiais assentes sobre terrapleno de forma a propiciar uma estrutura com um certo nível de durabilidade e ao usuário conforto e segurança. Via de regra, tem-se como principal input, as características do tráfego que irá solicitar a via e as características da resistência do subleito, entretanto, se for constatado que o principal input é outro, esse deve ser o que norteará o projeto.

Um pavimento de concreto foi projeto e executado em elevada altitude no Peru, prematuramente, apresentou trincas o que levou a ruína. O pavimento foi dimensionado corretamente face ao tipo de tráfego solicitado, mas, o principal input o elevado gradiente térmico da região não foi considerado. As placas apresentaram trincas de contração/retração térmica.

Estrada do Una localizada na Cidade de Peruíbe, região sul de São Paulo, inserida na Mata na mata atlântica - Juréia, que liga o bairro de Guarau ao bairro Barra do Una, com 18 km de extensão em revestimento primário (terra). Em diversas localidades é cortada por cachoeiras (também conhecidas de corredeiras) e pequenos riachos, além de muitos pontos com minas de água. Com a chuva, a água transborda e escorre sobre a via e como o nível do leito da estrada está em uma cota inferior, a água permanece sobre a via, o que acaba por formar lama dificultando e, não raras vezes, evitando a trafegabilidade dos veículos, não só de pequeno porte, mas também caminhões e principalmente ônibus.

O tráfego de carga elevada é baixo, conta com uma linha de ônibus com número limitado de viagens diárias e eventual tráfego caminhões. Veículos leves dos moradores e por se tratar de uma área de reserva, em épocas de temporadas acréscimo considerável de turistas. Tem-se dispendido um grande esforço para a manutenção da via, mas, após um período chuvoso todo o trabalho anteriormente realizado, praticamente, é perdido. O regime pluviométrico na mata atlântica é cerca de 2000 a 3000 mm anual e devido às características do tráfego, o principal input a ser aqui considerado é a quantidade de água e não o tráfego. O importante é fazer "um caminho pra água passar", torna trafegabilidade da via perene.

As estruturas de pavimentos asfálticos podem ser concebidas, basicamente, por três tipos de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos:

- (i) métodos empíricos: como exemplo: Método do CBR (Murillo Lopes de Souza, 1966, 1981)
- (ii) métodos mecanísticos-empíricos: por exemplo MEPDG (AASHTO - EUA), SisPav (Franco, 2007) e Medina (2018)

- (iii) por catálogos de estruturas de pavimento: por exemplo de Portugal, Espanha dentre outros países.

O Método do CBR estabelecido pelo DNER em 1966 foi desenvolvido pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza e tem, inegavelmente, grande importância para o Brasil. Apesar de se basear em dois métodos americanos de 1962, a versão adaptada pelo Eng. Murillo. Muitos quilômetros foram dimensionados com sucesso, merecendo, sem dúvida, homenagens e reconhecimento. Entretanto, hoje as condições de tráfego são muito diferentes daquelas a década de 1960-70 quando o método atualmente vigente no Brasil, foi concebido. Aumentaram significativamente: o volume, os tipos de veículos, os tipos de pneus, velocidades, pesos etc. Evoluíram também: o conhecimento das formas de avaliar os materiais (novos ensaios), os processos construtivos, os materiais asfálticos, as exigências de sustentabilidade, os métodos de cálculo de tensões-deformações, dentre outros parâmetros de menor significância.

Os volumes de veículos comerciais presentes nas principais rodovias nacionais, aumentou a necessidade de pavimentos com emprego de camadas cimentadas, denominadas de pavimentos semirrígidos e invertidos. Para estes, com mais razão, o uso do método do CBR com todas as suas simplificações ficou mais anacrônico ainda. Assim, se impõe como uma ação urgente o estabelecimento de um novo método de dimensionamento. Muitos projetistas já têm empregado métodos mecânico-empírico (ME) para dimensionar pavimentos asfálticos no Brasil.

Já há alguns anos, o DNIT, com auxílio da Rede Temática de Asfaltos (RTA), patrocinada pelo CENPES/Petrobras, vem desenvolvendo os conceitos principais de um método mecanístico-empírico (M-E) de dimensionamento de pavimentos asfálticos de forma a tornar realidade um novo método. (Motta, 2009).

Monismith (2004), professor da Universidade da Califórnia, Berkeley, apresentou extenso relato sobre o desenvolvimento histórico dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos que foi acompanhada da evolução da tecnologia dos concretos asfálticos. Diz que:

- (i) Pavimentos asfálticos duradouros podem ser projetados fazendo uso dos métodos mecanísticos - empíricos (base analítica) desenvolvidos nos últimos 40 anos.
- (ii) Embora já seja possível projetar pavimentos asfálticos duradouros, permanece a necessidade de dar cuidadosa atenção às boas práticas construtivas a fim de assegurar o desempenho previsto no projeto.

4.2 – Dimensionamento de pavimentos – Método do CBR - Histórico

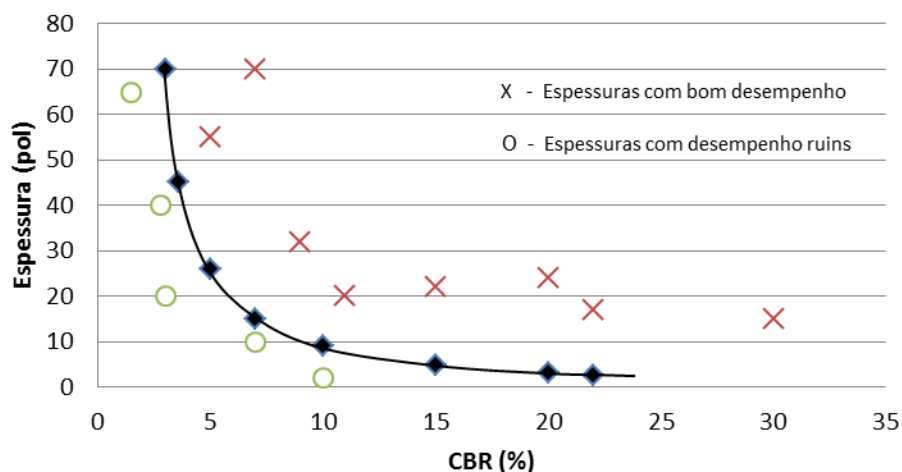
Uma estrutura de um dado pavimento deve suportar as cargas oriundas do tráfego, nas condições climáticas locais, de maneira a oferecer o desempenho desejável para as suas funções de conforto ao rolamento e segurança ao usuário.

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

4.3 – Critério do CBR

Segundo Ahlvin (1991), atribui-se o desenvolvimento do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo uso do CBR ao engenheiro O.J.Porter do Departamento de Estradas da Califórnia - *California Division Highways* - (CDH), na década de 1920. O critério básico utilizado é o de camadas granulares sobre o subleito de maneira a proteger esse de ruptura por cisalhamento. O método consiste basicamente em se obter a espessura da camada granular sobre o subleito conhecendo-se o CBR do subleito. Foram estudados diversos pavimentos que apresentavam tanto sucessos como insucesso, principalmente no que se refere a formação de deformação permanente em trilha de roda e como resultado foi possível traçar um modelo denominado de CURVA B (Figura 23), assim, foi determinada a primeira curva de dimensionamento de pavimento.

Figura 23 - Espessura da camada granular sobre o subleito em função do CBR - CURVA - B



(gráfico adaptado)

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

O CBR - *Califórnia Bearing Ratio*, é a relação de resistência à penetração de um pistão de 2" entre o solo propriamente dito e um corpo-de-prova de brita graduada, esse com valor

correspondente a 100%. Observe-se que a brita graduada tomada com referência era o tipo de material utilizado em camadas de pavimentos que apresentavam um bom desempenho nos pavimentos característica Califórnia.

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

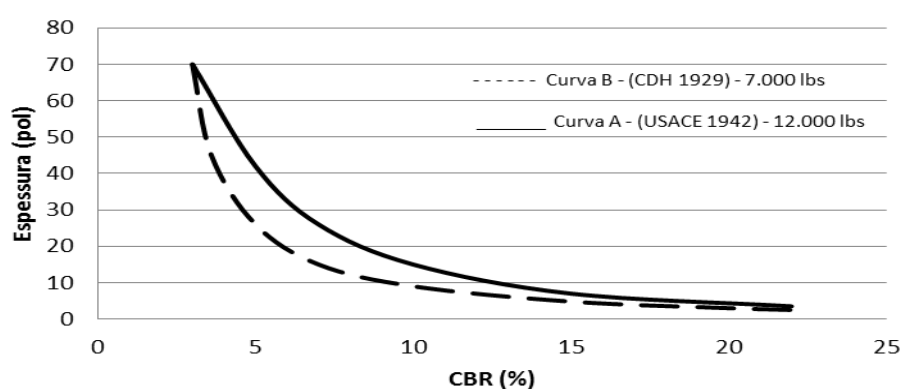
4.4 – USACE

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

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

O critério de Porter era empírico através de observações de campo em pavimentos que apresentavam tanto sucesso como insucessos. Já a extrapolação adotada pelo USACE para cargas superiores implicou na associação do conhecimento das tensões de cisalhamento calculadas em função da profundidade do meio elástico, conforme estabelecido por Boussinesq. Para as condições de Boussinesq o meio elástico deve ser isotrópico, homogêneo e linear. Assim, foi possível se obter curvas de dimensionamento para diversos tipos de cargas, desde 12.000 lbs até 70.000 lbs. Constam na **Figura 24** a curva B obtida por observações em campo por Porter na década de 20 dos pavimentos californianos e a curva A obtida através dos conceitos de elasticidade.

Figura 24 - Espessura da camada granular sobre o subleito em função do CBR - Curvas A e B



4.5 – Espessura X CBR

O USACE em 1956 apresentou a 1ª. Equação 10 de dimensionamento de espessuras de pavimento em função do valor de CBR da camada inferior que correlaciona a espessura necessária de material sobre o subleito, levando-se em conta o CBR do solo de fundação, a carga de roda e a pressão de contato (pressão da roda equivalente). A equação só seria válida para valores de CBR não superiores 12% (faixa de observação empírica).

$$t = \sqrt{P \left(\frac{1}{8,1CBR} - \frac{1}{p_e \pi} \right)}$$
10

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

4.6 – Critério de Cobertura utilizado pelo USACE

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

Yoder e Wictzak (1975) apresentam a Equação 11 enunciada por Turnbull et al. (1962) que corrige a espessura em função de um número de coberturas diferente de 5.000, considerado no método original do USACE.

$$\%t = 0,144 + 0,231 * \log C$$
11

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

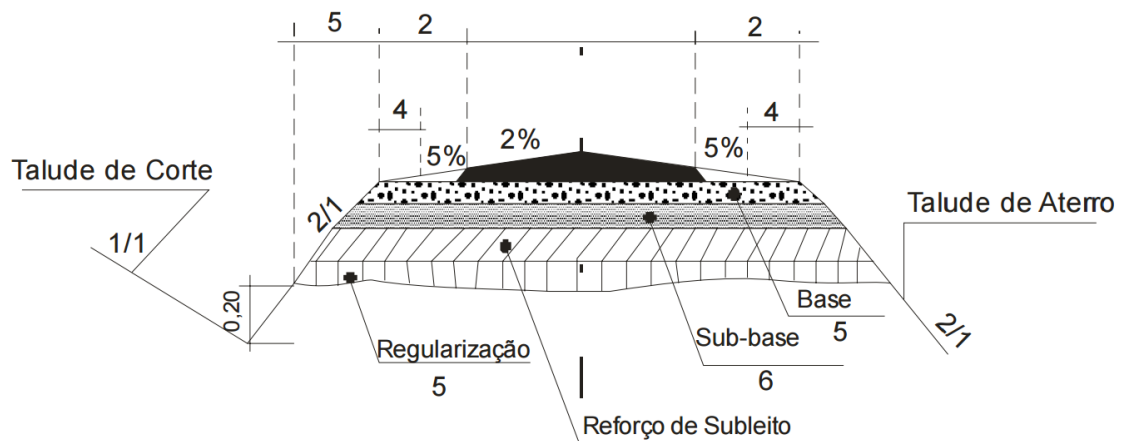
Souza (1978), mostra que trazendo para uma rodovia o conceito de coberturas estipulado pelo USACE, o número de 5.000 coberturas em aeroportos equivale a 13.200 coberturas para uma dada rodovia. Existe uma relação de 2,64 vezes considerado um ESRD.

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

4.7 – Seção transversal típica de pavimento flexível

É apresentada na Figura 25 a seção típica esquemática de um pavimento flexível. De cima para baixo temos as seguintes camadas: revestimento também denominado de capa asfáltica, base, sub-base, reforço do subleito, regularização do subleito e subleito.

Figura 25 - Seção típica de um pavimento flexível



- i. revestimento - é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste ocasionados pela ação dos veículos e as intempéries;
- ii. base - é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento;
- iii. sub-base - é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre regularização;
- iv. reforço do subleito - é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da de regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito;
- v. regularização - é a camada posta sobre o leito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações; a regularização não constitui, propriamente uma camada de pavimento, sendo, a rigor, uma operação que pode ser reduzida em corte do leito implantado ou em sobreposição a este, de camada com espessura variável;
- vi. greide de leito - é o perfil do eixo longitudinal do leito;

- vii. leito - é a superfície obtida pela terraplenagem ou obra-de-arte e conformada ao seu greide e perfis transversais; e,
- viii. subleito - é o terreno de fundação do pavimento - camada final da terraplanagem

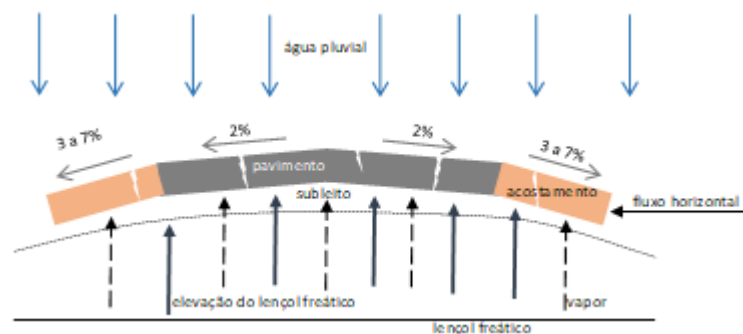
Normalmente, a camada final de terraplanagem (CFT), devido as condições intrínsecas da operação de movimento de terra, a CFT apresenta-se irregular e sem condições de receber as camadas constituintes da estrutura do pavimento. Devido a essa condição irregular da superfície torna-se necessário a regularização do subleito. Tem-se praticado para a cota da CFT 40 cm abaixo da cota da camada de regularização do subleito. O valor referência de CBR dessa camada de regularização, será o valor de CBR do subleito e que irá nortear o dimensionamento do pavimento.

4.8 – Água no pavimento

É notoriamente sabido que os materiais empregados em pavimentação, tem sua resistência diminuída quando em presença de água, sendo uns mais sensíveis que outros, mas de certa forma todos sofrem diminuição de resistência.

Também é de conhecimento que é praticamente impossível de se evitar a entrada de água na estrutura de um pavimento, seja a entrada de água pluviais pelas fissuras ou trincas na superfície do pavimento ou mesmo pela ascensão por capilaridade da proximidade do lençol freático. Tem-se ainda a penetração de água com deslocamento horizontal, uma variante de águas pluviais, que ao infiltrar em uma área fora da área de projeção do pavimento, ocorrem fluxos horizontais atingindo a estrutura. Não raras vezes esse tipo de infiltração demanda de acostamentos não tratados ou com superfície permeável. Na **Figura 26** é apresentado esquematicamente as formas possíveis de fluxo de penetração de água na estrutura de um pavimento.

Figura 26 - Formas de penetração de água na estrutura do pavimento



As formas em que a água é encontrada na estrutura do pavimento são: água capilar, aderida, em forma de vapor e água livre, sendo essa última forma a principal, pois oferece uma alteração positiva significativa no teor de umidade. A movimentação da água na estrutura do pavimento pode ser pela ação da gravidade, por capilaridade, pressão do vapor ocasionado pela ação de variação de

temperatura, ou mesmo a combinação entre esses. Com a movimentação, principalmente do tipo água livre, de forma irrestrita na estrutura, é sem dúvida, uma das principais causas da deterioração precoce dos pavimentos, e sua análise de percolação pode ser simplificada pelas leis da hidráulica, aplicada a escoamento em meios porosos.

Dentre os tipos de materiais empregados nas estruturas dos pavimentos, os materiais finos são os mais sensíveis a alteração negativa de suas resistências. Conforme pesquisa apresentada pela AASHTO (1993) a presença de água livre na estrutura dos pavimentos:

- i. revestimento - a presença de água propicia redução de até 30% no valor de módulo de resiliência e no valor de resistência à tração. A água propicia o descolamento do filme de ligante asfáltico da superfície do agregado, o que induz a formação (inicialmente) de fissuras evoluindo para trincas.
- ii. camadas de base e sub-bases, quando de material granular, pode reduzir até 50% da resistência. Com o aumento da saturação, a ação das cargas dos veículos, aumentam a poro pressão e concomitantemente, o excesso de umidade acaba por lubrificar os contatos entre os grãos reduzindo o atrito interno. Caso essas camadas tenham em sua matriz materiais finos, vulneráveis a alteração de resistência em presença de água, o processo de redução se dá pela expansão desses materiais e quando a tensão atuante é superior a admissível, tem-se a plastificação desses tipos de solos.
- iii. para materiais de bases e sub-bases estabilizados com ligante asfáltico, essencialmente, granulares, chega-se a registrar redução superiores a 30%. Para materiais estabilizados com aglomerantes hidráulicos, também se tem registrados reduções na rigidez desses materiais em presença de água.
- iv. subleito - reduções de 50% nos valores de módulos quando esses apresentam materiais finos.

Suzuki et. al. (2013), apresenta resumidamente os três principais fatores que aceleram os danos aos pavimentos, associados a umidade são:

- i. Infiltração - a intensidade pluviométrica elevada ou prolongada implica em um volume de água significativo que infiltra através das trincas e juntas. As camadas inferiores com menor permeabilidade, a água acaba por ficar retida na estrutura, acelerando a deterioração do pavimento;
- ii. Tráfego - a associação do tráfego com cargas pesadas e a movimentação da água, são geradas poro pressões que danificam a estrutura do pavimento, e
- iii. Estrutura do pavimento - a compatibilidade e a transmissividade hidráulica dos materiais constituintes do pavimento podem contribuir para o acúmulo de água no interior da estrutura.

A prevenção de entrada de água é a garantia da durabilidade na estrutura do pavimento. Para isso requer a interceptação da água do lençol freático com rebaixamento a pelo menos 1,5 m abaixo do nível do subleito e a selagem das trincas, que porventura surgirem a superfície do pavimento, com emprego de técnicas adequadas de manutenção. O rebaixamento do lençol freático é uma preocupação dos projetistas de pavimentos, já a selagem das trincas não a preocupação é menor, visto que essas surgem com o pavimento em serviço e é objeto da gerência de pavimentos (Suzuki et. al 2013).

Uma boa drenagem superficial é fundamental para o escoamento das águas pluviais, de forma a manter o mínimo possível de lâmina d'água sobre o pavimento. Para isso o pavimento deve contar com declividade adequada às condições geométricas da via: alinhamentos longitudinais, transversais, largura da faixa de rolamentos e se trecho em tangente ou em curvas. Em curvas, devido a superelevação transversal, necessária para compensar a força centrípeta dos veículos, propicia o escoamento d'água para entre as pistas quando se trata de uma via com duas pistas de rolamento.

Em pistas simples o caimento (trechos em tangente) de cada faixa de rolamento direciona o fluxo d'água para fora da pista.

Suzuki et. al (2013) comenta que devido a impossibilidade da total remoção da água pela superfície, faz-se necessário da instalação de dispositivos de drenagem subsuperficial para remoção complementar da água acumulada na estrutura, principalmente em rodovias com elevado volume de tráfego.

Assim podemos classificar os dispositivos de drenagem em três tipos:

- i. superficial - escoamento na superfície do pavimento em que o fluxo da água é conduzido para valetas dispostas longitudinalmente e que por sua vez estão conectadas a dispositivos que conduzem o fluxo de água para fora a área de influência do pavimento;
- ii. subsuperficial - drenos (tubos ou britas envelopadas por geotêxteis) instalados no interior da estrutura, na base ou sub-base de materiais com capacidade drenante. Esses drenos são dispostos longitudinalmente fora da ação direta da carga dos veículos. Por vezes tem-se drenos dispostos de forma oblíqua, denominados de espinha de peixe, esses estão conectados aos drenos longitudinais que, como nas valetas da drenagem superficial, são conduzidos para fora da área de influência do pavimento, e
- iii. drenos profundos - normalmente empregado para rebaixamento do lençol freático.

4.9 – Influência da água no dimensionamento de pavimentos

Já é bastante difundido no meio rodoviário a influência da água na durabilidade dos pavimentos, devido ao efeito da saturação na redução do módulo de resiliência, não só dos materiais empregados nas camadas de base, sub-base e reforço com o também o subleito. Caso o pavimento não seja drenado adequadamente, o módulo efetivo dos materiais pode diminuir exigindo-se assim uma

espessura maior de revestimento asfáltico de forma a contornar os efeitos danosos ocasionados pela ação das cargas na estrutura do pavimento (Suzuki et. al. 2013).

Esses mesmos autores apontam trabalho desenvolvido pela AASHTO no *Pavement Design Guide*, versão de 1993, que considera, fundamentalmente, o desempenho funcional da estrutura de pavimentos diante das solicitações de tráfego, o que é representado pela evolução do índice de serventia, que reflete as condições satisfatórias de conforto e segurança ao rolamento sob o ponto de vista do usuário.

No dimensionamento proposto por esse método, é considerado a eficiência do sistema de drenagem do pavimento. Conforme Suzuki et. al (2013), a título de exemplo, um pavimento com condições de muito pobre de drenagem deve ter um incremento de cerca de 40% na espessura do revestimento asfáltico. Na mesma ordem, o incremento é aplicado em pavimentos de concreto com deficiência de drenagem.

O método de dimensionamento de pavimentos pelo método do CBR é um procedimento que teve origem na década de 20 na Califórnia - USA. Pode ser considerado um método semi empírico, pois foi aperfeiçoado na 2ª. Guerra mundial e temos no Brasil uma variante que é o método de dimensionamento oficial do DNIT. Registra-se que devido ao empirismo envolvido no procedimento desse método não é contemplado a drenagem. O DNIT tem procedimentos de projetos de drenagem que não estão relacionados com o desempenho dos materiais utilizados na estrutura do pavimento.

4.10 – Coeficiente de equivalência Estrutural

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

Estão apresentados na Tabela 12, os coeficientes estruturais dos materiais utilizados no dimensionamento de pavimento flexíveis do DNER.

Tabela 12 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais DNIT

Tipo de Material	Coeficiente Estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento pré-misturado a quente de graduação densa	1,7
Base ou revestimento pré-misturado a frio de graduação densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Base Granulares	1,0
Sub-base granulares	0,77 (1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento com resistência aos 7 dias superior a 4,5MPa (compressão)	1,7
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,8 a 4,5MPa (compressão)	1,4
Solo-cimento com resistência aos 7 dias entre 2,1 a 2,8MPa (compressão)	1,2
Bases de solo-cal	1,2

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

Revestimento	KR
Base	KB
Sub-base	KS
Reforço	K _{Ref}

A espessura da camada de revestimento asfáltico é por sua vez um dos pontos ainda em aberto na engenharia rodoviária, quer se trate de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quer se trate de evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. As espessuras apresentadas na Tabela 13 a seguir recomendadas, visam, especialmente, as bases de comportamento puramente granular e são ditadas pelo que se tem podido observar.

Tabela 13 - Espessuras de revestimento asfálticos

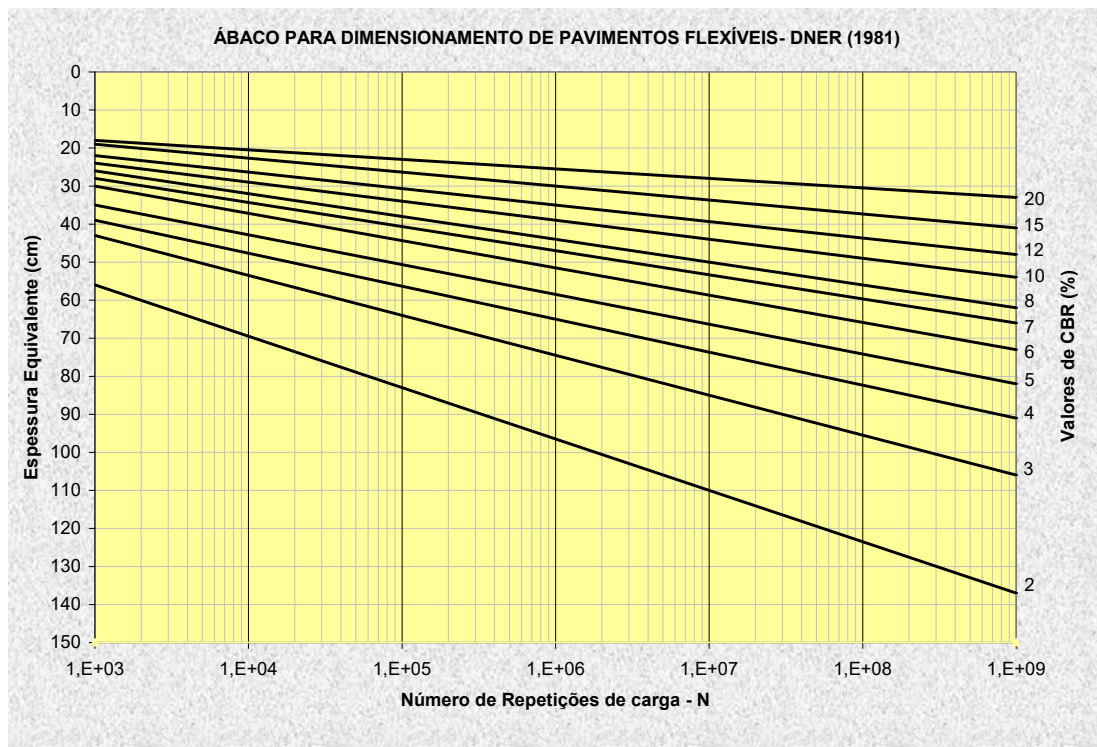
N (repetições) do ESRD de 80 kN	Tipo de Revestimento	Espessura (mm)
$\leq 10^6$	Tratamentos superficiais	15 a 30
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	CA, PMQ, PMF	50
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico	75
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico	100
$N > 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico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

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

4.11 - Determinação das Espessuras das Camadas

A **Figura 27** dá a espessura total do pavimento, em função de N e do CBR; a espessura fornecida por esse gráfico é em termos de material com $K = 1,00$, isto é, em termos de camada granular. Entrando-se em abscissas, com o valor de N, procede-se verticalmente até cruzar com a reta representativa da capacidade de suporte - CBR e, procedendo-se horizontalmente, encontra-se, em ordenadas a espessura total do pavimento.

Figura 27 - Ábaco para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis- DNER (1981).



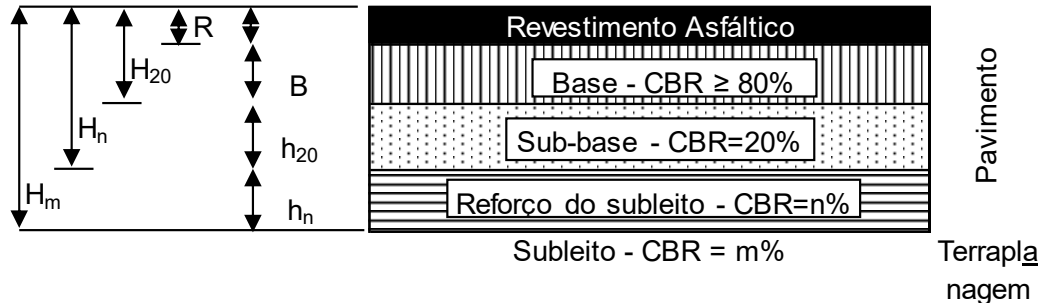
Outro procedimento de obtenção da espessura total do pavimento (H_t), em termos de material granular é através da aplicação da equação 12:

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (12)$$

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

Figura 28 a simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento.

Figura 28 - Simbologia das camadas



Ressalta-se na Figura 20 que as letras H (maiúsculo) refere-se as espessuras de várias camadas e o h (minúsculo) refere-se a espessura de uma única camada.

Hm = espessura total do pavimento necessária para proteger um material com CBR = m%, observe-se que a espessura Hm é função do CBR do subleito (m%).

CBR (subleito)	m%	
Tráfego	N	(ábaco = Hm em cm)

Hn = espessura necessária acima do reforço, ou seja, a espessura da sub-base + base + revestimento, para materiais com coeficiente estrutural (K) = 1,00.

CBR (reforço)	n%	
Tráfego	N	(ábaco = Hn em cm)

Os símbolos B e R são respectivamente as espessuras da base e do revestimento. Mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20%, a espessura de pavimento necessário para protegê-la é determinada como se este valor fosse 20% e, por essa razão, usamos sempre, os símbolos H20 e h20 (Figura 20) para designar as espessuras de pavimento sobre a sub-base e da sub-base respectivamente. Assim, para se determinar espessura de H20 utiliza-se o CRB (sub-base) = 20% - sempre será essa condição.

Uma vez determinadas as espessuras Hm, Hn e H20 pela Figura 19 e a espessura do revestimento pela Tabela 13, as espessuras da base (B), sub-base (h20) e reforço do subleito (hn) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes Inequações A, B e C:

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

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

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

IMPORTANTE -

- i. Quando o CBR da sub-base for maior ou igual a 40% e para $N \leq 10^6$, admite-se substituir na inequação (A), H_{20} , por $0,8 * H_{20}$.
- ii. Para $N > 10^7$, recomenda-se substituir, na inequação (1), H_{20} por $1,2 * H_{20}$.
- iii. Nem toda estrutura de pavimento dispõe de material para reforço de subleito.
- iv. Quando não forem fornecidas as características dos materiais da base, sub-base e reforço deve-se utilizar o coeficiente estrutural $K = 1,0$, caso contrário, determiná-lo com a Tabela 12.
- v. Observe-se que o material de base, o método, sempre recomenda que o CBR $\geq 80\%$ expansão $< 0,5\%$

O método de projeto de pavimentos flexíveis do DNER, atual DNIT, recomenda a substituição de pelo menos 1,0 m de espessura da camada de subleito por um material com valor de CBR superior a 2% quando esse for inferior.

Espessura mínima de material granular para compactação é de 10 cm e máxima de 20 cm. Uma camada final deve ter no mínimo 15 cm. Assim, na determinação das espessuras das camadas granulares, quando se obtém valores inferiores a 15 cm, deve-se adotar 15 cm e caso alguma camada resulte em espessuras maiores que 20 cm, deve-se dividi-la em mais de uma camada. Por exemplo: uma camada de reforço de subleito de 28 cm, adota-se 2 camadas de 15 cm cada, denominadas de 1ª e 2ª camadas de reforço ou uma camada de 20 cm e outra de 10 cm.

4.12 - Exemplos de dimensionamento

1) dimensionar o pavimento em que o $N = 10^3$, sabendo-se que o subleito tem um CBR = 3% e dispondo-se de material para o reforço do subleito, com CBR = 9%. Tem-se um material para sub-base com CBR = 20% e material para base com CBR = 80%.

Dados: CBR (sub-base) = 20%

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transportes e Obras de Terra

APOSTILA DE PROJETO DE PAVIMENTO

Prof. Dr. Edson de Moura

CBR (reforço) = 9%
 CBR (subleito) = 3%

Os coeficientes estruturais de cada material (nesse caso) $K = 1,0$, assim:

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

Resolução:

Solução: Devido ao N, conforme Tabela 13 o tipo de revestimento asfáltico é o tratamento superficial, logo se pode desprezar a espessura.

Pelo ábaco do da Figura 20 determinamos:

Espessura da Base: $H_{20} = 18 \text{ cm}$

Pela Inequação A - temos:

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

$$0 + B \cdot 1,0 \geq 18 \quad B = 18 \text{ cm}$$

Espessura da Sub-Base: $H_n = 26 \text{ cm}$

Pela Inequação B - temos:

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

$$0 + 18 \cdot 1,0 + h_{20} \cdot 1,0 \geq 26$$

$$18 + h_{20} \geq 26 \Rightarrow h_{20} = 8 \text{ cm}$$

Como se trata de uma camada granular adota-se a espessura de 15 cm $h_{20} = 15 \text{ cm}$

Espessura do reforço do subleito $H_m = 43 \text{ cm}$

Pela Inequação C - temos:

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

$$0 + 18 \cdot 1,0 + 15 \cdot 1,0 + h_n \cdot 1,0 \geq 43$$

$$h_n \geq 10 \text{ cm}$$

Como se trata de uma camada granular adota-se a espessura de 15 cm

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

Resultado

Camada	Espessura (cm)
Revestimento	0
Base	18
Sub-base	15
Reforço do Subleito	15
Total	48

Registra-se que a espessura total em material granular é de 48 cm, valor superior ao determinado pelo

2) dimensionar um pavimento de uma estrada em que o $N = 10^6$ sabendo-se que o subleito possui um CBR = 12%, material de sub-base com CBR = 40% e para base um material com CBR = 80%, $K_B = 1,0$ e $K_{Sb} = 1,00$

Resolução:

Revestimento: devido ao N temos um tratamento superficial como revestimento asfáltico, logo a espessura = 0 cm.

$$\text{Base} \quad RK_R + BK_B \geq H_{20}$$

Para determinação da espessura de H_{20} , entrar com o valor de CBR = 20 e valor de N na inequação A

$$0 + B \cdot 1,0 \geq 25 \quad B = 25 \text{ cm}$$

Devido a sub-base com CBR = 40% e o valor de $N < 10^6$ pode reduzir em 20% a espessura de H_{20} , que implica necessariamente na redução da espessura da base em 20%.

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

Sub-base

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_{Sb} \geq H_n$$

Da mesma forma, para determinação da espessura H_n , deve-se com os valores de N e o valor de CBR do subleito obter o valor de H_n com a inequação 2. Não temos reforço do subleito, assim, não existe essa camada, observe-se que a camada de sub-base foi apoiada sobre a camada de subleito

como $R = 0$ e $K_B = 1,0$ temos,

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

$$0 + 20 * 1,0 + h_{20} * 1,0 \geq 34$$

$$20 \text{ cm} + h_{20} \geq 34 \text{ cm} \quad h_{20} = 14 \text{ cm} \quad h_{20} = 15 \text{ cm}$$

Resumo

Camada	Espessura (cm)
Revestimento	0
Base	20
Sub-base	15
Reforço do Subleito	-
Total	35

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

Subleito com CBR = 12%

Sub-base com CBR = 20% e,

Base com CBR = 80%

Solução:

Revestimento: devido ao $N = 7 \cdot 10^6$ pela Tabela 13 temos como especificação da espessura do revestimento = 7,5 cm.

$K_R = 2,0$ (Tabela 12- coeficiente estrutural)

$K_B = 1,0$ e $K_S = 1,00$ (adotar)

$H_{20} = 28$ cm (ábaco Figura 20 ou inequação A)

$H_{12} = 38$ cm (ábaco Figura 20 ou inequação B)

Base

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

$$7,5 \cdot 2,0 + B \cdot 1,0 \geq 28 \text{ cm} \quad B = 13 \text{ cm} \quad \text{Base} = 15 \text{ cm}$$

Sub-base

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

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

$$h_{20} \geq 38 - 30 \quad h_{20} \geq 8 \text{ cm} \quad h_{20} = 15 \text{ cm}$$

Resumo

Camada	Espessura	
	(cm)	equivalente
Revestimento	7,5	$7,5 \cdot 2,0$
Base	15	$15 \cdot 1,0$
Sub-base	15	$15 \cdot 1,0$
Reforço do Subleito	-	-
Total	32,5	40 cm > 38 cm

Ex 4 $N = 5 \times 10^7$ solicitações, subleito CBR = 7%, reforço do subleito = 10%, sub-base (solo cal) = 40%, base (solo cimento > 4,5 MPa) = 80%.

Ex 5 - Dimensionar as camadas do pavimento, pelo Método do DNER, de forma a obter a estrutura com menor custo, utilizando os materiais relacionados abaixo:

Considerar uma camada de binder (PMQ de graduação densa) como parte da espessura total do revestimento.

Pavimentos	Número N (solicitações)	Condições subleito
A	7×10^6	CBR _m = 3%
B	7×10^5	CBR _m = 5%
C	7×10^8	CBR _m = 4%
D	3×10^7	CBR _m = 6%

Material	Característica	(K)	Custo* (R\$) (linear)
CA	Concreto asfáltico	2,0	320,00/5 cm
Binder	Pré-misturado a quente - graduação densa	1,7	280,00/5 cm
Solo granular	Tipo 1 - CBR = 65%	1,0	150,00 /10 cm
Solo	Tipo 2 - CBR = 40%	1,0	110,00/10 cm
Material granular	Tipo 3 - CBR = 30%	1,0	90,00/10 cm
Solo cal	CBR = 50%	1,2	115,00/10 cm
BGS	CBR = 110%	1,0	75,00/10 cm
Solo cimento	CBR = 90%	1,2	175,00/10 cm
Solo cimento	CBR = 110%	1,4	205,00/10 cm
Solo cimento	CBR = 90%	1,7	235,00/10 cm
CCR	CBR > 150%	1,7	280,00/10 cm
Solo	Tipo 4 - CBR = 8%	1,0	40,00/10 cm
Solo	Tipo 5 - CBR = 12%	1,0	60,00/10 cm
Solo	Tipo 6 - CBR = 15%	1,0	55,00/10 cm
Solo	Tipo 7 - CBR = 10%	1,0	50,00/10 cm

(*) Os valores apresentados são simbólicos.

5.1 – Introdução

Apresentam-se os procedimentos das diretrizes para o dimensionamento de pavimentos flexíveis de vias urbanas do município de São Paulo submetidas a tráfego leve e médio.

5.2 – Estudo Geotécnico

5.2.1 – Serviços preliminares de campo

Os serviços preliminares consistem na análise de mapas geológicos, existência de revestimento primário nas vias a serem pavimentadas, condições topográficas do local, identificação expedita visual-tátil do subleito e de solos das áreas de empréstimo.

Amostragens sistemáticas são realizadas por sondagem do subleito natural com coleta de amostra. Ensaios geotécnicos dos materiais do subleito estão apresentados na Tabela 14

Tabela 14 - Ensaios geotécnicos para subleito natural

Camada	Ensaios in situ	Ensaios laboratoriais
1ª. camada 0,0 a 0,5m	Massa específica aparente Umidade de solos Índice de suporte (CBR)	Classificação MCT CBR ou M-CBR Granulometria completa
2ª. camada 0,5 a 1,0m	Massa específica aparente Umidade de solos Índice de suporte (CBR)	Classificação MCT Granulometria completa

Caso o subleito apresente com revestimento primário de espessura acima de 10 cm de materiais: brita, escória ou entulho de boa qualidade, deve-se considerar esse revestimento como material a ser aproveitado. Materiais encontrados poderão ser utilizadas em seu estado natural ou trabalhadas como camada de reforço do subleito ou sub-base. Os procedimentos de avaliação estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Ensaios geotécnicos para subleito com camada de revestimento primário

Ensaios			Condições de uso da camada
Camadas	In situ	Laboratório	
Revestimento primário	Deflexão pela viga Benkelman		
	<100 (1/100) mm	-o-	Poderá ser usada em sua condição natural adotando-se para tanto CBR=20%
	>100 (1/100) mm	CBR e expansão	Poderá ser usada mais trabalhada
Subleito	Conforme quadro 01		Subleito em sua condição natural ou melhorado

5.2.2 - Serviços de Escritório

Os serviços de escritório descritos a seguir orientam a elaboração dos documentos geotécnicos do projeto e, devem referir-se a segmentos de trechos estudados, definidos pela projetista. Esses documentos deverão conter as seguintes informações:

Perfil geotécnico

Distância entre os diversos furos sondados,
 Identificação numérica de cada furo,
 Identificação numérica de cada camada e respectivo furo,
 Profundidade de cada camada, com indicação das respectivas cotas em relação ao greide de projeto

Indicação das características de cada camada

Indicação visual-tátil incluindo a cor de cada camada,
 Origem provável,
 Massa específica seca natural,
 Umidade natural
 Suporte in situ
 Massa específica aparente seca máxima,
 Umidade ótima,
 Granulometria,
 CBR ou M-CBR
 Classificação MCT

Indicação dos universos dos solos - (classificação MCT)

Solos de classificação LA' e LG': Os casos de subleito do tipo LA', cuja origem seja a formação São Paulo, do tipo variegado, devem ser tratados isoladamente.

Solos de classificação NS' e NG': Nos casos de subleito do tipo NG', com estrutura estratificada e/ou com problemas de drenagem utilizar um mínimo de 20 cm de reforço de solo selecionado ou estabilizado com CBR > 11%.

Para os demais grupos da classificação MCT devem ser estudadas isoladamente. Através de intervalos do CBR e M-CBR, com expansão < 2%

Em função dos universos, denominados de U1 a U4, pode-se estimar os valores de CBR:

U1 = solos com CBR ou M-CBR < 4%

U2 = solos com 4% < CBR ou M-CBR < 8%

U3 = solos com 8% < CBR ou M-CBR < 12%

U4 = solos com CBR ou M-CBR > 12%

Planta Representativa da posição dos furos de sondagem

Largura da seção transversal do pavimento com sarjetas,
Identificação numérica e cada furo
Distância entre os furos
Larguras e nomes das ruas transversais

5.3 – Classificação dos Tipos de Tráfego

As vias urbanas a serem pavimentadas serão classificadas de acordo com o tráfego previsto para as mesmas, nos seguintes tipos:

Tráfego leve - Ruas de características essencialmente residenciais e locais, para as quais não é absolutamente previsto o tráfego de ônibus, podendo existir ocasionalmente passagens de caminhões em número não superior a 20 por dia, por faixa de tráfego, caracterizado por um número N típico de 10^5 solicitações do eixo simples padrão (100 kN - ESRD) para o período de projeto de 10 anos.

Tráfego médio - Vias coletoras secundárias, com limite máximo passagens de caminhões ou ônibus de 100 por dia, por faixa de tráfego, caracterizado por um número N típico de $5 \cdot 10^5$ solicitações do eixo simples padrão (100 kN - ESRD) para o período de projeto de 10 anos.

Na Tabela 16 é apresentado a classificação das vias associadas a ocorrência de tráfego quanto ao número de veículos de tipo leve e pesados: caminhões e ônibus, bem como, o número N de

solicitações do eixo padrão de 100 kN ESRD correlato aos limites máximos e mínimos de tráfego, como também o N característico.

Tabela 16 – Classificação de Vias – Tráfego Leve e Médio

Função Predominante	Tráfego Previsto	Vida de Projeto (anos)	Volume inicial da faixa mais carregada		N	N característico
			Veículo leve	Caminhões e Ônibus		
Via Local Residencial c/passagem	Leve	10	100	4	2,7 * 10 ⁴	10 ⁵
			a	a	1,4 * 10 ⁵	
			400	20		
Via Coletora Secundária	Médio	10	401	21	1,4 * 10 ⁵	5*10 ⁵
			a	a	6,8 * 10 ⁵	
			1500	100		

5.4 – Considerações sobre o Subleito

No propósito de orientar o projeto do pavimento são apresentadas algumas considerações sobre o subleito, a saber:

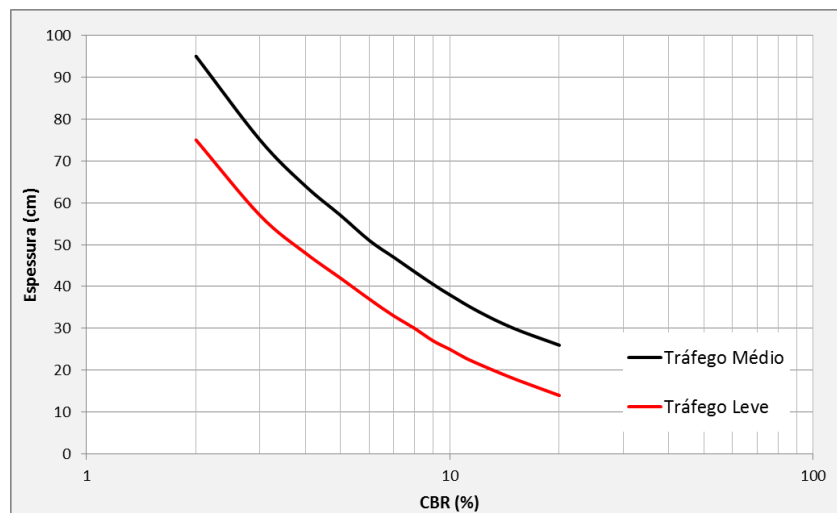
- A espessura do pavimento a ser construído sobre o subleito será calculada de acordo com o presente procedimento, em função do suporte (CBR ou M-CBR) como representativos de suas camadas, conforme demonstrado na Instrução de Projeto IP-01 – Instrução Geotécnica;
- No caso em que as sondagens indicarem a necessidade de substituição do subleito, deverá ser considerado o valor de suporte do solo de empréstimo;
- Na determinação do suporte do subleito, empregar-se-á o Ensaio Normal de Compactação de Solos (PMSP-ME-7) e a moldagem dos corpos-de-prova deverá ser feita com a energia de compactação correspondente;
- No caso de vias já dotadas de guias e sarjetas, reforços de pavimentos antigos ou de aproveitamento do leito existente, a determinação do índice de suporte do material (CBR_{subl} ou $Mini-CBR_{subl}$) poderá ser realizada *in situ*, conforme método ME-47 e ME-56, e pela determinação expedita do Mini-CBR por penetração dinâmica (ME-55 da SIURB/PMSP);
- No caso de ocorrência no subleito com suporte $< 2\%$, deverá ser feita sua substituição por solo com suporte $> 5\%$ e expansão $< 2\%$ na espessura indicada no projeto;
- Para subleitos com solos que apresentem expansão $\geq 2\%$ e suporte $CBR < 2\%$, deverá ser acrescida em projeto uma camada de reforço com no mínimo 40 cm de espessura sobre a camada final de terraplanagem, executada com solo selecionado com $CBR \geq 5\%$ e expansão $< 2\%$ (valores estatísticos);

- No caso de suporte $CBR > 2\%$ e expansão $\geq 2\%$, deverá ser determinada em laboratório a sobrecarga necessária para que o solo apresente expansão $< 2\%$. O peso próprio do pavimento projetado deverá transmitir para o subleito uma pressão igual ou maior à determinada pelo ensaio. Portanto, a espessura da estrutura do pavimento deve ser tal que leve o pavimento a apresentar peso superior ao peso determinado no ensaio; e,
- O projetista poderá utilizar outros critérios e soluções, desde que devidamente justificados e aceitos pela SIURB/PMSP.

5.5 – Espessura Total do Pavimento

Definido o tipo de tráfego do pavimento e determinado o suporte representativo do subleito, a espessura total básica do pavimento, em termos de material granular H_{SL} será de acordo com o ábaco da **Figura 29**.

Figura 29 - Ábaco de Dimensionamento para tráfego leve e médio SIURB/PMSP - (adaptação do método do Corpo de Engenheiros - USACE)



Na Tabela 17 são apresentadas as espessuras H_{sl} correlatas aos valores de CBR, para ambos os dois tipos de tráfegos.

Tabela 17- Valores das espessuras H_{sl} em função dos índices de CBR

CBR (%)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20
Tráfego Leve	75	56	48	42	37	33	30	27	25	23	21	18	14
Tráfego Médio	95	75	64	57	51	48	44	40	39		34	30	26

5.5.1 – Espessura da Camada de Rolamento

Os materiais empregados na camada de rolamento podem ser de pré-misturado a quente (PMQ) e/ou concreto asfáltico (CA). As espessuras e o tipo de material é função do tráfego, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Tipo de material do revestimento e espessura mínima

Tráfego	Tipo de revestimento	Espessura (cm)
Leve	PMQ	4,0
	CA	3,5
Médio	CA	5,0

5.5.2 – Espessuras das demais camadas

Uma vez determinada a espessura total do pavimento (H_{SL}) em termos de material granular, e fixada a espessura do revestimento (R) conforme Tabela 17, procede-se ao dimensionamento das espessuras das demais camadas, ou seja, da base, sub-base e do reforço do subleito, levando-se em conta os materiais disponíveis para cada uma delas, seus coeficientes de equivalência estrutural e suas capacidades de suporte, traduzidas pelos respectivos valores de CBR ou M-CBR.

As espessuras da base (B), sub-base (h_{SB}), e reforço do subleito (H_{REF}) são obtidas pela resolução sucessiva das inequações D, E e F respectivamente.

$$RK_R + BK_B \geq H_{SB} \quad D$$

$$RK_R + BK_B + h_{SB} K_{SB} \geq H_{REF} \quad E$$

$$RK_R + BK_B + h_{SB} K_{SB} + H_{REF} K_{REF} \geq H_{SL} \quad F$$

Onde:

- K_R coeficiente estrutural do revestimento
- K_B coeficiente estrutural da base
- K_{SB} coeficiente estrutural da sub-base
- K_{REF} coeficiente estrutural do reforço do subleito
- H_{SB} espessura fornecidas pela figura 01 para CBR_{SB} ou M-CBR_{SB}
- H_{REF} espessura fornecidas pela figura 01 para CBR_{REF} ou M-CBR_{REF}
- H_{SL} espessura fornecidas pela figura 01 para CBR_{SL} ou M-CBR_{SL}

Na IP-04 da PMSP são apresentadas estruturas tipos que podem ser utilizadas (ao final desse capítulo), desde que se disponha dos materiais previstos. Assim as inequações 4 e 5 para determinação das camadas de base, sub-base respectivamente, é uma opção que o método dispõe, entretanto, caso a espessura de base obtida com a inequação for inferior às espessuras mínimas recomendadas na Tabela 18, devem ser consideradas espessuras da Tabela 18.

Na

Figura 30 é apresentado esquema elucidativo de estrutura tipo com todas as camadas, conforme método de dimensionamento de pavimentos flexíveis para tráfego médio IP-04 da PMSP.

Figura 30 - Esquema elucidativo PMSP para tráfego médio.

H_{SL}	H_{REF}	H_{SB}	R	KR	
			B	KB	
			h_{SB}	K_{SB}	CBR_{SB}
			h_{REF}	K_{REF}	CBR_{REF}
CBR_{SL}					

A estrutura do pavimento poderá conter sub-base ou não, a critério do projetista, normalmente, a supressão da sub-base se dá quando se adota base tipo mista² constituída de macadame betuminoso e macadame hidráulico, de forma que essa última assume o papel de sub-base, nesse caso, será adotado nessa apostila o emprego de base mista somente para tráfego leve. Pode-se também, em uma estrutura não apresentar a camada de reforço de subleito, isso se dá quando a capacidade de suporte do subleito é suficientemente elevada de forma a dispensar essa camada. Devido a essas condicionantes as inequações D, E e F podem alterar-se para as equações G e H:

$$RK_R + BK_B \geq H_{REF} \quad G$$

$$RK_R + BK_B \geq H_{SL} \quad H$$

Na Figura 31 é apresentado o esquema de uma estrutura com base mista (tráfego leve).

Figura 31 - Esquema elucidativo PMSP para tráfego leve com base mista

H_{SL}	H_{REF}	R	K_R	
		MB	K_{MB}	Base mista
		MB	k_{MH}	
		h_{REF}	K_{REF}	CBR_{REF}
CBR_{SL}				

Reitera-se que:

- adotaremos nessas notas de aula a opção de base mista somente para tráfego leve.
- A camada de reforço do subleito é opcional, tanto para tráfego tipo leve o médio. Utiliza-se em função da baixa capacidade de suporte do subleito.

² A adoção de base tipo mista no método de dimensionamento da PMSP, está relacionado diretamente ao processo construtivo da camada de base. Normalmente, se espalha a camada granular em espessura única, aplica-se uma camada de emulsão asfáltica (com barra espargidora ou caneta de aplicação) que penetra alguns centímetros, e procede-se com a compactação. Ao final, tem-se uma camada de macadame hidráulico (BGS) como "sub-base" e uma de macadame betuminoso como base.

- (iii) Embora, no dimensionamento, a espessura da base mista seja determinada de uma única vez, ao final da execução em pista, obtém-se duas camadas: base de macadame betuminoso e "sub-base" de macadame hidráulico.

5.5.3 – Espessuras mínimas de base recomendadas

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis IP 04 da PMSP especifica espessuras mínimas para a camada de base (Tabela 19)

Tabela 19 - espessuras mínimas de base recomendadas

Tráfego	Material	Espessura (cm)
Leve (base mista)	Macadame betuminoso (MB)	5,0
	Brita graduada simples (BGS) / Macadame hidráulico (MH)	10,0
Médio	MB=5cm / PMQ = 4,0 cm / Binder = 4,0 cm Ligação	5,0 / 4,0 / 4,0
	Brita graduada simples (BGS) / Macadame hidráulico (MH)	10,0

A base mista constitui uma camada de macadame betuminoso sobre uma camada de macadame hidráulico, com espessuras mínimas de 5,0 cm e 10 cm respectivamente. Podendo ter sua camada de macadame betuminoso preparada em usina o executada em pista. Quando executada em pista, parte superior da camada de macadame hidráulico recebe aplicação de imprimação de ligante asfáltico (emulsão) e em seguida é compactada formando a camada de macadame betuminoso.

Registra-se que na determinação das espessuras das camadas de base e do revestimento devem, necessariamente, apresentar valores no mínimo os recomendados nas Tabelas 17 e 18.

5.5.4 – Características estruturais de base recomendadas

As camadas de sub-bases e bases de BGS, MH ou estabilizadas granulometricamente, além da obediência às especificações contidas nas normas correspondentes, os materiais ou misturas de materiais deverão satisfazer as exigências de CBR e de expansão máxima medidas com sobrecarga de 4,5 kg (Tabela 20).

Tabela 20 - Valores mínimos de CBR e máximos de expansão para materiais de base e sub-bases

Camada	CBR (%)	Expansão (%)
Base	≥ 80	≤ 0,5
Sub-bases	≥ 30	≤ 1,0

5.6 – Coeficiente de Equivalência Estrutural

Coeficiente de equivalência estrutural de um material é definido como a relação entre as espessuras de uma base granular e de uma camada de material considerado, que apresente o mesmo comportamento estrutural, ou seja, considera-se que uma camada de 10 cm de um material com coeficiente de equivalência estrutural igual a 1,5 apresenta comportamento igual ao de uma camada de 15 cm de base granular.

Estão apresentados na **Figura 32** os coeficientes estruturais dos materiais normalmente empregados como camada de pavimento de acordo com as instruções de execução da SIURB/PMSP.

Figura 32 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais

Camada do Pavimento	Coeficiente estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento de concreto magro/CCR	2,0
Base ou revestimento de Pré-Misturado a Quente, de graduação Densa / Binder	1,8
Base ou revestimento de Pré-Misturado a Frio, de Graduação Densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Paralelepípedos	1,0
Base de brita graduada simples (BGS) Macadame hidráulico (MH) e estabilizadas granulometricamente	1,0
Sub-bases granulares ou estabilizadas com aditivos	≤ 1,0
Reforço do subleito	≤ 1,0
Base de solo cimento (SC) ou BGTC, com resistência à compressão aos 7 dias, superior a 4,5 MPa	1,7
Base de BGTC com resistência à compressão aos 7 dias entre 2,8 e 4,5 MPa	1,4
Base de solo cimento (SC), com resistência aos 7 dias, menor que 2,8 e maior ou igual a 2,1 MPa	1,2
Base de solo melhorado com cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,1 MPa	1,0

Os coeficientes estruturais da sub-base granular e do reforço do reforço do subleito serão obtidos pelas Equações 14 e 15. Na adoção de base mista a camada de MH, denominada de sub-base, adota-se coeficiente estrutural = 1,0.

$$K_{SB} = \sqrt[3]{\frac{CBR_{SB}}{3 * CBR_{REF}}} < 1 \quad 14$$

$$K_{REF} = \sqrt[3]{\frac{CBR_{REF}}{3 * CBR_{SL}}} < 1 \quad 15$$

Mesmo que o CBR do reforço ou da sub-base seja superior a 30% deverá ser considerado como se fosse igual a 30% para efeito de cálculo das relações acima. Se na relação o K_{SB} ou K_{REF} apresentar valores maiores que 1,0, considerar o coeficiente estrutural de 1,0.

Quando pavimentos antigos de paralelepípedos forem beneficiados com revestimentos betuminosos o valor do coeficiente de equivalência estrutural do pavimento existente poderá variar de 1,2 e 1,8, em função do comportamento, abaulamento e rejuntamento dos paralelepípedos.

5.7 – Exemplos de dimensionamento

É previsto no método a determinação do CBR de projeto do subleito correspondente a um segmento homogêneo. Para tal, determina-se o CBR médio, o desvio padrão e considerando-se um nível de confiabilidade de 90% (t de Student 90%) determina-se o CBR de projeto³.

Tráfego leve (exercício resolvido 1)

Dimensionar o pavimento, conforme preconiza a Instrução de Projeto de Pavimentos flexíveis IP-04 da SIURB/PMSP, de um trecho de uma via compreendido entre as estacas 100 e 152 (dados abaixo), conhecendo-se os respectivos CBR_{subl} de cada estaca considerada.

Estacas	CBR_{subl}
100	14
104	10
108	13
112	11
116	12
120	12
124	12
128	11
132	12
136	11
140	12
144	13
148	12
152	13
Média	12
Desv. Padrão	1,04
CBR_p (projeto)	11

Média

$$\overline{CBR} = \frac{\sum CBR_i}{n}$$

Desvio padrão

$$s = \sqrt{\frac{\sum (CBR_i - \overline{CBR})^2}{n - 1}}$$

CBR_p (projeto)

$$CBR_p = \overline{CBR} - \frac{s * t_{0,90}}{\sqrt{n}}$$

Adotar camada de revestimentos asfáltico de 3,5 cm $K_R = 2,0$ e base mista constituída de macadame betuminoso $K_{MB} = 1,2$ (Figura 23 - base ou revestimento asfáltico por penetração) e macadame hidráulico $K_{MH} = 1,0$.

³ (shift mode (all 3) enter (limpar)/ Mode
1(média) 2(desvio padrão)

sd/inserir valores M+/ ao final shift 2 (S-VAR)
3(desvio padrão amostral - adotar esse)

Resumo de dados

Revestimento = 3,5 cm	$K_R = 2,0$
Base MB	$K_{MB} = 1,2$
Base MH	$K_{MH} = 1,0$
CBR_{subl}	11%

Determinação da espessura da camada de base.

Com o valor de CBR_{subl} , e auxílio da Figura 21 ou a tabela 16, obtém-se a espessura total do pavimento H_{SL} , correspondente a um material de granular - $H_{SL} = 23$ cm. Observe-se que não foi mencionado material de reforço de subleito, assim, a camada de base será assente sobre o subleito.

Aplicando-se a inequação 8 temos:

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{SL}$$

$$3,5 \cdot 2,0 + B \cdot 1,0 \geq 23$$

$$B \geq 23 - 7 \quad \text{portanto,}$$

$B = 16$ cm Observe-se que a espessura da base foi superior ao especificado como espessura mínima Tabela 18.

A base deverá ser tipo base mista constituída de MB e MH. A sequência de material de cima para baixo é: revestimento, macadame betuminoso seguido de macadame hidráulico, assente sobre o subleito pois conforme (já mencionado) dados não se dispõe de material de reforço de subleito.

Adotando-se 5,0 de espessura para o MB (A espessura de MB adotada deve ser no mínimo a espessura recomendada de 5,0 cm e por uma questão de processo construtivo, espessuras maiores podem não ser alcançada.) temos:

$$MB \cdot K_{MB} + MH \cdot K_{MH} = B$$

$$5,0 \cdot 1,2 + MH \cdot 1,0 = 16 \quad \text{portanto,}$$

$$MH = 10 \text{ cm} \quad \text{Da mesma forma, a espessura obtida foi superior a recomendada Tabela 18}$$

As espessuras das camadas do pavimento serão:

Camada	Espessura executada (cm)	Espessura equivalente (cm)
Revestimento	3,5	7,0
Base MB	5,0	6,0
Base MH	10	10
Total	18,5 cm	23 cm

A somatória das espessuras equivalentes das camadas do pavimento satisfaz a espessura H_{SL} , portanto, o dimensionamento é satisfatório.

Observe-se que nessa estrutura não foram fornecidos materiais para camadas de sub-base e de reforço de subleito. Devido a capacidade de suporte do subleito, foi suprimida a camada de reforço e a base sendo mista a camada de macadame hidráulico pode-se associada como camada de sub-base.

A função estrutural de uma dada camada é preponderante a sua denominação. Na camada de base deve ser utilizado um material que corresponda estruturalmente a essa camada e que na estrutura seja posicionada entre a camada de rolamento e a camada de sub-base e da mesma forma às demais camadas. Uma camada de MH ser denominada de sub-base ou de base mista é pouco significativo. Figura 33.

Figura 33 - Associação de camadas

Revestimento = 3,5 cm		Revestimento = 3,5 cm	
Base mista	MB = 5,0 cm	Base de MB = 5,0 cm	
	MH = 10 cm	Sub-base de MH = 10 cm	
subleito		subleito	

Tráfego leve (exercício resolvido 2)

Dimensionar a estrutura de um pavimento conforme dados abaixo:

Parâmetros	Material / espessura	K
Tráfego leve		
Revestimento	PMQ / 4 cm	1,8
Base mista	MB / 5,0 cm (mínimo)	1,2
	MH	1,0
Reforço do subleito	CBR = 11%	
Subleito	CBR _{projeto} = 6%	

Determinação da espessura da base mista, observe-se que como foi fornecido material de reforço, a camada de base mista será assente sobre o reforço.

Com o valor de $CBR_{REF} = 11\%$, e auxílio da Figura 21 ou a tabela 18, obtém-se a espessura total do pavimento H_{REF} , correspondente a um material de granular - $H_{REF} = 23$ cm.

Aplicando-se a inequação 7 temos:

$$R \cdot K_R + B \cdot K_B \geq H_{REF}$$

$$4,0 \cdot 1,8 + B \cdot 1,0 \geq 23$$

$$B \geq 23 - 7,2 \quad \text{portanto,}$$

$$B = 15,8 \text{ cm}$$

Espessura da camada de MH

$$MB * K_{MB} + MH * K_{MH} \geq B$$

$$5,0 * 1,2 + MH * 1,0 \geq 15,8 \text{ cm}$$

$$MH \geq 9,8 \text{ cm.} \quad \text{Portanto,}$$

$$MH = 10 \text{ cm}$$

Espessura da camada de reforço do subleito

Com o valor de $CBR_{SL} = 6\%$, e auxílio da Figura 21 ou a tabela 18, obtém-se a espessura total do pavimento H_{SL} , correspondente a um material de granular - $H_{REF} = 37 \text{ cm}$

Aplicando a equação 6: (observe-se que a camada hSB faz parte da base mista)

$$RK_R + BK_B + H_{REF} K_{REF} \geq H_{SL}$$

$$RK_R + (MH * K_{MH} + MB * K_{MB}) + h_{REF} K_{REF} \geq H_{SL}$$

$$4,0 * 1,8 + (5,0 * 1,2 + 10 * 1,0) + h_{REF} * 0,85 \geq 37$$

$$7,2 + 16 + h_{REF} * 0,85 \geq 37$$

$$h_{REF} = 13,8 / 0,85 \geq 16,23 \text{ cm} \quad \text{portanto}$$

$$h_{REF} = 17 \text{ cm}$$

$$K_{REF} = \sqrt[3]{CBR_{REF} / 3 * CBR_{SL}}$$

$$K_{REF} = \sqrt[3]{11 / 3 * 6}$$

$$K_{REF} = 0,85$$

As espessuras das camadas do pavimento serão:

Camada	Espessura executada (cm)	Espessura equivalente (cm)
Revestimento	4,0	7,2
Base MB + MH	5,0	6,0
	10	10
Reforço do subleito	17	14,45
Total	36 cm	37,65 cm

A somatória das espessuras equivalentes das camadas do pavimento satisfaz a espessura H_{SL} , portanto, o dimensionamento é satisfatório.

Tráfego médio (exercício resolvido 3)

Dimensionar a estrutura de um pavimento conforme dados abaixo:

Parâmetros		Material / espessura	K
Tráfego médio			
Revestimento		CA / 5 cm	2,0
Base	Ligação	(MB = 5,0cm K=1,2) ou (PMQ=4,0 cm K=1,4) ou (Binder = 4 cm K=1,8)	1,2 / 1,4 / 1,8
	base	MH ou BGS = 10 cm	1,0
Reforço do subleito		CBR (%)	$K_{REF} = \sqrt[3]{CBR_{REF}/3 * CBR_{SL}}$
Subleito		CBR _{projeto} = 7%	

Com o valor de $CBR_{REF} = 20\%$, e auxílio da Figura 21 ou a Tabela 17, obtém-se a espessura total do pavimento H_{REF} , correspondente a um material de granular $H_{REF} = 26$ cm.

Aplicando-se a inequação 4 temos:

$$R * K_R + B * K_B \geq H_{REF}$$

$$R * K_R + \text{Ligação} * K_{\text{Ligação}} + B * K_B \geq H_{REF}$$

$$5,0 * 2 + \text{Binder} * K_{\text{Binder}} + \text{MH} * K_{\text{MH}} \geq 26$$

$$10 + 4 * 1,8 + 10 * 1,0 \geq 26$$

27,2 > 26 portanto, as espessuras do revestimento, camada de ligação e da base satisfazem a condição

Espessura da camada de reforço do subleito

$$R K_R + \text{ligação} * K_{\text{ligação}} + B K_B + H_{REF} K_{REF} \geq H_{SL}$$

$$R K_R + \text{Binder} * K_{\text{Binder}} + \text{MH} * K_{\text{MH}} + h_{REF} K_{REF} \geq H_{SL}$$

$$5,0 * 2,0 + 4 * 1,8 + 10 * 1,0 + h_{REF} * 0,98 \geq 48$$

$$27,2 + h_{REF} * 0,98 \geq 48$$

$$h_{REF} = (48 - 27,2) / 0,98$$

$$K_{REF} = \sqrt[3]{\frac{CBR_{REF}}{3 * CBR_{Sub-leito}}}$$

$$K_{REF} = \sqrt[3]{\frac{20}{3 * 7}}$$

$$h_{REF} = 21 \text{ cm}$$

$$K_{REF} = 0,98$$

As espessuras das camadas do pavimento serão:

Camada	Espessura (cm)	Espessura equivalente (cm)
Revestimento	5,0	10
Ligação (binder)	4,0	7,2
Base MH	10	10
Reforço do subleito	21	24,5
Total	40	51,5 cm

A somatória das espessuras equivalentes das camadas do pavimento satisfaz a espessura H_{SL} , portanto, o dimensionamento é satisfatório.

Exercícios

Ex-1		Ex-2		Ex-3		Ex-4		Ex-5	
Estacas	CBR _{SL}	Estacas	CBR _{SL}	Estacas	CBR _{SL}	Estacas	CBR _{SL}	Estacas	CBR _{SL}
72	6	12	13	45	3	118	8	721	2
73	5	13	12	47	4	120	9	722	3
74	4	14	11	49	5	122	8	723	2
75	5	15	10	51	3	124	7	724	2
76	5	16	11	53	5	126	8	725	3
77	5	17	13	55	4	128	8	726	4
78	5	18	12	57	4	130	9	727	2
79	5	19	12	59	3	132	8	728	4
80	5	20	14	61	3	134	6	729	3
81	5	21	12	63	5	136	8	730	5
82	5	22	10	65	3	138	9	731	4
83	4	23	13	67	4	140	7	732	3
84	5	24	12	69	5			733	3
85	4	25	11	71	3			734	2
86	6	26	12	73	5				
87	6	27	13	75	5				
Média		Média		Média		Média		Média	
D.Padrão		D.Padrão		D.Padrão		D.Padrão		D.Padrão	
CBR proj.		CBR proj.		CBR proj.		CBR proj.		CBR proj.	
Tráfego Leve		Tráfego Leve		Tráfego Médio		Tráfego Médio		Tráfego Médio	
Base mista		Base mista							
CBR _{REF}	11%	CBR _{REF}		CBR _{REF}	10%	CBR _{REF}	12%	CBR _{REF}	10%

Distribuição t de Student

gl	$p(t_p \leq T)$							
1	0,600	0,750	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995	0,9995
2	0,325	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
3	0,289	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
4	0,277	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
5	0,271	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
6	0,267	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
7	0,265	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
8	0,263	0,711	1,415	1,895	2,365	2,993	3,499	5,408
9	0,262	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
10	0,261	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
11	0,260	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
12	0,260	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
13	0,259	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
14	0,259	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
15	0,258	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
16	0,258	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
17	0,258	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
18	0,257	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
19	0,257	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
20	0,257	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
21	0,257	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
22	0,257	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
23	0,256	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
24	0,256	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
25	0,256	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
26	0,256	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
27	0,256	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
28	0,256	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
29	0,256	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
30	0,256	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
40	0,255	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
60	0,255	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
120	0,254	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
∞	0,254	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,253	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

5.8 – Superestruturas tipos

Na Figura 34 são apresentadas quatro superestruturas típicas recomendadas para revestimento e base para subleito com CBR = 11% e para solos pertencentes aos universos U1 e U2.

Figura 34 - Superestruturas tipo de pavimentos para tráfego leve

PMQ	4,0 cm
IMP LIGANTE	
MB	5,0 cm
IMP IMPERM	
MH	10,0 cm
subleito compactado a 100% da energia normal CBR $\geq$ 11%	15,0 cm

CAUQ	3,5 cm
IMP LIGANTE	
MB	5,0 cm
IMP IMPERM	
MH	10,0 cm
subleito compactado a 100% da energia normal CBR $\geq$ 11%	15,0 cm

PMQ	4,0 cm
IMP LIGANTE	
MB	5,0 cm
IMP IMPERM	
MH	10,0 cm
REFORÇO SUBLEITO CBR $\geq$ 11%	H ref
subleito compactado a 100% da energia normal CBR variável	15,0 cm

CAUQ	3,5 cm
IMP LIGANTE	
MB	5,0 cm
IMP IMPERM	
MH	10,0 cm
REFORÇO SUBLEITO CBR $\geq$ 11%	H ref
subleito compactado a 100% da energia normal CBR variável	15,0 cm

Caso o projetista adote as superestruturas indicadas nas Figura 35 para dimensionamento da estrutura do pavimento com tráfego médio, ficará restrito à determinação das características e espessuras das camadas de reforço de subleito e ou sub-base

Figura 35 - Superestruturas tipos de pavimentos para tráfego médio

CAUQ	5,0 cm
IMP LIGANTE	
MB	5,0 cm
IMP IMPERM	
MH/BGS	10,0 cm
subleito compactado a 100% da energia normal CBR $\geq$ 19%	15,0 cm

CAUQ	5,0 cm
IMP LIGANTE	
PMQ/BINDER	4,0 cm
IMP IMPERM	
MH/BGS	10,0 cm
subleito compactado a 100% da energia normal CBR $\geq$ 19%	15,0 cm

CAUQ	5,0 cm
IMP LIGANTE	
MB	5,0 cm
IMP IMPERM	
MH/BGS	10,0 cm
REFORÇO SUBLEITO CBR $\geq$ 19%	H ref
subleito compactado a 100% da energia normal CBR variável	15,0 cm

CAUQ	5,0 cm
IMP LIGANTE	
PMQ	4,0 cm
IMP IMPERM	
MH/BGS	10,0 cm
REFORÇO SUBLEITO CBR $\geq$ 19%	H ref
subleito compactado a 100% da energia normal CBR variável	15,0 cm

6.1 – Análise mecânica de estruturas de pavimentos

6.1.1 – Teoria da Elasticidade Aplicada à Pavimentos

Conforme mencionado anteriormente, uma estrutura de um dado pavimento deve suportar as cargas oriundas do tráfego, nas condições climáticas locais, de maneira a oferecer o desempenho desejável para as suas funções de conforto ao rolamento e segurança ao usuário. Devido ao baixo número de veículos associado a baixa carga por eixo que solicitavam as vias no passado, inúmeros métodos de dimensionamento eram utilizados por engenheiros, de maneira relativamente fácil. Esses métodos trazem consigo certo grau de empirismo juntamente com experiência adquiridas pelos diversos órgãos rodoviários ao longo dos anos.

O método mais difundido até nossos dias é o método do CBR desenvolvido por Porter na década de 20 (século passado) no DOT da Califórnia USA. Foi aperfeiçoado pelo USACE durante a 2ª. Grande Guerra para emprego de maiores cargas solicitantes. Uma variante desse método é método de dimensionamento de pavimentos do DNIT, bastante utilizado no Brasil.

Entretanto, devido ao empirismo intrínseco do método e a validação (desempenho estrutural) obtida através de um número de coberturas de pousos e decolagem de aeronaves, quando transportado para o meio rodoviário esse número se traduz em baixo número de solicitações, tem resultado em estruturas superdimensionadas para baixos números N e estruturas subdimensionadas para elevados números N.

Face a essas limitações, após o dimensionamento da estrutura do pavimento, numa forma de corrigir estruturalmente as camadas do pavimento, tem-se verificado os níveis de tensões, deformações e deslocamentos em pontos críticos da estrutura. Caso se constate que em algum ponto crítico da estrutura em análise, esteja com solicitação acima da admissível, procede-se com modificações da estrutura:

- i. Alteração da espessura de uma ou mais camadas;
- ii. Emprego de ligantes asfálticos com propriedades reológicas mais favoráveis na camada de revestimento;
- iii. Soma ou subtração de alguma camada;
- iv. Modificação de material – cimentado, granular etc.,

Entretanto, salienta-se que a estrutura alterada deve possuir no mínimo as espessuras oriundas do método de dimensionamento. Essas alterações implicam na disponibilidade de materiais e custo.

Com os dados de entrada: (i) espessuras das camadas, (ii) módulo de resiliência e (iii) coeficiente de Poisson de cada camada e através de vários programas computacionais, sendo em sua

maioria com base em MEF, se obtém tensões de tração e de compressão, deslocamentos e deformações também de tração e de compressão em vários pontos da estrutura, normalmente, tem-se dado atenção aos pontos críticos.

Por exemplo, quando se utiliza a análise mecanicista em camadas de rolamento, é dada atenção a deformação de tração na fibra inferior. Devido a rigidez da mistura asfáltica tem-se monitorado a deformação de tração (ϵ_t), pois esse tipo de material apresenta elevada deformação para baixos níveis de tensão. Observe-se que, as misturas asfálticas empregadas em camada de rolamento, quando aplicadas com espessuras (normalmente acima de 4 cm) propiciam a formação de linha neutra, ou seja, a parcela superior a linha neutra está sob tensão de compressão e outra (a inferior) sob tensão de tração.

Não faz sentido a análise da resistência compressão de misturas asfálticas, pois esse material oferece boa resistência à compressão, se comparada com a resistência à tração. Logo, a atenção é quanto a deformação de tração (ϵ_t) na fibra inferior da camada de rolamento. Um possível problema decorrente de baixa resistência à compressão das misturas asfálticas é a formação de trilha de roda. Nesse quesito não se pode prever o desempenho de uma camada através da teoria da elasticidade.

De forma análoga, tem-se dado atenção a fibra inferior de camadas cimentadas. Esse tipo de material também oferece baixa resistência à tração, na ordem de 10% do valor da resistência à compressão. Tem-se registrado a propagação de trincas na camada de rolamento, oriundas da camada cimentada, o trincamento da camada cimentada implica, necessariamente, na rápida evolução de trincamento da camada de rolamento. O retardamento desse rápido trincamento pode ser feito com a utilização de uma camada de BGS entre a camada cimentada e a camada de rolamento, nesse caso tem-se o pavimento tipo invertido.

Devido a rigidez dos materiais cimentados, o que implica em elevado valor de módulo de resiliência, tem-se monitorado a tensão de tração (σ_t), pois são mais mensuráveis que os valores de deformação, ao contrário do que ocorre com a mistura asfáltica.

Outro ponto a ser considerado na análise mecanicista é a tensão vertical no topo do subleito, caso ocorra uma tensão superior a admissível, pode ocorrer deformação permanente. Através de modelos com base no CBR ou em tensão admissível pode-se constatar se a estrutura está compatível em minimizar a tensão vertical no subleito. Resumidamente, monitoramos os pontos apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Pontos críticos e parâmetros monitorado

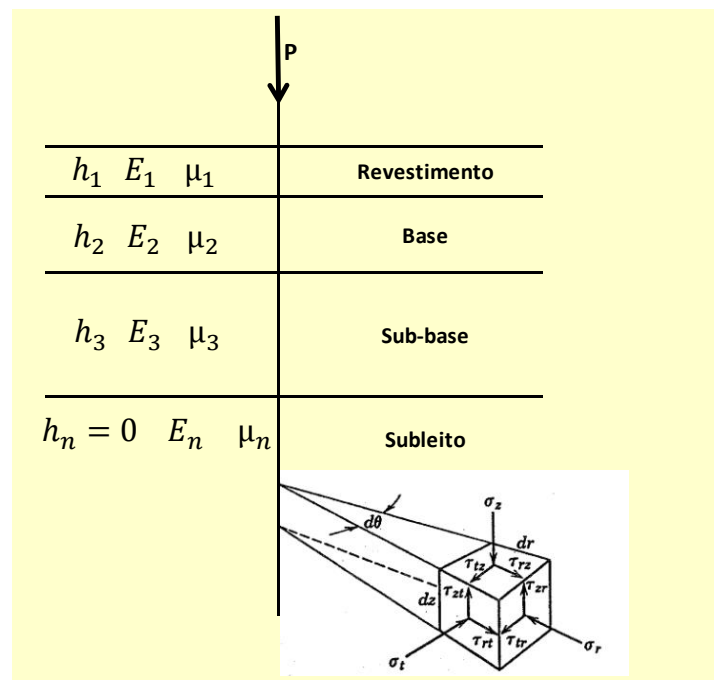
Camada	Parâmetro monitorado	Local
Revestimento de CA	Deformação de tração	Fibra inferior
Base ou sub-bases cimentadas	Tensão de tração	Fibra inferior
Subleito	Tensão vertical	Topo

Além dos parâmetros de tensão e deformação abordados, tem-se utilizado o parâmetro deslocamento, normalmente, para empregado em controle tecnológico nas construções de camadas e na determinação de camadas de reforço de pavimento existente.

6.1.1.1 - Deformações em pavimentos flexíveis

Com base na Lei de Hooke Generalizada, na Figura 36 é apresentado esquematicamente um sistema elástico generalizado de múltiplas camadas constituído de: (i) camada de revestimento de concreto asfáltico, (ii) camada de base, (iii) camada de sub-base e (iv) subleito, sendo esse último com espessura infinita, pode ter ainda camada de reforço do subleito. Todas as camadas com parâmetros de módulo (E) e coeficiente de Poisson (μ).

Figura 36 - Sistema elástico generalizado de múltiplas camadas



No ponto considerado na Figura 38, sob a ação da carga P e na camda de subleito, existem 9 tensões, sendo três denominadas de tensões normais (σ_z , σ_r e σ_t) atuando perpendicularmente nas faces do elemento e seis tensões de cisalhamento (σ_{rt} , σ_{tr} , σ_{rz} , σ_{zr} , σ_{tz} e σ_{zt}) atuando paralelamente às faces do elemento. A condição de equilíbrio estático do elemento mostra que a ação das tensões de cisalhamento que agem nas faces do elemento são iguais. Assim, $\tau_{rz} = \tau_{zr}$, $\tau_{rt} = \tau_{tr}$ e $\tau_{tz} = \tau_{zt}$. Em cada ponto do sistema, a orientação do elemento é de tal que a força

cisalhante em cada face seja zero. As tensões normais sobre essas condições são definidas como tensões principais e são definidas por σ_1 denominada de tensão principal maior, σ_2 tensão principal intermediária e σ_3 como tensão principal menor. Define-se como invariante de tensões θ a soma das tensões principais de cisalhamento no ponto e, dado o estado triaxial de tensões do elemento, as deformações volumétricas que mede a variação relativa de um cubo de arestas dr , dt e dz podem ser obtidas como as seguintes equações 17, 18 e 19:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)) \quad (17)$$

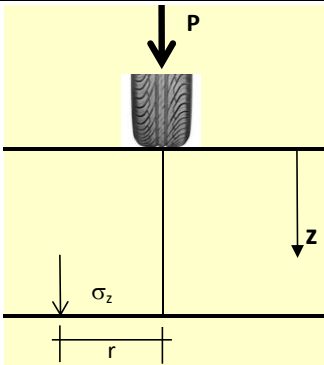
$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)) \quad (18)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)) \quad (19)$$

6.1.1.2 - Sistemas de múltiplas camadas

De acordo com Boussinesq, uma estrutura de uma camada sob ação de uma carga, é possível determinar a tensão vertical (σ_v) a qualquer profundidade (z) e distante do eixo da carga (Figura 37) com as equações 20 e 21

Figura 37 - Estrutura de uma camada sob ação de uma carga.

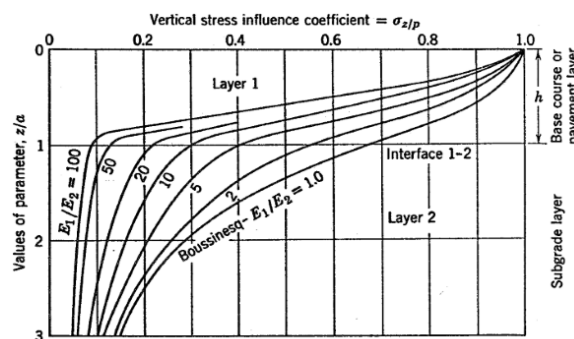
	
	$\sigma_z = k \frac{P}{z^2} \quad (20)$
	$k = \frac{3}{2\pi} * \frac{1}{[1+(r/z)^2]^{5/2}} \quad (21)$

Onde: r = distância radial do eixo da carga
 z = profundidade

Yoder e Witczak (1975) apresentam o trabalho (cartas) desenvolvido por Foster e Alvin que posteriormente foi aperfeiçoado por Alvin e Ulery. Essas cartas fornecem coeficientes que permitem a obtenção dos parâmetros de tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto de uma massa homogênea, para coeficiente de Poisson = 0,5.

Para estruturas com duas camadas, o modelo apresentado por Burmister (Figura 38) permite a determinação dos parâmetros de tensões e deflexões, sendo que as camadas devem ser homogêneas, elásticas e isotrópicas. O modelo baseia-se na relação modular entre as camadas E_1/E_2 , sendo E_1 o módulo da 1ª camada e E_2 o módulo da 2ª camada (subleito). Com dados de entrada da relação modular e a profundidade do ponto em questão expresso em unidades de raio da carga aplicada, obtém-se a tensão vertical expressa em pressão de contato (psi).

Figura 38 - Base padrão das curvas de influência das tensões
Burmister para duas camadas.



Para obtenção das deflexões (Δ), Burmister apresenta a equação 22 para pavimentos flexíveis:

$$\Delta = 1,5 * \frac{pa}{E_2} F_2 \quad (22)$$

Onde:

- p = carga de roda sob área circular
- a = raio da área de contato
- E_2 = módulo da camada inferior
- F_2 = fator adimensional dependente da relação modular do subleito e da sub-base, bem como a profundidade expressa em raios. Os valores de F_2 são obtidos em curvas encontradas no trabalho de Burmister.

Huang (2004) apresenta ábaco, semelhante ao de Burmister, desenvolvido em 1962, para obtenção de coeficiente de deflexão entre duas camadas.

Por fim, Jones e Peatiie (1962) equacionaram estruturas com 3 camadas com procedimentos análogos ao exposto por Burmister, com emprego de planilhas e ábacos.

Observe-se na Figura 39 que a ordem de grandeza dos valores das tensões verticais é superior aos valores das tensões horizontais (radiais). Pode-se observar também que os valores são maiores quando a carga de roda está na projeção vertical sob o ponto considerado. Nessa condição a tensão de cisalhamento é nula.

Os pontos críticos quanto as tensões verticais de compressão (topo do subleito), deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento e tensão horizontal de tração na camada de base (cimentada) de uma estrutura de pavimento flexível ou semirrígido são apontados na Figura 40. Devido a projeção das duas cargas de roda o eixo vertical mais solicitado, para a camada de revestimento é na borda interna das rodas. Para as camadas inferiores o eixo mais solicitado é entre as duas rodas.

Figura 39 - Tensões: verticais, horizontais e de cisalhamento sob ação da carga

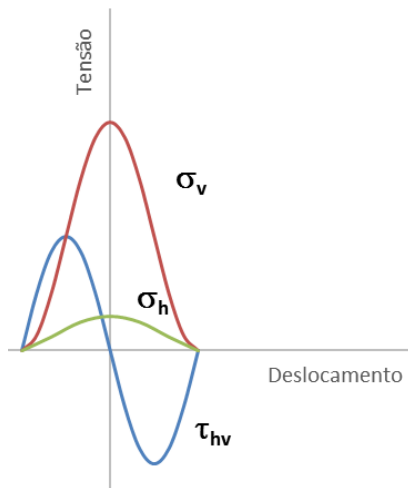
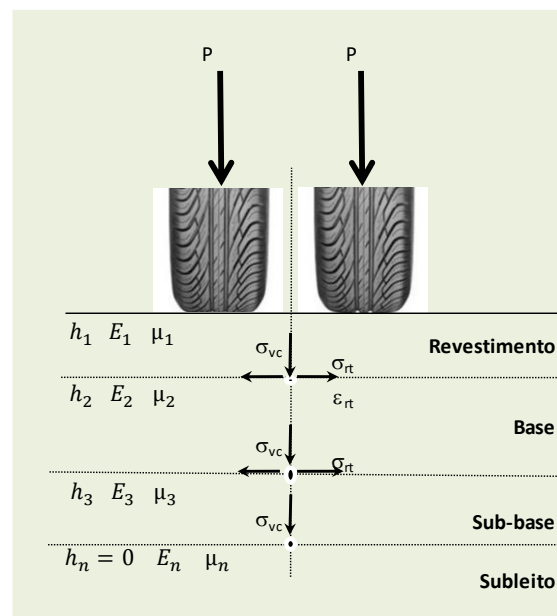


Figura 40- Pontos críticos considerados para análise dos parâmetros.



6.1.2 - Modelos para verificação à fadiga

Todo material submetido a carregamento cíclico ou alternado, com intensidade inferior a carga estática capaz de levar o material a ruptura, se, após um determinado número (N) de ciclos ocorrer a ruptura, compreende-se que ocorreu a ruptura por fadiga. Dependendo da rigidez do material tem-se adotado o monitoramento das solicitações por carga ou por deformação. Equações que relacionam o número de ciclos (N) a deformação ou a tensão dá-se o nome de modelos de fadiga. Devido ao elevado número de solicitações os modelos são apresentados em equações exponenciais.

Modelos de fadiga de mistura asfáltica podem ser obtidos, em laboratório, conforme preconiza a norma DNIT 183/2018 - ME Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. São moldados vários corpos de prova com as mesmas características: distribuição granulométrica, teor de ligante asfáltico e volume de vazios. O ensaio é conduzido em corpos de prova climatizados a temperatura de 25°C. Inicialmente, determina-se a média da resistência à tração por compressão diametral de no mínimo três corpos de prova.

O ensaio é conduzido em corpo de prova tipo Marshall ou obtidos no compactador giratório e com carregamento vertical diametral pulsante, o que gera uma tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada que provoca a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical.

Conjuntos de corpos de prova (três no mínimo) são submetidos a carregamento cíclico 1 Hz, com duração da aplicação de carga de 0,1 s e repouso de 0,9 s, com níveis de intensidade de carga na ordem de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% da carga média da resistência à tração por compressão diametral. Registra-se que, modelos de fadiga de misturas asfálticas gerados por deformação são mais representativos.

Outro tipo de corpos de prova como procedimento para obtenção de curvas de fadiga é com emprego de vigotas prismáticas em quatro apoios. Sendo os dois apoios externos fixos e os dois centrais proporcionam deslocamentos que geram deformações na fibra inferior da vigota. O ensaio é conduzido, a deformação controlada a uma frequência de 20 Hz e a 20°C. O equipamento controla a carga que gera a deformação de ensaio e conforme ocorre o aumento do número de ciclos a mistura vai perdendo integridade e dessa forma o equipamento vai diminuindo a carga de forma a manter a mesma deformação. Quando a carga atinge 50% da carga inicial considera que a mistura asfáltica rompeu por fadiga.

A vida de fadiga é o número total de aplicações de carga que provoca a ruptura do corpo de prova a cada nível de tensão ou deformação.

O emprego de um modelo de fadiga tem como pressuposto a observância das características do material e as condicionantes que geraram o modelo. Por exemplo: mistura asfáltica deve ser analisada a distribuição granulométrica, o teor e o tipo de ligante asfáltico, volume de vazios, além da forma que o modelo foi obtido, se em corpos de prova tipo Marshall, se em vigotas ou ainda através de ensaios indiretos como a resistência à tração por compressão diametral com diferentes velocidades associada ao comportamento reológico do ligante asfáltico. Pode-se incorrer em erros graves o emprego de modelos de materiais distintos ao tipo do material em questão.

Da mesma forma, modelos de fadiga de materiais cimentados. Nesses caso os modelos, necessariamente, são obtidos por tensão.

6.1.3 - Camada de rolamento de misturas asfálticas

Como mencionado, a determinação das tensões e deformações é através de análises mecanicistas e correlacionando-se com modelos experimentais de fadiga dos materiais pode-se prever a vida útil do pavimento. Cabe ao projetista avaliar dentre os diversos modelos na literatura qual aplica-se melhor às características do projeto. Os modelos de fadiga de misturas asfálticas apresentam variáveis na sua composição que particularizam sua utilização como:

- Tipo de ligante asfáltico
- Teor de ligante asfáltico da mistura asfáltica
- Volume de vazios dos corpos de prova
- Distribuição granulométrica
- Condições de contorno dos corpos de prova (prismáticos, tipo Marshall, etc.)
- Ensaio conduzido a tensão ou deformação controlada,
- Temperatura do ensaio

As expressões matemáticas de fadiga de materiais constituintes da estrutura do pavimento na avaliação da qualidade e do desempenho de determinado pavimento, é uma função exponencial com os parâmetros conforme apresentado pela equação 23.

$$N = K \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \quad (23)$$

Onde: N = número de solicitações do eixo 80kN durante a vida de serviço
 K e n = parâmetros determinados em ensaios
 ε_t = deformação de tração na fibra inferior da camada de rolamento

A seguir, na Tabela 22 são apresentados diversos modelos de fadiga encontrados na literatura para a verificação mecanicista de estruturas de pavimentos

Tabela 22 - Modelos de fadiga para deformação de tração (ε_t) na fibra inferior do revestimento asfáltico

Equação	Autor	K	n
1	Barker, Brabston & Chou (1977)*	9,70E-10	4,03
2	Brown, Pell & Stock	8,90E-13	4,9
3	Treybeg et al	9,73E-15	5,163
4	Pell & Brown	2,20E-19	6,1
5	Epps & Monismith	6,28E-07	3,01
6	BRRC - Belgian Road Research (Verstraeten, Veverka, & Francken)	4,86E-14	4,762
7	Preussler	2,99E-06	2,15
8	FHWA (Federal Highway Administration, 1976)*	1,092E-06	3,512

9	TRRL (Ytransportation abd road research Laboratory)	1,66E-10	4,32
10	Ullidtz (Denmark)	1,41E-15	5,62
11	NAASRA (Austrália)	5,76E-13	5
12	Porter & Kennedy (University Texas)	1,85E-05	3,04
13	Pinto, 1991 (deformação controlada)	6,64E-07	2,93
14	Pinto & Preussler - CAP - 50/70 (1980)*	2,85E-07	3,69
15	Pinto & Preussler - CAP - 85/100	9,68E-03	2,3
16	Asphalt Institute (1976)*	2,961E-05	3,291
17	Illinois Department of Transportation (Thompson)	5,00E-06	3

(*) modelos de fadiga recomendados pelo DER-SP conforme IP DE 00/001 2006

A Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 (2006) apresenta o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis e semirrígidos do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER/SP e comenta que para a verificação mecanicista da estrutura de pavimento, é necessário o conhecimento dos parâmetros relativos à capacidade de suporte dos solos do subleito e do tráfego previsto para o período de projeto, além das propriedades dos materiais constituintes das camadas da estrutura do pavimento e de modelos de fadiga para estes materiais. São apresentados na Tabela 23 os valores de coeficiente de Poisson e na Tabela 24 os valores usuais de módulo de resiliência ou módulo de elasticidade.

Tabela 23 - Valores Usuais de Coeficiente de Poisson

MATERIAL	Intervalo de valores de coeficiente de Poisson	Valores recomendados de coeficiente de Poisson
Concreto de cimento Portland	0,10 - 0,20	0,15
Mat. estabilizados com cimento	0,15 - 0,30	0,20
Misturas asfálticas	0,15 - 0,45	0,30
Materiais granulares	0,30 - 0,40	0,35
Solos do subleito	0,30 - 0,50	0,40

IP-DE-P00/001 (2006) – DER-SP

Tabela 24 - Valores Usuais de Módulo de Resiliência ou Elasticidade

Materiais	Intervalo de valores de módulo de resiliência (MPa)
Concreto asfálticos • Revestimento (CAP 50/70) • Revestimento (CAP 30/45) • Binder (CAP 50/70) • Binder (CAP 30/45)	2000 a 5000 2500 a 4500 2000 a 3000 2500 a 4000
Materiais granulares • Brita graduada • Macadame hidráulico	150 a 300 250 a 450
Materiais estabilizados quimicamente • Solo-cimento • Brita graduada tratada com cimento - BGTc • Concreto compactado com rolo - CCR	5000 a 10000 7000 a 18000 7000 a 22000
Concreto de cimento Portland	30000 a 35000
Solo fino em base e sub-base	150 a 300
Solo fino em subleito e reforço de subleito • Solo de comportamento laterítico LA, LA' e LG' • Solo de comportamento não laterítico	100 a 200 25 a 75

IP-DE-P00/001 (2006) – DER-SP

Para os solos do subleito recomendam-se as seguintes correlações entre módulo de resiliência e capacidade de suporte ISCP:

- solos lateríticos arenosos (LA') e lateríticos argilosos (LG'): $MR = 22 \cdot ISCP^{0,8}$ (MPa)
- solos não lateríticos siltosos (NS') e não lateríticos argilosos (NG'): $MR = 18 \cdot ISCP^{0,64}$ (MPa)
- solos arenosos pouco ou não coesivos: $MR = 14 \cdot ISCP^{0,7}$ (MPa)

6.1.4 – Camada de cimentada

Analogamente à camada de revestimento, a camada cimentada se submetida a níveis de tensões de tração na fibra inferior elevados, certamente, levará a camada a trincamento e o pavimento apresentará trincas por fadiga precocemente. Salienta-se que devido aos baixos valores de deformação registrados em materiais cimentados, o parâmetro controlado é a tensão.

Na IP DE 000/001/2006 recomenda para a análise mecanicista a utilização da equação 24 de fadiga quanto à flexão de misturas de solo-cimento pesquisadas por Ceratti (1991).

$$N = 10^{(A-B \cdot SR)} \quad (24)$$

Onde: N: número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado para o período de projeto;

SR: relação entre tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (tensão atuante e tensão de ruptura);

A e B: coeficientes determinados por regressões lineares, particulares para cada tipo de mistura solo-cimento.

Na literatura são encontrados vários modelos de equações de fadiga para misturas cimentadas. Entretanto, o uso empregado dessas curvas sem a observância de como foram geradas pode levar a erros significativos. Variáveis a serem consideradas como: tipo de solo, teor e tipo de cimento utilizado, condições de contorno dos corpos de prova, tempo de cura, forma de aplicação da carga, etc. O DER-SP particulariza os coeficientes A e B em função do tipo de solo classificado pela MCT utilizados na mistura de solo cimento (Tabela 25) e na Tabela 26 são apresentadas diversas curvas de fadiga de materiais cimentado encontrados na literatura.

Tabela 25- Coeficientes A e B para solo classificados pela MCT

Equação	Tipo de Solo Classificação MCT	A	B
1	Areias não lateríticas (NA)	125,63	-14,920
2	Areias lateríticas (LA)	64,01	- 0,822
3	Solos arenosos lateríticos (LA')	94,76	- 2,50
4	Solos argilosos lateríticos (LG')	67,59	- 1,03

Tabela 26 - Curvas de fadiga de material cimentado encontrados na literatura

Equação	Autor	A	B
1	Hilsdorf e Kesler	19,45	21,28
2	PCA-84	9,80	10,00
3	TRRL	14,89	13,19
4	Florida FDT	16,61	17,61
5	Tayabje e Halpenney	11,03	9,32
6	Tayabje e Halpenney	11,20	12,22
7	Gomez e Seholer	15,22	15,17
8	Iroue e Sawa	12,01	10,10
9	DERSA - Otte	9,10	9,10
10	De Beer e outros	9,19	0,90
11	DERSA - modificado	8,71	3,17
12	Cardoso e outros	15,3670	15,8980
13	Balbo (93)	17,1373	19,6078
14	Balbo (2007)	17,137	19,608
15	Trichês (93)	16,0167	16,6667
16	CCR - Trichês	14,9110	15,0740
17	CCR	14,3100	13,5180

6.1.5 -Subleito

Deformação vertical no topo do subleito

Além do monitoramento de deformação de tração na fibra inferior da camada do revestimento asfáltico e da tensão de tração na fibra inferior da camada cimentada (base ou sub-base), tem-se dado atenção na deformação vertical no topo do subleito.

Como o parâmetro a ser avaliado é a deformação vertical (admissível) os modelos são equações exponenciais conforme apresentado na equação 16. Na Tabela 27 estão apresentados os coeficientes encontrados na literatura.

Tabela 27 - Valores dos coeficientes dos modelos de regressão para determinação da deformação vertical ($\varepsilon_{v(adm)}$) no topo do subleito da literatura

Equação	Autor	K	n	N
1*	Dormon & Metcalf (1965)	6,069E-10	4,762	USACE
2	BRRC - Belgian Road Research (Verstraeten, Veverka, & Francken)	3,05E-09	4,348	AASHTO
3	Nottingham University (Brown et al)	1,13E-06	3,571	AASHTO
4*	Shell (Claessen, Edwarda, Sommer, Uge, 1985)			
	50% de Confiabilidade	6,15E-07	4	USACE
	85% de Confiabilidade	1,94E-07	4	
	95% de Confiabilidade	1,05E-07	4	
5	LCPC - Pavimento Novo (Marchand et al)	1,20E-07	4,167	AASHTO
6*	LCPC - Reforço (Marchand)	2,72E-09	4,098	AASHTO
7	Asphalt Institute (Santucci, 1984)	1,338E-09	4,484	USACE
8	NAASRA (Potter & Donald)	1,62E-15	7,1429	AASHTO
9	U.K. Transport & Road Research Laboratory	6,18E-08	3,95	AASHTO
	85% de Confiabilidade			

(*) Equações constantes na Instrução de Projeto: IP DE 000/001:2006 do DER-S

A determinação do número N admissível (N_{adm}) tem como inputs: a deformação vertical determinada por análise mecanicista e os coeficientes da Tabela 26. Se o N_{adm} for maior que o N de projeto a deformação vertical (admissível) no topo do subleito é satisfatória, caso contrário, deve-se fazer alterações na estrutura. Uma outra forma de verificação é a determinação da deformação vertical com utilização do número N de projeto pela equação 25.

$$\varepsilon_v = \left(\frac{K}{N}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (25)$$

Onde: N = número N de projeto

K e n: coeficientes determinados por regressões lineares, em função do tipo de material.

Tensão vertical no topo do subleito

De forma análoga a proteger o subleito a deformações permanentes, pode-se utilizar o modelo proposto por *Kostemberger Heukelon*. Através da equação 26 determina-se a tensão vertical admissível.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006MR}{(1 + 0,7\log N)} \quad (26)$$

Onde: σ_{adm} = tensão vertical admissível no topo do subleito

MR = módulo de resiliência (kgf/cm²)

N = número de solicitação do eixo padrão de 8,2t

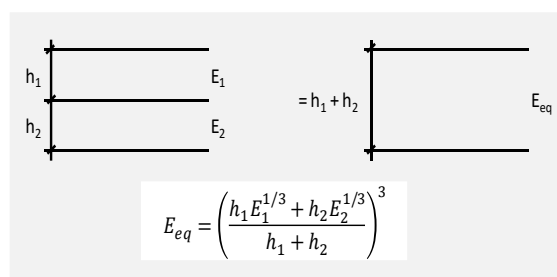
6.3 - Módulo e Espessuras Equivalentes (Equivalência Deflectométrica)

Por vezes nos deparamos com a necessidade de reduzir o número de camadas de forma a simplificar estruturas para uso de modelos e aplicação de métodos de elemento finitos (MEF). Logo, a redução de um sistema de duas ou mais camadas num outro uniforme de módulo ou espessura equivalente.

Em notas de aula do prof. Dr. Suzuki é apresentado o módulo equivalente entre camadas como sendo a redução do número de camadas de uma dada estrutura que propicie à estrutura resultante mesmo efeito quanto as tensões, deformações e deslocamentos. Nesse caso tem-se como produto uma estrutura com menos camadas (normalmente uma camada) de mesma espessura da estrutura original e com o módulo de resiliência equivalente.

Dentre vários autores que apresentam diversos modelos de módulos equivalentes entre camadas é apresentado na Figura 41 o método de Palmer e Barber, que pela equação 27 se obtém o módulo equivalente.

Figura 41 - Módulo equivalente - Palmer e Barber.



Equação 27

De forma análoga, em notas de aula do prof. Suzuki, é apresentado diversos procedimentos para obtenção de espessuras equivalente. Tem-se como base uma espessura hipotética de material

homogêneo que substitui uma espessura real de pavimento constituído de material com maior rigidez. Com a equação 28 se obtém a espessura equivalente adotada pela PMSP.

$$h_{eq} = 0,8 \left(h_1^3 \sqrt[3]{E_1/E_0} + h_2^3 \sqrt[3]{E_2/E_0} + h_3^3 \sqrt[3]{E_3/E_0} + \dots \right) \quad \text{Equação 28}$$

No *Guide Pratique de Dimensionnement* (francês) proposto pelo *Laboratoire Central de Ponts Chaussées* LCPC (Figura 42), consiste na redução de duas camadas em uma, obtendo-se como produto uma camada podendo ser de duas espessuras equivalente: (i) espessura equivalente h' , caso seja mantido o módulo da 2ª camada (equação 29) e (ii) espessura equivalente h'' , caso seja mantido o módulo da 1ª camada (equação 30).

Figura 42 - Guide Pratique de Dimensionnement - LCPC

$h_1 \ E_1$		$p/\mu = 0,5$
$h_2 \ E_2$	=	$h' \ E_2 = h'' \ E_1$

$$h' = h_2 + 0,9 h_1^3 \sqrt[3]{E_1/E_2}$$

Equação 29

$$h'' = h_1 + 0,9 h_2^3 \sqrt[3]{E_2/E_1}$$

Equação 30

Exemplo

Determinar a espessura equivalente considerando o módulo da 1ª camada e da 2ª camada da estrutura abaixo:

$h_1 = 18 \text{ cm} \quad E_1 = 300 \text{ Mpa}$	$h' = 25 + 0,9 * 18 * \sqrt[3]{300/140} =$	$h' = 46 \text{ cm}$ $E_2 = 140 \text{ Mpa}$
$h_2 = 25 \text{ cm} \quad E_2 = 140 \text{ Mpa}$		
$h_1 = 18 \text{ cm} \quad E_1 = 300 \text{ Mpa}$	$h'' = 18 + 0,9 * 25 * \sqrt[3]{140/300} =$	$h'' = 35 \text{ cm}$ $E_1 = 300 \text{ Mpa}$
$h_2 = 25 \text{ cm} \quad E_2 = 140 \text{ Mpa}$		

Resolver os exercícios 1 e 2

Ex-1

$h_1 = 20 \text{ cm}$	$E_1 = 350 \text{ MPa}$
$h_2 = 25 \text{ cm}$	$E_2 = 100 \text{ MPa}$

$h_{\text{equiv}} =$

$E_1 = 350 \text{ MPa}$

Ex-2

$h_1 = 15 \text{ cm}$	$E_1 = 850 \text{ MPa}$
$h_2 = 20 \text{ cm}$	$E_2 = 180 \text{ MPa}$

$h_{\text{equiv}} =$

$E_2 = 180 \text{ MPa}$

6.4 - Análise mecanicista - IP 08 PMSP

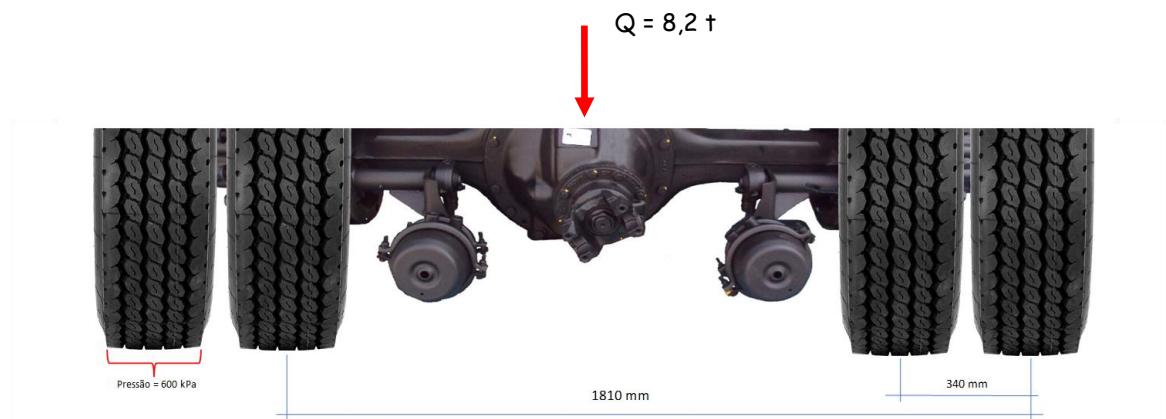
Consta na instrução de projeto IP-08 da PMSP os procedimentos para determinação de: deflexão, deformação e tensão de tração em vários pontos da estrutura de pavimentos de características: flexíveis, semirrígidos convencionais e semirrígidos invertidos (Tabela 28).

Tabela 28 - Deformação, tração e deflexão de estruturas de pavimentos - IP 08 PMSP

Pavimento	Camada	Parâmetro		
		Deformação	Tensão	Deflexão
Semirrígido convencional	Base - BGTC	tração fibra inferior		
	Base cimentada	topo da camada de revestimento		
Semirrígido invertido	Sub-base BGTC	fibra inferior CA	tração fibra inferior	
Flexível		fibra inferior CA		

Na determinação desses parâmetros dimensionais são adotadas equações concebidas com base no ESRD com os seguintes parâmetros (Figura 43):

Figura 43 - ESRD - parâmetros dimensionais considerados nas equações da IP-08 PMSP para determinação das deflexões, tensões de tração e deformação de tração



- Distância entre os centros geométricos de duas rodas (roda dupla): 340 mm
- Distância entre os centros de gravidade dos pares de rodas; 1810 mm
- Carga sobre o eixo de 80 kN e,
- Pressão de contato pneu/pavimento igual a pressão de inflagem dos pneumáticos: 600 kPa.

A seguir são apresentados os modelos para verificação à fadiga dos materiais: concreto asfáltico, solo cimento e camada cimentada de brita graduada tratada com cimento apresentados na IP 08 PMSP

a) Concreto asfáltico

Para concreto asfáltico, conhecendo-se a deflexão (D_0) sofrida na superfície do pavimento, pode-se determinar o número de repetições (N) da carga à fadiga pelas equações 31 e 32:

$$N = 5,548 * 10^{16} * D_0^{-5,319} \quad \text{Para espessura de revestimento} < 100\text{mm} \quad (31)$$

$$N = 3,036 * 10^{13} * D_0^{-3,922} \quad \text{Para espessura de revestimento} > 100\text{mm} \quad (32)$$

O modelo de fadiga para determinação do número de repetições N da carga que ocasiona a fadiga, tendo como base a deformação de tração na fibra inferior da camada do revestimento é dado pela equação 33:

$$N = 6,64 * 10^{-7} * (1/\varepsilon_t)^{2,93} \quad (33)$$

Essa equação foi concebida pelo prof. Dr. Salomão Pinto em sua tese de mestrado apresentada ao IME - RJ. É comum em equações de fadiga concebidas através de ensaios laboratoriais, no caso, ensaio de resistência à tração por compressão diametral cíclico em corpos de prova tipo Marshall, a aplicação de um fator multiplicativo denominado de fator campo/laboratório (FCL). A determinação do número N de campo (N_f) com base na equação 19 deve ser multiplicado pelo FCL = 1000.

b) Solo cimento - base ou sub-base

Nas camadas de solo cimento empregadas como base ou sub-base, pode ocorrer ruptura por fadiga se as deformações horizontais ou tensões horizontais de tração forem excessivas. Ceratti (1991) propôs a equação 34 de fadiga quanto a tensão de tração na fibra inferior da camada de solo cimento

$$N_f = 10^{(A-B * SR)} \quad (34)$$

Onde: N_f = Número equivalentes de operações de ESRD de 80kN acumulado no período de projeto

SR = relação entre tensões de tração na fibra inferior da camada cimentada (tensão atuante e tensão de ruptura)

A e B; coeficientes determinados por regressões lineares, particulares em função do tipo de solo conforme classificação MCT (Tabela 29)

Tabela 29 - Coeficientes A e B determinado por regressão linear da curva de fadiga de solo cimento Ceratti (1991)

Item	Tipo de solo classificação MCT	A	B
1	Areias não lateríticas (NA')	125,63	-14,920
2	Areias lateríticas (LA)	64,01	-0,822
3	Solos arenosos lateríticos (LA')	94,76	-2,50
4	Solos argilosos lateríticos (LG')	67,59	-1,03

c) Brita graduada tratada com cimento - BGTC

Semelhante ao solo cimento, a BGTC também pode apresentar trincamento precoce se a relação entre as tensões for excessiva. Com a relação entre a tensão máxima de tração na flexão ocasionada na região crítica da camada de base cimentada (atuante) e a tensão de tração do material, através da equação 35 pode-se determinar, através do modelo de Balbo, (1993), o número de repetições de (ESRD) a da carga causadora da dessa tensão. O dimensionamento satisfatório deve apresentar um valor de N_f maior que N_p (N de projeto).

$$N_f = 10^{(17,137 - 19,608RT)} \quad (35)$$

Onde: N_f = número N ocorridos em campo para que ocorra a ruptura por fadiga

RT = é a relação entre tensões, da tensão de tração na flexão na fibra inferior da camada cimentada em serviço (atuante) pela tensão na flexão de ruptura característica do material em questão (resistente) ($\sigma_{tf} / f_{ct,f}$)

σ_{tf} = Tensão de tração atuante (kgf/cm^2)

$f_{ct,f}$ = Tensão de tração admissível (normalmente adotado valores $> 8 \text{ kgf/cm}^2$)

Isolando-se a tensão admissível - σ_{adm} (tensão na flexão de ruptura característica do material em questão) de RT da equação 35 e adotando-se um fator campo/laboratório de 0,05, tem-se a equação 36. Para valores inferiores a unidade da relação entre as tensões: atuante e admissível, o comportamento é satisfatório quanto a vida de fadiga da camada cimentada de BGTC.

$$\sigma_{t(adm)} = \left[\left(\frac{17,137 - \log\left(\frac{N_{projeto}}{FCL}\right)}{19,608} \right) * \sigma_{t(ruptura)} \right] \quad (36)$$

Onde: $\sigma_{t(adm)}$: tensão admissível (MPa)

$N_{projeto}$ (N_p): Número N de projeto

FCL: fator campo laboratório (adotar 0,05)

$\sigma_{t(ruptura)}$: tensão de ruptura do material (MPa)

Registra-se que, o desenvolvimento da equação 35 não consta na IP-08 da PMSP

6.5 - Modelos para avaliação mecanicista

Pavimento semirrígido convencional

São apresentados os modelos para a determinação: (i) tensão de tração na flexão da camada de base cimentada (equação 37) e (ii) deflexão na superfície do pavimento semirrígido quando da utilização de camada de base com material cimentado (equação 36).

$$\sigma_t = 59,463847 * e_{CA}^{-0,323205} * e_{BGTc}^{-1,178098} * e_{BGS}^{-0,007887} * E_{SUB}^{-0,214274} * Q_{ESRD}^{0,970153} \quad (37)$$

Onde:

- σ_t = tensão de tração na flexão na base (Mpa)
- e_{CA} = espessura de concreto asfáltico (mm)
- e_{BGTc} = espessura da base de brita graduada tratada com cimento (mm)
- e_{BGS} = espessura da sub-base de brita graduada simples (mm)
- E_{SUB} = módulo de resiliência do subleito (Mpa)
- Q_{ESRD} = carga total sobre o eixo simples de rodas duplas (kN)

O procedimento aponta os parâmetros de módulo de resiliência e também de espessuras válidos, além dos coeficientes de Poisson (Tabela 30).

Tabela 30 - Parâmetros considerados no modelo σ_t da BGTc

Material	E (Mpa)	Coeficiente de Poisson	Espessura (mm)
Concreto asfáltico	3.000	0,35	100 a 150
BGTc	15.000	0,25	200 a 400
Sub-base	100	0,35	150 a 250
Subleito	25 a 100	0,40	Infinito

Para sistemas com três camadas e base cimentada, é apresentado modelo (equação 38) para determinação da deflexão (D_0) na superfície do pavimento.

$$D_0 = 10^{3,019694} * e_{CA}^{-0,137129} * e_{BC}^{-0,370613} * E_{CA}^{-0,118338} * E_{BC}^{-0,126027} * E_{SUB}^{-0,767296} \quad (38)$$

Onde:

- D_0 = deflexão na superfície do pavimento (mm)
- e_{BC} = espessura da camada de base cimentada (mm)
- E_{CA} = módulo de resiliência da camada de CA (MPa)
- E_{BC} = módulo de resiliência da camada de base cimentada (Mpa)

Na Tabela 31 são apresentados os parâmetros considerados na concepção do modelo de deflexão na superfície do pavimento.

Tabela 31 - Parâmetros considerados no modelo de deflexão de pavimento com três camadas e base cimentada

Material	E (Mpa)	Coeficiente de Poisson	Espessura (mm)
Concreto asfáltico	1.500 a 4.500	0,35	50 a 150
Base cimentada (solo cimento)	2.500 a 7.500	0,25	150 a 300
Subleito	20 a 250	0,40	Infinito

Exemplo - Pavimento semirrígido convencional

Qual a espessura da camada de base cimentada (BGTC) para que a tensão admissível ($\sigma_{t adm}$) seja superior a tensão de tração (σ_t) com emprego de falha por fadiga.

Ex. 1 Dimensionar as duas estruturas de pavimentos (I e II) semirrígidos, pelo método do CBR, para $N = 8,8 \cdot 10^7$ solicitações, BGTC como material de base ($\sigma_{t ruptura} = 1,3$ MPa) e sub-base de material granular. Pavimento I com subleito de solo não laterítico (NS') de $CBR_{nI} = 5\%$ e pavimento II com subleito de solo laterítico (LG') de $CBR_{nII} = 15\%$.

Na Tabela 32 são apresentadas as duas estruturas obtidas com base no método de dimensionamento do CBR. O aumento da resistência da camada de subleito de $CB\% = 5\%$ para 15% propiciou uma diminuição na espessura da camada de sub-base.

Tabela 32 - Estruturas dos pavimentos I e II dimensionadas pelo método do CBR

Camada	Material	Pav I		Pav II	
		Espessura (mm)	MR (MPa)	Espessura (mm)	MR (MPa)
Revestimento	CA	125	3000	125	3000
Base	BGTC	150	10000	150	10000
Sub-base	Granular	320	200	150	200
Subleito		CBR = 5% (NS')	50*	CBR = 15% (LG')	190**

(*) Valor de MR = $18 \cdot CBR^{0,64}$ - DER-SP

(**) Valor de MR = $22 \cdot CBR^{0,8}$ - DER-SP

Na Tabela 33 estão apresentados os valores das espessuras da camada de BGTC testadas. A tensão admissível obtida pela equação 36 e atenção atuante pela equação 34. Na avaliação foram testadas as espessuras de 150 mm a 280 mm para valores distintos de módulos do subleito e espessuras da camada de sub-base e revestimento.

Tabela 33 - Relação da tensão de diferentes espessuras de BGTC para distintos valores de módulos do subleito e espessuras do revestimento.

N de projeto = 4,60E+07						FCL = 0,05		σt (ruptura) = 0,8 MPa				σt (adm) = 0,3334 Mpa				
Espessura de BGTC (mm)	Condição 1		Condição 2		Condição 3		Condição 4		Condição 5		Condição 6		Condição 7		Condição 8	
	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$	σt (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$
250	0,5847	1,754	0,5040	1,512	0,4987	1,496	0,4689	1,406	0,4421	1,326	0,5821	1,746	0,5018	1,505	0,4392	1,317
260	0,55829	1,675	0,4812	1,443	0,4762	1,428	0,4478	1,343	0,4221	1,266	0,5558	1,667	0,4791	1,437	0,4194	1,258
270	0,53401	1,602	0,4603	1,381	0,4555	1,366	0,4283	1,285	0,4038	1,211	0,5317	1,595	0,4583	1,375	0,4012	1,203
280	0,51162	1,535	0,4410	1,323	0,4364	1,309	0,4103	1,231	0,3868	1,160	0,5094	1,528	0,4391	1,317	0,3843	1,153
290	0,4909	1,472	0,4231	1,269	0,4187	1,256	0,3937	1,181	0,3712	1,113	0,4887	1,466	0,4213	1,264	0,3688	1,106
300	0,47168	1,415	0,4066	1,219	0,4023	1,207	0,3783	1,135	0,3566	1,070	0,4696	1,409	0,4048	1,214	0,3543	1,063
310	0,45381	1,361	0,3912	1,173	0,3871	1,161	0,3640	1,092	0,3431	1,029	0,4518	1,355	0,3894	1,168	0,3409	1,023
320	0,43715	1,311	0,3768	1,130	0,3729	1,118	0,3506	1,052	0,3305	0,991	0,4352	1,305	0,3752	1,125	0,3284	0,985
330	0,42158	1,264	0,3634	1,090	0,3596	1,079	0,3381	1,014	0,3188	0,956	0,4197	1,259	0,3618	1,085	0,3167	0,950
340	0,40701	1,221	0,3508	1,052	0,3472	1,041	0,3264	0,979	0,3077	0,923	0,4052	1,215	0,3493	1,048	0,3058	0,917
350	0,39335	1,180	0,3391	1,017	0,3355	1,006	0,3155	0,946	0,2974	0,892	0,3916	1,175	0,3376	1,012	0,2955	0,886
360	0,38051	1,141	0,3280	0,984	0,3246	0,974	0,3052	0,915	0,2877	0,863	0,3788	1,136	0,3265	0,979	0,2858	0,857
370	0,36842	1,105	0,3176	0,953	0,3143	0,943	0,2955	0,886	0,2786	0,836	0,3668	1,100	0,3162	0,948	0,2768	0,830
380	0,35703	1,071	0,3077	0,923	0,3045	0,913	0,2863	0,859	0,2700	0,810	0,3555	1,066	0,3064	0,919	0,2682	0,804
390	0,34627	1,039	0,2985	0,895	0,2954	0,886	0,2777	0,833	0,2618	0,785	0,3447	1,034	0,2972	0,891	0,2601	0,780
400	0,33609	1,008	0,2897	0,869	0,2867	0,860	0,2695	0,808	0,2541	0,762	0,3346	1,004	0,2884	0,865	0,2525	0,757
410	0,32645	0,979	0,2814	0,844	0,2785	0,835	0,2618	0,785	0,2468	0,740	0,3250	0,975	0,2802	0,840	0,2452	0,736
Espessuras (mm) e E do subleito (MPa) - VALORES ADOTADOS																
	Espessura (mm)	E (MPa)	Espessura (mm)	E (MPa)	Espessura (mm)	E (MPa)	Espessura (mm)	E (MPa)	Espessura (mm)	E (MPa)	Espessura (mm)	E (MPa)	Espessura (mm)	E (MPa)	Espessura (mm)	E (MPa)
Revest.	100		100		125		125		150		100		100		100	
BGTC	410		360		360		340		320		380		360		320	
BGS	200		200		200		200		200		350		350		200	
Subleito		50		100		75		100		100		50		100		190

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transportes e Obras de Terra

APOSTILA DE PROJETO DE PAVIMENTO

Prof. Dr. Edson de Moura

Exercício 1 - Pavimento semirrígido

Determinar qual a espessura da camada cimentada (BGTC) para que a tensão admissível (baseada no $N_{projeto}$) seja superior a tensão de tração na flexão na base (tensão atuante) determinado pela tensão de tração na fibra inferior mais solicitada da camada cimentada de BGTC com emprego da falha por fadiga,

Elaborar no mínimo três combinações e apontar a que apresenta o menor custo

Adotar: N de projeto =	7,90E+06	solicitações	$\sigma_t(\text{ruptura}) =$	0,8 Mpa	FCL = 0,05
------------------------	----------	--------------	------------------------------	---------	------------

$$\sigma_t = 59,463847 \cdot e_{CAUQ}^{-0,323205} \cdot e_{BGTC}^{-1,178098} \cdot e_{BGS}^{-0,007887} \cdot E_{sub}^{-0,214274} \cdot (Q_{ESRD})^{0,970153}$$

onde:

σ_t = tensão de tração na flexão na base (MPa)

e_{CAUQ} = espessura de CAUQ (mm)

e_{BGTC} = espessura da base (mm)

e_{BGS} = espessura da subbase (mm)

E_{sub} = módulo de resiliência do subleito (MPa)

Q_{ESRD} = carga total sobre o eixo simples de rodas duplas (kN)

$$\sigma_{t(adm)} = \left[\left(\frac{17,137 - \log\left(\frac{N_{projeto}}{FCL}\right)}{19,608} \right) * \sigma_{t(ruptura)} \right]$$

Simulação			Espessuras (mm)	
	Camada	MR (MPa)	recomendadas	\$
	Revestimento			
	BGTC	-o-	> 75	2500/5cm
	BGS	-o-	> 240	6000/10cm
	Subleito	100/150	200	1000/10 cm

$\sigma_t(\text{adm})$	0,0000	MPa
------------------------	--------	-----

N de projeto =	4,60E+07
----------------	----------

Departamento de Transportes e Obras de Terra

FCL =	0,05	$\sigma_t(\text{ruptura}) =$	0,8	MPa	$\sigma_t(\text{adm}) =$	0,3334	Mpa
-------	------	------------------------------	-----	-----	--------------------------	--------	-----

Prof. Dr. Edson de Moura

Espe. de BGTC (mm)	Condição 1		Condição 2		Condição 3		Condição 4		Condição 5		Condição 6		Condição 7		Condição 8	
	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310																
320																
330																
340																
350																
360																
370																
380																
390																
Espessuras (mm) e E do subleito (MPa) - VALORES ADOTADOS																
	Espe. (mm)	E (MPa)	Espe. (mm)	E (MPa)	Espe. (mm)	E (MPa)	Espe. (mm)	E (MPa)	Espe. (mm)	E (MPa)	Espe. (mm)	E (MPa)	Espe. (mm)	E (MPa)	Espe. (mm)	E (MPa)
Revest.																
BGTC																
BGS																
Subleito																
Análise de custo	Revest.		Revest.		Revest.		Revest.		Revest.		Revest.		Revest.		Revest.	
	\$ BGTC		\$ BGTC		\$ BGTC		\$ BGTC		\$ BGTC		\$ BGTC		\$ BGTC		\$ BGTC	
	\$ BGS		\$ BGS		\$ BGS		\$ BGS		\$ BGS		\$ BGS		\$ BGS		\$ BGS	
	Total		Total		Total		Total		Total		Total		Total		Total	

Observe-se que as estruturas concebidas pelo método do CBR para os pavimentos (I e II) a espessura da camada de BGTC de 150 mm, em ambos os pavimentos não atenderam a relação entre as tensões.

Foram feitas avaliações para maiores espessuras da camada de BGTC (variações de 10 em 10 mm). A avaliação I apresentou relação satisfatória (0,99) com espessura de BGTC de 410 mm, com o aumento capacidade estrutural do subleito de MR = 50 MPa para 100 MPa resultou em uma redução da camada de BGTC em 50 mm.

O acréscimo em 25 mm na espessura do revestimento na condição 3 em relação a condição 2, não houve ganho na redução da espessura da BGTC. O que demonstra a pouca influência do revestimento na capacidade estrutural do conjunto. Já o acréscimo do módulo do subleito para 100 MPa (condição 4) a redução na camada de BGTC foi de 20 mm em relação a condição 3.

Nessa linha de raciocínio, elevando a espessura do revestimento para 150 mm (condição 5) e mantendo o módulo do subleito em 100 MPa, a espessura resultante da BGTC foi de 320 mm, melhor condição. Registra-se que a influência da capacidade do subleito ainda mostra-se preponderante.

Nas condições 6 e 7 procurou-se verificar a influência da espessura da camada de sub-base (BGS) com o aumento de 200 mm para 320 mm, mantendo-se as condições iniciais (1 e 2). Isso demonstra que a camada de sub-base não tem influência estrutural.

Por fim, evidenciando a importância da capacidade estrutural do subleito o aumento para 190 MPa e para revestimento de 100 mm a espessura da camada de BGTC foi de 320 mm.

Resumo:

- a estrutura (Pav I e Pav II) inicialmente concebida pelo método do CBR não atendem as condições de ruptura por fadiga.
- Dentre os parâmetros: espessura do revestimento e da sub-base e a capacidade de suporte do subleito, esse último é o que exerce maior influência na tensão de tração na fibra inferior da camada de BGTC.

Pavimento semirrígido invertido

Para pavimentos semirrígidos invertidos obtém-se com o procedimento: (i) deformação de tração da fibra inferior (mais solicitada) da camada de revestimento (equação 39) e (ii) tensão de tração na flexão da camada de sub-base, em pavimentos com revestimento de CA, base granular e sub-base com emprego de BGTC (equações 40).

$$\varepsilon_t = 1,499 \cdot 10^{-2} \cdot e_{CA}^{-0,589} \cdot e_{BGS}^{-0,272} \cdot e_{BGTC}^{-0,070} \cdot E_{CA}^{-0,020} \cdot E_{BGS}^{-0,400} \cdot E_{BGTC}^{-0,040} \cdot E_{SUB}^{0,014} \quad (39)$$

$$\sigma_t = 4,313 \cdot e_{CA}^{-0,627} \cdot e_{BGS}^{-0,381} \cdot e_{BGTC}^{-0,553} \cdot E_{CA}^{0,019} \cdot E_{BGS}^{-0,040} \cdot E_{BGTC}^{0,557} \cdot E_{SUB}^{-0,279} \quad (40)$$

Onde: ε_t = deformação de tração da fibra inferior do CA (10^{-4} mm/mm)

σ_t = tensão de tração na flexão na sub-base cimentada (kgf/cm²)

e_{CA} = espessura de concreto asfáltico (cm)

e_{BGTC} = espessura da base de brita graduada tratada com cimento (cm)

e_{BGS} = espessura da sub-base de brita graduada simples (cm)

E_{CA} = módulo de resiliência da camada de CA (kgf/cm²)

E_{BGS} = módulo de resiliência da BGS (kgf/cm²)

E_{BGTC} = módulo de resiliência da BGTC (kgf/cm²)

E_{SUB} = módulo de resiliência do subleito (kgf/cm²)

Registra-se que a determinação dos parâmetros para o pavimento invertido, não foram utilizadas as unidades do sistema internacional (mm e MPa), mas para espessuras cm e tensão em kgf/cm².

Na Tabela 34 são apresentados os parâmetros considerados na concepção dos modelos de deformação de tração da fibra inferior e tensão de tração na flexão.

Tabela 34 - Parâmetros considerados no modelo de deformação de tração da fibra inferior e tensão de tração na flexão.

Material	E (kgf/cm ²)	Coeficiente de Poisson	Espessura (cm)
Concreto asfáltico	30.000 a 50.000	0,30	7 a 16
Base (BGS)	1.000 a 7.500	0,40	5 a 25
Sub-base (BGTC)	50.000 a 100.000	0,35	15 a 25
Subleito	1000	0,40	Infinito

Na Tabela 35 é apresentado a estrutura de pavimento invertido que, em seguida, é feita a análise mecanicista com a avaliação da deformação de tração atuante na fibra inferior do revestimento (equação 23), avaliação da tensão de tração atuante na fibra inferior da camada cimentada (equação 38) e a: deformação vertical atuante e tensão vertical atuante no topo do subleito.

Tabela 35 - Estrutura do pavimento invertido

Pavimento invertido		N = 5,1*10 ⁷		
	Material	Espessuras (cm)	MR (kgf/cm ²)	Resistência (kgf/cm ²)
Revestimento	CA	12,5	35.000	
Base	BGS	15	4.000	
Sub-base	BGTC	15	100.000	11
Subleito	\$ in natura		1.000	

Revestimento asfáltico

A camada asfáltica apresentará um comportamento satisfatório se a relação entre a deformação atuante - $\epsilon_{t(atuante)}$ for inferior a deformação admissível - $\epsilon_{t(adm)}$. Na Tabela 36 são apresentados os valores individuais das deformações e a relação com resultado satisfatório quanto a deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.

Tabela 36 - Resultados da avaliação mecanicista do revestimento asfáltico do pavimento invertido

Deformação	Valor	Relação	Modelos
ϵ_t (admissível)	$1,93 \cdot 10^{-4}$	0,142	Asphalt Institute (1976) (Tabela 22)
ϵ_t (atuante)	$2,75 \cdot 10^{-5}$		IP 08 PMSP - Equação 37

Camada cimentada

Semelhante ao procedimento utilizado na determinação da deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico, determina-se as tensões de tração: atuante e admissível na fibra inferior da camada cimentada.

A camada terá um comportamento satisfatório se a $\sigma_{t(atuante)}$ for inferior a $\sigma_{t(admissível)}$. Na Tabela 37 são apresentados os resultados das $\sigma_{t(atuantes)}$ para diferentes espessuras da BGTC, desde 15 cm espessura do projeto inicial até 22 cm. A relação foi satisfatória a partir de 21 cm.

Tabela 37 - Resultados da avaliação mecanicista da camada cimentada do pavimento invertido

σ_t (admissível)		4,56482	(kgf/cm²)	Balbo 1993 - equação 34
Espessuras BGTC	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$		
15	5,48027734	IP 08 PMSP - Equação 38		
16	5,28813645			
17	5,11378836			
18	4,95467655			
19	4,80872855			
20	4,67424439			
21	4,54981495	ok		
22	4,43426109	ok		

Subleito

Por fim, determina-se as condições estruturais da camada de subleito através da análise mecanicista das tensões e deformações verticais.

A deformação vertical admissível - $\epsilon_{v(adm)}$ determinada pela equação 18 e aplicada os parâmetros K e n do *Asphalt Institute* (Santucci, 1984) e tensão admissível vertical $\sigma_{v(adm)}$ determinadas conforme Tabela 38, pode-se comparar com a deformação vertical e a tensão vertical atuantes e finalizar a análise mecanicista.

Tabela 38 - Relação das tensões e deformações da camada de subleito do pavimento invertido

Deformação			
Deformações	mm/mm	Relação	
$\epsilon_{v(adm)}$	2,01E-04	0,49	Asphalt Institute (Santucci, 1984)
$\epsilon_{v(atuante)}$	9,88E-05		(Elsym 5)

Tensão			
Tensões	(kgf/cm ²)		
$\sigma_{v(adm)}$	0,939	0,14	Kostemberger Heukelon equação 37
$\sigma_{v(atuante)}$	0,131		(Elsym 5)

Com base nos resultados apresentados na Tabela 39 o comportamento estrutural do subleito é satisfatório. Na Tabela 40 é apresentado o resultado do dimensionamento do pavimento invertido.

Tabela 39 - Resultado da estrutura do pavimento invertido após análise mecanicista

Pavimento invertido			N = 5,1*10 ⁷
	Material	Espessuras (cm)	MR (kgf/cm ²)
Revestimento	CA	12,5	35.000
Base	BGS	15	4.000
Sub-base	BGTC	21	100.000
Subleito	\$ in natura		1.000

Exercício 1

Dada a estrutura de um pavimento semirrígido invertido conforme tabela ao lado, efetuar a análise mecanicista com a verificação da deformação de tração (ϵ_t) na fibra inferior da camada asfáltica, a tensão de tração (σ_t) na fibra inferior da camada cimentada e a deformação e tensão vertical no topo do subleito.

Pavimento invertido		N = 5,1*10 ⁷		
	Material	Espessuras (cm)	MR (kgf/cm ²)	Coef. Poisson
Revestimento	CA	12,5	40.000	0,3
Base	BGS	15	3.500	0,4
Sub-base	BGTC	15	80.000	0,35
Subleito	\$ in natura	0	800	0,4

Mistura asfáltica

$$\epsilon_t = 1,499 * 10^{-2} * e_{CA}^{-0,589} * e_{BGS}^{-0,272} * e_{BGTC}^{-0,070} * E_{CA}^{-0,020} * E_{BGS}^{-0,400} * E_{BGTC}^{-0,040} * E_{SUB}^{0,014}$$

$\epsilon_{t(adm)}$	
---------------------	--

K	n
2,961E-05	3,291

$$\frac{\epsilon_t(atuante)}{\epsilon_t(adm)} < 1$$

$$\epsilon_{t adm} = \left(\frac{K}{N} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Sub-base cimentada

$$\sigma_t = 4,313 * e_{CA}^{-0,627} * e_{BGS}^{-0,381} * e_{BGTC}^{-0,553} * E_{CA}^{0,019} * E_{BGS}^{-0,040} * E_{BGTC}^{0,557} * E_{SUB}^{-0,279}$$

$$\sigma_{t(adm)} = \left[\left(\frac{17,137 - \log\left(\frac{N_{projeto}}{FCL}\right)}{19,608} \right) * \sigma_{t(ruptura)} \right]$$

$\sigma_{t(adm)}$

Espessuras BGTC	σ_t (atuante)	$\frac{\sigma_{t(atuante)}}{\sigma_{t(adm)}} \leq 1$
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		

IP 08 PMSP - Equação 38

Subleito

$$\varepsilon_v = \left(\frac{K}{N} \right)^{\frac{1}{n}}$$

		mm/mm	Relação	
Deformação	$\varepsilon_{v(adm)}$			Asphalt Institute (Santucci, 1984)
	$\varepsilon_{v(atuante)}$	1,04E-04		(Elsym 5)

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006MR}{(1 + 0,7 \log N)}$$

		(kgf/cm ²)	Relação	
Tensão	$\sigma_{v(adm)}$			Kostemberger Heukelon equação 37
	$\sigma_{v(atuante)}$	0,108		(Elsym 5)

Exercício 2

Dada a estrutura de um pavimento semirrígido invertido conforme tabela ao lado, efetuar a análise mecanicista com a verificação da deformação de tração (ε_t) na fibra inferior da camada asfáltica, a tensão de tração (σ_t) na fibra inferior da camada cimentada e a deformação e tensão vertical no topo do subleito.

Pavimento invertido		N = 8*10 ⁶		
	Material	Espessuras (cm)	MR (kgf/cm ²)	Coef. Poisson
Revestimento	CA	7,5	30.000	0,3
Base	BGS	15	2.500	0,4
Sub-base	BGTC	15	70.000	0,35
Subleito	\$ in natura	0	700	0,4

Pavimento flexível

No caso de pavimentos flexíveis monitora-se a deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento de CA. O procedimento IP-08 da PMSP apresenta quatro equações para a determinação da deformação de tração. Cada equação correspondente a lote de combinações de espessuras e módulos de resiliência das camadas de CA e base granular (BGS) e módulo de resiliência do subleito.

A carga de roda ESRD considerada nos modelos de deformação específica em N, assim, considera-se a carga de 80.000 N, diferentemente, da unidade de carga considerada para pavimentos semirrígidos.

Lote 1 - Deformação específica de tração na fibra inferior do CA (equação 40) e Na Tabela 41 são apresentados os limites de espessuras e módulos de resiliência considerados

$$\varepsilon_t = 10^{-1,955202} * e_{CA}^{-1,091635} * e_{BGS}^{-0,015906} * E_{CA}^{-0,584777} * E_{BGS}^{-0,308633} * E_{SUB}^{-0,084054} * Q_{ESRD}^{0,701806}$$

equação (41)

Tabela 40 - Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 1

Camada	Módulo de resiliência (MPa)	Espessura (mm)
CA	2.250 a 3.750	50 a 100
Base (BGS)	100 a 300	100 a 300
Subleito	25 a 125	Semi-infinito

Lote 2 - Deformação específica de tração na fibra inferior do CA (equação 41) e Na Tabela 42 são apresentados os limites de espessuras e módulos de resiliência considerados

$$\varepsilon_t = 10^{-5,164279} * e_{CA}^{-0,151697} * e_{BGS}^{-0,0199476} * E_{CA}^{-0,318480} * E_{BGS}^{-0,531454} * E_{SUB}^{-0,121419} * Q_{ESRD}^{0,915419}$$

equação (42)

Tabela 41- Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 2

Camada	Módulo de resiliência (MPa)	Espessura (mm)
CA	2.250 a 3.750	50 a 100
Base (BGS)	100 a 300	100 a 300
Subleito	125 a 225	Semi-infinito

Lote 3 - Deformação específica de tração na fibra inferior do CA (equação 42) e Na Tabela 43 são apresentados os limites de espessuras e módulos de resiliência considerados

$$\varepsilon_t = 10^{-3,546541} * e_{CA}^{-0,717727} * e_{BGS}^{-0,163944} * E_{CA}^{-0,472859} * E_{BGS}^{-0,355946} * E_{SUB}^{-0,149334} * Q_{ESRD}^{0,920915}$$

equação (43)

Tabela 42- Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 3

Camada	Módulo de resiliência (MPa)	Espessura (mm)
CA	2.250 a 3.750	100 a 150
Base (BGS)	100 a 300	100 a 300
Subleito	25 a 125	Semi-infinito

Lote 4 - Deformação específica de tração na fibra inferior do CA (equação 43) e Na Tabela 44 são apresentados os limites de espessuras e módulos de resiliência considerados

$$\varepsilon_t = 10^{-3,74136} * e_{CA}^{-0,742618} * e_{BGS}^{-0,016173} * E_{CA}^{-0,505633} * E_{BGS}^{-0,336315} * E_{SUB}^{-0,137855} * Q_{ESRD}^{0,912476}$$

equação (44)

Tabela 43 - Espessuras e módulos de resiliência das camadas referente ao Lote 4

Camada	Módulo de resiliência (MPa)	Espessura (mm)
CA	2.250 a 3.750	100 a 150
Base (BGS)	100 a 300	100 a 300
Subleito	125 a 225	Semi-infinito

Exemplo - pavimento flexível

Ex.1 - Dimensionar as duas estruturas de pavimentos flexíveis, pelo método do CBR, para $N = 8,8 \cdot 10^7$ solicitações, BGS como material de base e sub-base de material granular. Pavimento I com subleito de $CBR_{nI} = 5\%$ e pavimento II com subleito de $CBR_{nII} = 12\%$.

Na Tabela 44 são apresentadas as duas estruturas obtidas com base no método de dimensionamento do CBR. Observe-se que as camadas de base e sub-base foram reduzidas para uma camada com o módulo de resiliência da base, conforme Guide Pratique de Dimensionnement - LCPC

Tabela 44 - Estruturas dos pavimentos I e II

Camada	Material	Pav I				Pav II			
		Espessura (mm)	MR (MPa)	Espessura (mm)	MR (MPa)	Espessura (mm)	MR (MPa)	Espessura (mm)	MR (MPa)
Revestimento	CA	125	3000	125	3000	125	3000	125	3000
Base	BGS	150	300	400*	300	150	300	270*	300
Sub-base	Granular	320	200			150	200		
Subleito		CBR = 5% (NS')	50		50**	CBR = 15% LG'	190		190***

(*) Redução de duas camadas para uma conforme Guide Pratique de Dimensionnement - LCPC - Figura 27

(**) Valor de MR = $18 * CBR^{0,64}$ - DER-SP

(***) Valor de MR = $22 * CBR^{0,8}$ - DER-SP

- a) Após o dimensionamento das estruturas, realizar a análise mecanicista com base na deformação específica de tração na fibra inferior mais solicitada do revestimento asfáltico.

Procedimento:

- 1º passo: determinar a deformação específica de tração para as combinações possíveis da Tabela 1. Observar as espessuras e módulos de resiliência correspondentes ao modelo (lote).
- 2º passo: determinar o N_f (número N de campo) com base na deformação específica de tração e equação 19,
- 3º passo: obter a relação entre o N_f / N_p . Condição satisfatória para relação > 1 .

Na Tabela 45 estão apresentados os valores das espessuras, os respectivos valores de módulos de resiliência e por fim, os valores da relação N_f / N_p .

Tabela 45 - Espessuras e MRs e valores da relação N_f / N_p

Estrutura	Parâmetros de cálculo			Espessuras e Módulos recomendados					
	$\epsilon_t =$	N_f	N_f / N_p	e_{CA}	e_{BGS}	E_{CA}	E_{BGS}	E_{SUB}	Q_{ESRD}
Pav I	1,81E-04	6,13E+07	0,70	125	400	3000	300	50	80000
	1,59E-04	9,00E+07	1,02	150	400	3000	300	50	80000
	1,90E-04	5,34E+07	0,61	125	300	3000	300	50	80000
	1,66E-04	7,83E+07	0,89	150	300	3000	300	50	80000
Pav II	1,58E-04	9,10E+07	1,03	125	270	3000	300	190	80000
	1,55E-04	9,58E+07	1,09	125	300	3000	300	190	80000
	1,39E-04	1,34E+08	1,52	150	270	3000	300	190	80000
	1,36E-04	1,41E+08	1,60	150	300	3000	300	190	80000

Dentre os parâmetros: espessuras do revestimento e da base e a capacidade de suporte do subleito, o aumento da espessura da base é o que exerce menor influência na redução da deformação específica de tração na fibra inferior da camada do revestimento. O aumento da resistência do subleito de MR = 50 MPa para 190 MPa Pav I e Pav II respectivamente, propiciou um aumento na relação (N_f / N_p) de 0,61 para 1,09, com revestimento de 125 mm e base de 300 mm. Da mesma forma, o aumento da espessura do revestimento de 125 para 150 mm para espessura da base de 300 mm para o Pav I, não propiciou uma relação satisfatória devido às condições de suporte do subleito. Pode-se afirmar que a capacidade do subleito tem grande influência no comportamento mecânico da estrutura de pavimentos flexíveis.

Em ambos os pavimentos analisados tiveram sua espessura do revestimento aumentada para 150 mm, devido a capacidade de suporte do subleito, o pavimento II melhorou a relação, passando de 1,03 para 1,52 com espessura de base inicialmente dimensionada, já o pavimento I só atendeu com espessura da base de 400 mm.

Exercício 2 - CA

Determinar a compatibilidade do número N de projeto com o número N admissível de campo determinado pela deformação de tração na fibra inferior mais solicitada do CA com emprego da falha por fadiga, com possíveis combinações abaixo.

Considerar um tipo de estrutura que propicie um número N_f superior ao de projeto e que apresente o menor custo

Adotar: N de projeto =	7,90E+06	solicitações	Condição de aceitabilidade: $\epsilon_t \text{ adm} > \epsilon_t \text{ atuante}$
------------------------	----------	--------------	---

$$\epsilon_{tf} = 10^{-3,546541} * e_{CA}^{-0,717727} * e_{BGS}^{-0,163944} * E_{CA}^{-0,472859} * E_{BGS}^{-0,355946} * E_{Sub}^{-0,149334} * Q_{ESRD}^{0,920915}$$

ϵ_t = deformação de tração na fibra inferior do CA

e_{CA} = espessura de concreto asfáltico (mm)

e_{BGS} = espessura da sub-base de brita graduada simples (mm)

E_{CA} = módulo de resiliência do da mistura asfáltica (Mpa)

E_{BGS} = módulo da camada de BGS (MPa)

E_{Sub} = módulo de resiliência do subleito (Mpa)

Q_{ESRD} = carga total sobre o eixo simples de rodas duplas (N)

$$\epsilon_{t(adm)} = \left(\frac{2,96 * 10^{-5}}{N} \right)^{\frac{1}{3,291}}$$

ou $N = 2,95 * 10^{-5} \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3,291}$

	Camada	Espessuras	MR (kgf/cm²)	\$
Reventimento	A	50 / 75	mistura CA tipo I - 2500	\$5000 / 50 mm
	B		mistura CA tipo II - 3000	\$6000 / 50 mm
Base		150 / 200	250	\$2000 / 100 mm
Subleito		-o-	60	-o-

(combinar espessuras com valores de MR)

$\epsilon_t \text{ adm} =$

Parâmetros de cálculo			Espessuras e Módulos recomendados							\$
$\epsilon_t \text{ atuante} =$	$t \text{ adm} / \epsilon_t \text{ atuante}$	$\epsilon_t \text{ adm} > \epsilon_t \text{ atuante}$	e cauq	e BGS	E CAUQ	E BGS	E Sub	Q ESRD	combinação	

6.6 - Programas computacionais

Com base nessas teorias apresentadas acima dentre outras que não foram apresentadas aqui, juntamente com o avanço computacional, foi possível o desenvolvimento de programas para determinação, de forma rápida, a determinação dos parâmetros: tensão, deformação e deslocamentos de estruturas de pavimentos com várias camadas. Dentre os vários programas temos: BISAR, desenvolvido em 1978 pela Shell Oil (SHELL, 1998); o ALIZE III, programa francês desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts e Chaussées*, os programas elaborados pela AASHTO, FAA, ILLIPAVE, MICHPAVE. A seguir são apresentadas as características de alguns programas computacionais:

Sispav programa com base em método mecanístico empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, desenvolvido na COPPE/UFRJ. Utiliza-se a análise elástico linear e a elástico não linear, sendo os danos estimados por modelos de previsão de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admissível no topo do subleito. O programa, SisPav, incorpora a análise de confiabilidade, a análise de tensões e deformações e interfaces gráficas para visualização dos resultados. (Franco 2007).

O programa **Kenlayer** foi desenvolvido por HUANG (1993). Embora muitos considerem erroneamente o programa como sendo baseado no método dos elementos finitos, trata-se na verdade de um programa baseado na solução de Burmister para a resolução de problemas de elasticidade linear de meios estratificados, com a capacidade de realizar a análise de elementos com comportamento não linear e visco elástico. O programa permite a análise de estruturas com até 19 camadas, sendo que estas podem ser elástico-lineares, não lineares ou visco elásticas. No caso de estruturas elástico-lineares, o pavimento é definido pela espessura das camadas, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. No caso de camadas não lineares, o usuário deve também definir os seguintes parâmetros:

- Massa específica de cada camada;
- Coeficiente de empuxo no repouso; e ,
- Modelos de comportamento resiliente dos diferentes materiais.

O programa **Fepave** (*Finite Element Analysis of Pavement Structures*) é uma ferramenta de cálculo de tensões, deformações e deslocamentos conhecido na comunidade de pavimentação brasileira. É um programa originado na Universidade de Berkeley, em 1968, e foi doado a COPPE em 1973. A planilha utiliza os recursos do referido programa para facilitar a entrada de dados e a visualização dos resultados por meio de gráficos, além de permitir trabalhar com diferentes sistemas de unidades. Utiliza a formulação elástica bidimensional e axissimétrica de soluções pelo MEF. Uma das vantagens do programa é a consideração da não linearidade elástica dos módulos das camadas do pavimento tanto na direção axial quanto radial. Além disso, o programa permite modelar o módulo da camada asfáltica em função da temperatura. Uma das limitações do programa FEPAVE é a consideração de carregamento único (roda simples) e as aproximações provenientes das análises por Elementos Finitos, relacionados à discretização da malha (SILVA, 1995).

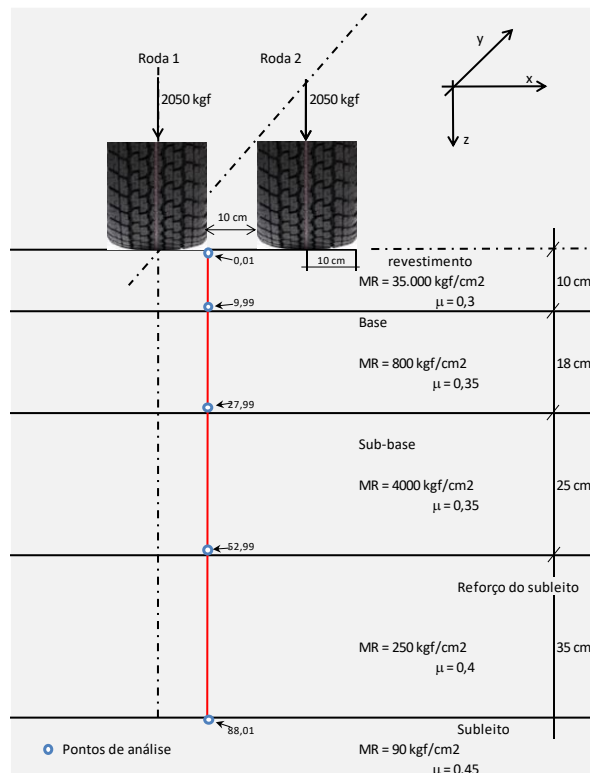
Elsym 5 é um programa com base elástica por diferenças finitas, materiais com propriedades elástico linear, pode ser aplicado em estruturas com cinco camadas com dez pontos de aplicação de carga. A dificuldade de rodar esse programa é que foi concebido para uma tecnologia de computadores com 16 bytes. Atualmente, os computadores processam em 32 ou 64 bytes, dessa forma, é necessário de um emulador⁴ ou de um procedimento que propicie o programa processar em micros mais modernos. Ocorre que com esse processo as planilhas geradas são limitadas e após o programa processar uma estrutura o resultado não é salvo automaticamente, entretanto, podem-se extrair os parâmetros necessários dessa maneira.

A seguir é apresentado um modelo de análise das tensões deformações e deslocamentos com emprego do programa Elsym 5. Na Figura 44 é apresentado a estrutura de análise submetida ao programa Elsym 5 para verificação das tensões, deformações e deslocamentos, com as seguintes características:

- Cinco camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito
- Duas cargas com 2050 kgf cada,
- Raio da área de contato = 10 cm
- Distância entre roda = 10 cm
- Módulo de resiliência e coeficiente de Poisson
- Cinco pontos de análise

⁴ Emulador é um software que reproduz as funções de um determinado ambiente, a fim de permitir a execução de outros softwares sobre ele, permitindo que um software criado para uma plataforma funcione em outra.

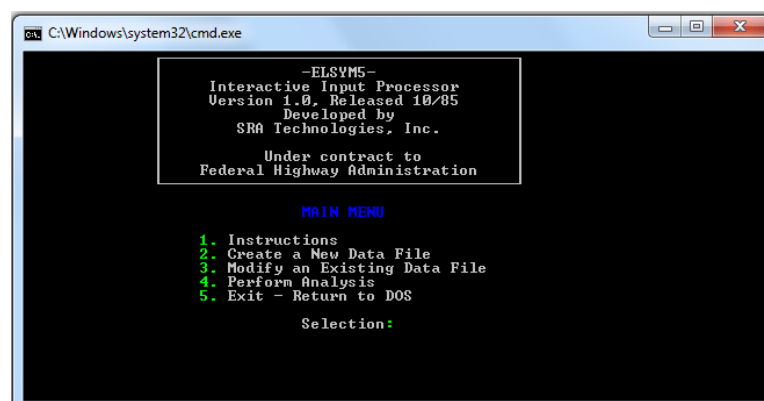
Figura 44- Estrutura submetida ao programa Elsym 5 para análise das tensões deformações e deslocamentos.



Após o dimensionamento da estrutura, faz-se a análise dos parâmetros. Ao iniciar o programa Elsym 5 o 1º quadro é apresentado. (Figura 45).

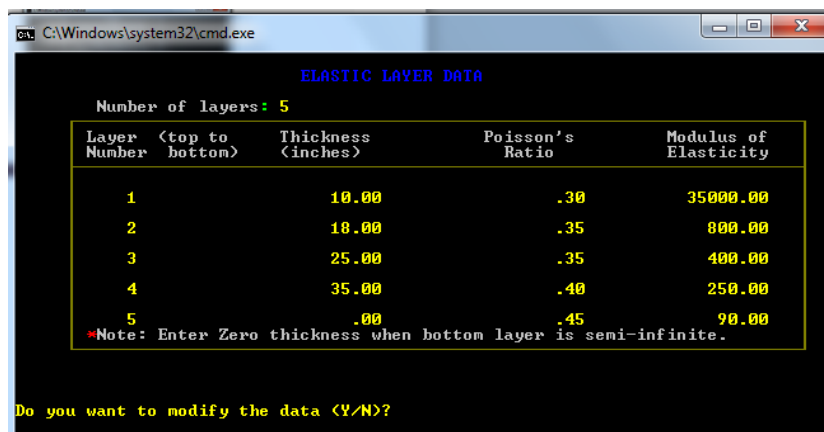
São apresentadas 5 opções, como essa versão foi instalada em um micro com 32 bites, não é possível habilitar alguns recursos, como abrir o número 1, assim inicia-se o programa com o número 2: criar um novo arquivo de dados.

Figura 45 - 1º quadro do programa Elsym 5



Após clicar o número 2, é aberto o 2º quadro do programa (Figura 46). Preencher o n. de camadas e preencher os dados de cada camada: número da camada, espessura (cm), coeficiente de Poisson e o respectivo MR (kgf/cm²).

Figura 46 - 2º quadro do programa Elsym 5 - dados das camadas



ELASTIC LAYER DATA

Number of layers: 5

Layer Number	Thickness (inches)	Poisson's Ratio	Modulus of Elasticity
1	10.00	.30	35000.00
2	18.00	.35	800.00
3	25.00	.35	400.00
4	35.00	.40	250.00
5	.00	.45	90.00

*Note: Enter Zero thickness when bottom layer is semi-infinite.

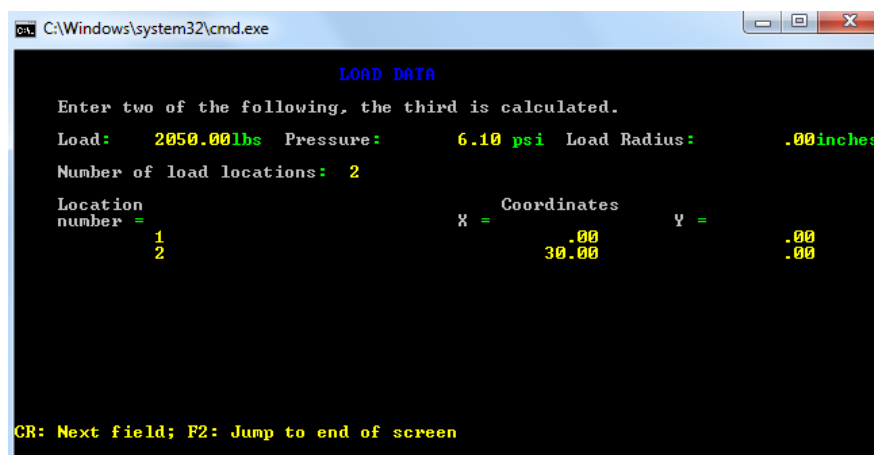
Do you want to modify the data (Y/N)?

Após o preenchimento, ao final da tela, é apresentado duas condições: Y ou N, Y para aceitar todos os dados preenchidos e seguir para o próximo quadro ou N para corrigir algum dado preenchido errado. Ao clicar em N é aberto o 3º quadro - selecionar o n. 3 - dados da carga (carga = 2050 kgf) embora apareça a unidade lbs no programa, desconsiderar e preencher com kgf.

Considerando um raio da área de contato = 10 cm, resulta em uma área de 314 cm², portanto uma pressão de 6,52 kgf/cm². Nesse caso coloque somente a pressão de contato que o programa preenche o raio da área de contato automaticamente.

Em seguida, o número de cargas = 2. Pode-se incluir um número maior, como a roda da outra extremidade do eixo, entretanto, a influência dessa roda nos pontos considerados é muito pequena, situa-se na ordem de menos de 5%.

Figura 47 - 3º quadro - dados da carga



LOAD DATA

Enter two of the following, the third is calculated.

Load: 2050.00lbs Pressure: 6.10 psi Load Radius: .00inches

Number of load locations: 2

Location number	X = Coordinates	Y =
1	.00	.00
2	30.00	.00

CR: Next field; F2: Jump to end of screen

É necessário também colocar a posição (coordenadas x e y) de cada carga, observe-se na estrutura (Figura 47) que o ponto de origem dos eixos x, y e z, é no centro da área de contato da roda 1, assim, as rodas têm coordenadas: x = 0 e y = 0 e a roda 2 com x = 30 cm e y = 0.

Preenchido os dados corretamente, digite N e aparecerá, novamente, o 1º quadro, selecione o n. 4 - locais dos pontos para avaliação (Figura 48)

No número de posições (x-y) foi escolhido apenas um, à 10 cm do eixo da roda 1, ou seja, na borda do pneu dessa roda. Já no ponto z, foram escolhidas 5 posições:

1ª - no topo do revestimento, observe-se que a posição foi 0,01 cm, não se pode escolher na superfície = 0, o programa não reconhece.

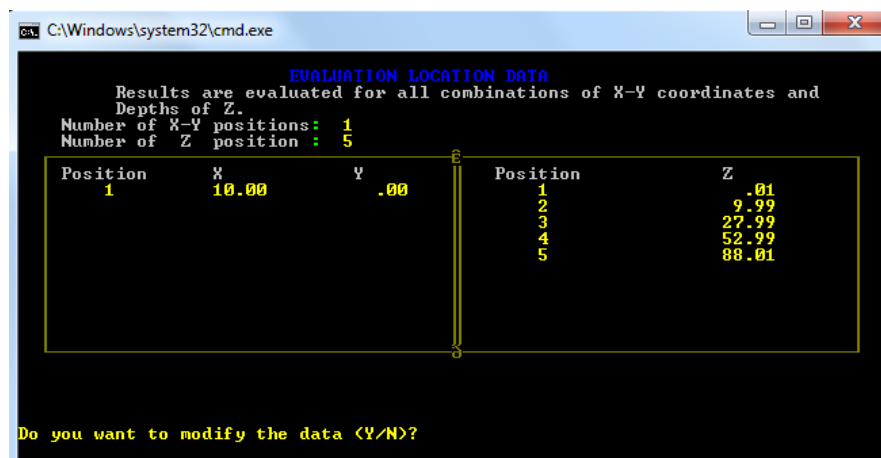
2ª - na posição 9,99, como se fosse a fronteira entre as camadas. Esse ponto é denominado de fibra inferior da camada de rolamento.

3ª na fibra inferior da camada de base = 27,99 cm (10 cm de revestimento + 18 cm de base = 28 cm).

4ª - na fibra inferior da camada de sub-base = 52,99 cm e,

5ª - No topo do subleito = 88,01, pois a estrutura do pavimento possui 88 cm.

Figura 48 - 4º quadro - Locais dos pontos para avaliação



Clicando N do 4º quadro, aparecerá o quadro (Figura 49) selecione o n. 6, aparecerá o 1º quadro do Elsym 5 (Menu) (Figura 50)

Figura 49 - Menu de novos dados

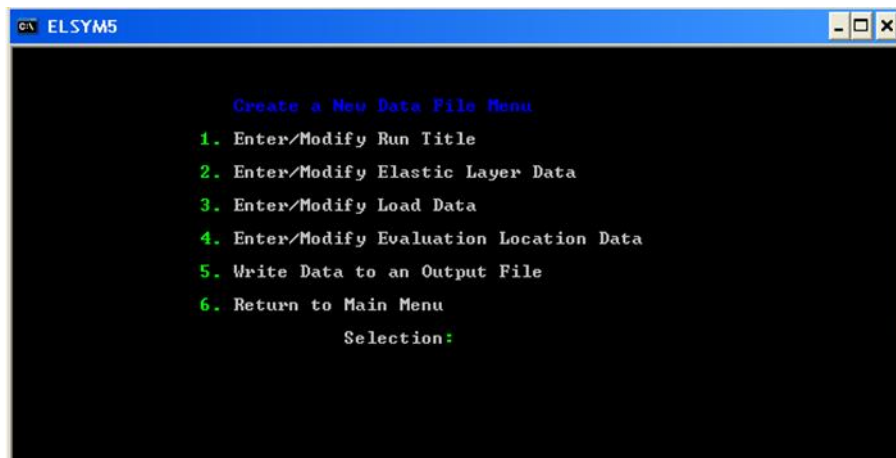
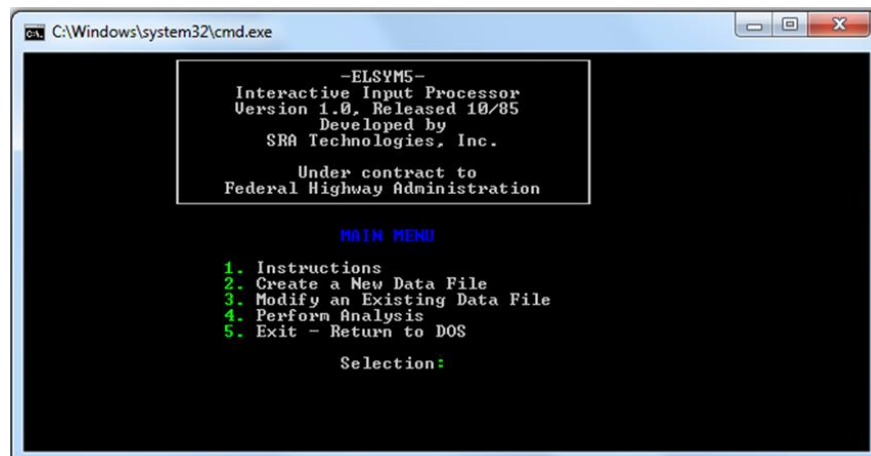


Figura 50 - Menu principal

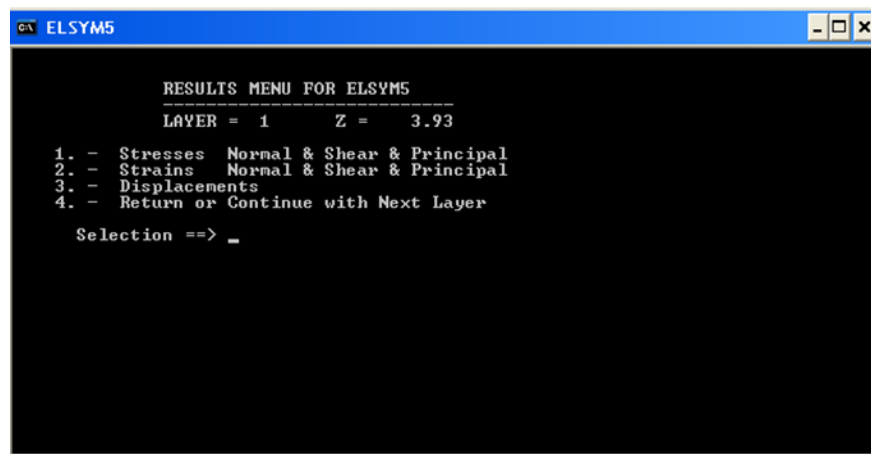


A partir desse estágio inicia-se a análise dos parâmetros. Selecione o n. 4 - Análise de desempenho no quadro do menu principal (Figura 51).

No quadro onde é perguntado se deseja salvar, digite N de não, pois como se trata de um micro com 32 bites, o programa não permite ser salvo.

Em seguida aparece: MENU DE RESULTADOS - 1ª. Camada na profundidade = 0,01 (Figura 51). Podem-se extrair: tensões (*stresses*) e deformações (*strain*) normais, principais e de cisalhamento e deslocamento (*displacements*)

Figura 51 - Menu de resultados - 1ª camada (0,01 cm)

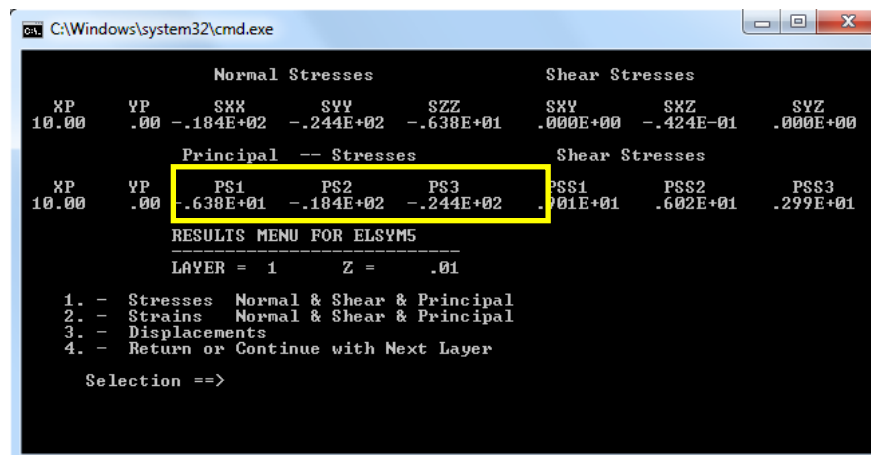


Selecionando o n. 1 *Stresses* (tensões) é aberto um quadro com tensões normais e principais e de cisalhamento (Figura 52). A tensão que deve ser considerada é a tensão principal.

Por convenção

- (-) compressão
- (+) tração
- PS1 e PS2 - tensões principais radiais
- PS3 - tensão vertical

Figura 52 - Tensões normais e radiais do 1º ponto da 1ª. camada



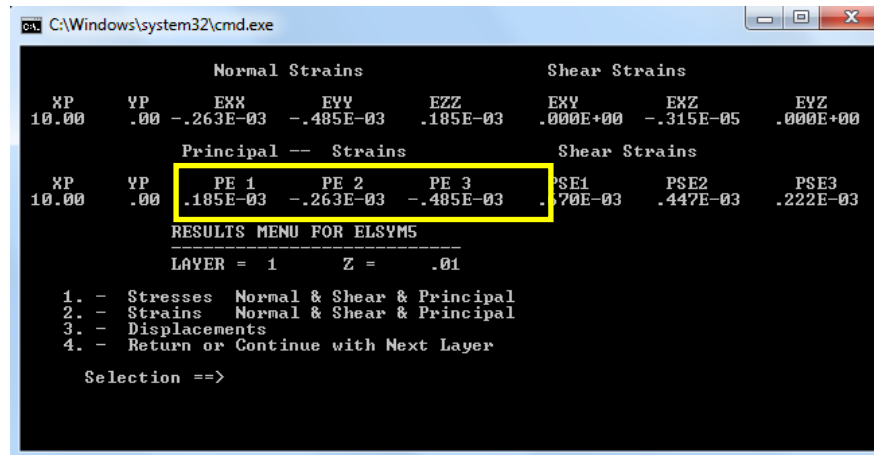
Analisando as tensões nesse ponto temos:

Sentido (x) a tensão radial PS1 com valor de compressão (-) de 6,38 kgf/cm² (-0,638 *10¹). No sentido (y) uma tensão de compressão (-) 18,4 kgf/cm² e no sentido z, tensão de compressão (-) 24,4 kgf/cm².

Observe-se que nesse ponto nos três sentidos (x, y e z) ocorre tensão de compressão.

Selecionando deformações (n. 2 do mesmo quadro), temos PE1 e PE2 como as deformações radiais e PE3 a deformação vertical (Figura 53).

Figura 53 - Deformações normais e radiais do 1º ponto da 1ª. camada.



Da mesma forma temos:

- Em (x) - PE1 = deformação de tração (+) = $0,185 \cdot 10^{-3} = 0,000185$ (cm/cm ou mm/mm).
- Em (y) - PE2 = deformação de compressão (-) = $2,63 \cdot 10^{-4}$ (mm/mm)
- Em (z) - PE3 = deformação de compressão (-) = $0,485 \cdot 10^{-3}$.

A maior deformação de compressão ocorreu em z, entretanto, conforme mencionado anteriormente, para misturas asfálticas deve-se monitorar as deformações de tração.

Por fim, os deslocamentos, selecione o n. 3 no mesmo quadro (*displacements*) (Figura 53)

UX e UY = deslocamentos radiais e, YZ = deslocamento vertical

- Em (x) - UX = $0,878 \cdot 10^{-3}$ (cm), $0,0000878$ mm = $8,78 \cdot 10^{-5}$ mm
- Em (y) - UY = 0, nesse caso não houve deslocamento mensurável.
- Em (z) - UZ = $0,206 \cdot 10^0$ (cm) = $0,296$ cm = $2,96$ mm

Observe-se que nesse ponto ocorreu 2,96 mm de deslocamento na vertical. Trata-se de um valor consideravelmente elevado. Isso deve-se às características dos parâmetros de módulo de resiliência atribuídos às camadas e as espessuras consideradas.

Dando sequência, clicar o número 4 (*Return or continue with next layer*) (Figura 53) e abrirá a próxima janela apresentada na Figura 54. Observe que ainda estamos analisando a 1ª camada só que na profundidade de 9,99 cm.

Figura 54 - Deslocamentos normais e radiais do 1º ponto da 1ª. camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

RESULTS MENU FOR ELSYM5
LAYER = 1      Z = 9.99
1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer
Selection ==>
  
```

Dando sequência, são apresentados os doze quadros correspondentes aos demais pontos. Observe-se que são três quadros para cada ponto: tensão, deformação e deslocamento. (Figuras 55 a 69)

Figura 55 - Tensão normais e radiais do 2º ponto da 1ª. camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Normal Stresses
XP  YP  SXX  SYV  SZZ
10.00 .00 .117E+02 .189E+02 -.957E+00
Shear Stresses
SXV  SXZ  SVZ
.000E+00 -.114E-01 .000E+00

Principal -- Stresses
XP  YP  PS1  PS2  PS3
10.00 .00 .189E+02 .117E+02 -.957E+00
Shear Stresses
PSS1  PSS2  PSS3
.992E+01 .361E+01 .631E+01

RESULTS MENU FOR ELSYM5
LAYER = 1      Z = 9.99
1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer
Selection ==> _
  
```

Figura 56 - deformação normais e radiais do 2º ponto da 1ª. camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Normal Strains
XP  YP  EXX  EVY  EZZ
10.00 .00 .179E-03 .448E-03 -.289E-03
Shear Strains
EXV  EXZ  EVZ
.000E+00 -.848E-06 .000E+00

Principal -- Strains
XP  YP  PE 1  PE 2  PE 3
10.00 .00 .448E-03 .179E-03 -.289E-03
Shear Strains
PSE1  PSE2  PSE3
.737E-03 .269E-03 .469E-03

RESULTS MENU FOR ELSYM5
LAYER = 1      Z = 9.99
1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer
Selection ==> _
  
```

Figura 57 - deslocamentos normais e radiais do 2º ponto da 1ª. camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Displacements
XP      YP      UX      UY      UZ
10.00   .00   -.731E-03   .000E+00   .206E+00

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 1      Z = 9.99
1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer
Selection ==> _
  
```

Figura 58 - Menu de resultados da 2ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 2      Z = 27.99
1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer
Selection ==>
  
```

Figura 59 - Tensão normais e radiais 2ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Normal Stresses      Shear Stresses
XP      YP      SXX      SYV      SZZ      SXY      SXZ      SYZ
10.00   .00   .326E+00   .400E+00   -.450E+00   .000E+00   .310E-01   .000E+00

Principal -- Stresses      Shear Stresses
XP      YP      PS1      PS2      PS3      PSS1      PSS2      PSS3
10.00   .00   .400E+00   .327E+00   -.451E+00   .425E+00   .361E-01   .389E+00

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 2      Z = 27.99
1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer
Selection ==>
  
```

Figura 60 - Deformações normais e radiais 2ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Normal Strains
XP    YP    EXX    EYY    EZZ
10.00 .00    .430E-03 .554E-03 -.880E-03
Principal -- Strains
XP    YP    PE 1    PE 2    PE 3
10.00 .00    .554E-03 .432E-03 -.882E-03
Shear Strains
EXY    EXZ    EVZ
.000E+00 .105E-03 .000E+00
PSE1    PSE2    PSE3
.144E-02 .122E-03 .131E-02

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 2      Z = 27.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
  
```

Figura 61 - Deslocamentos normais e radiais 2ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Displacements
XP    YP    UX    UY    UZ
10.00 .00    -.218E-02 .000E+00 .189E+00

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 2      Z = 27.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
  
```

Figura 62 - Menu de resultados da 3ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 3      Z = 52.99

1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
  
```

Figura 63 - Tensões normais e radiais 3ª camada

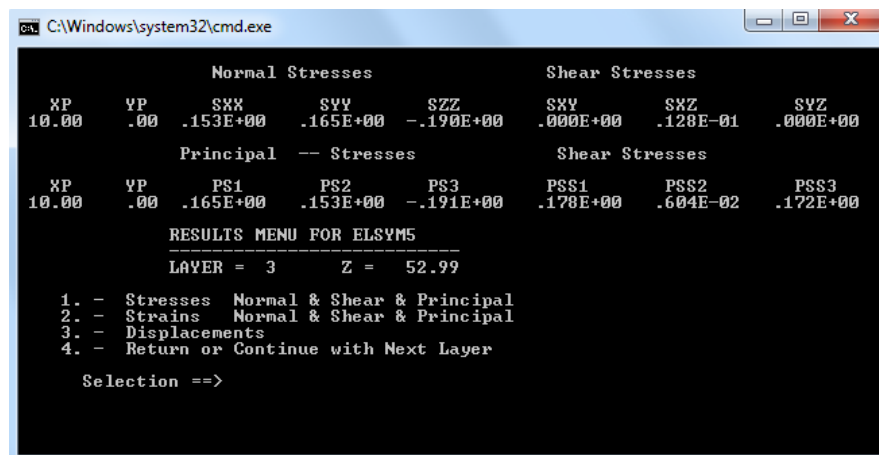


Figura 64 - Deformações normais e radiais 3ª camada

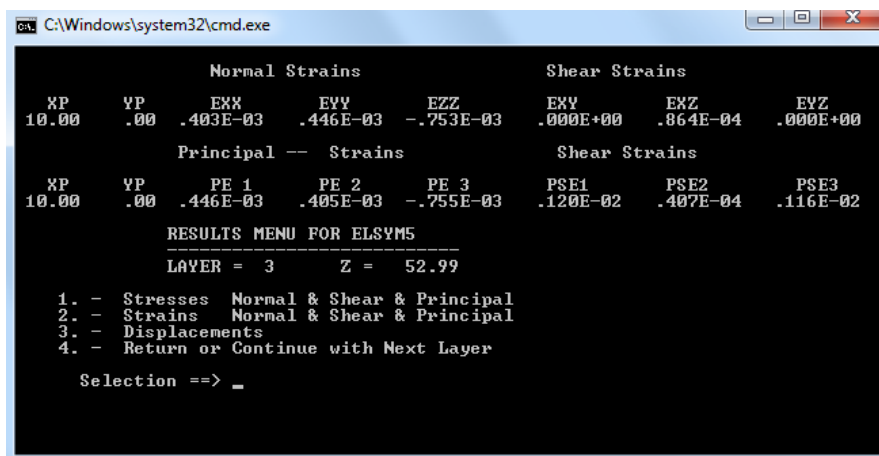


Figura 65 - Deslocamentos normais e radiais 3ª camada

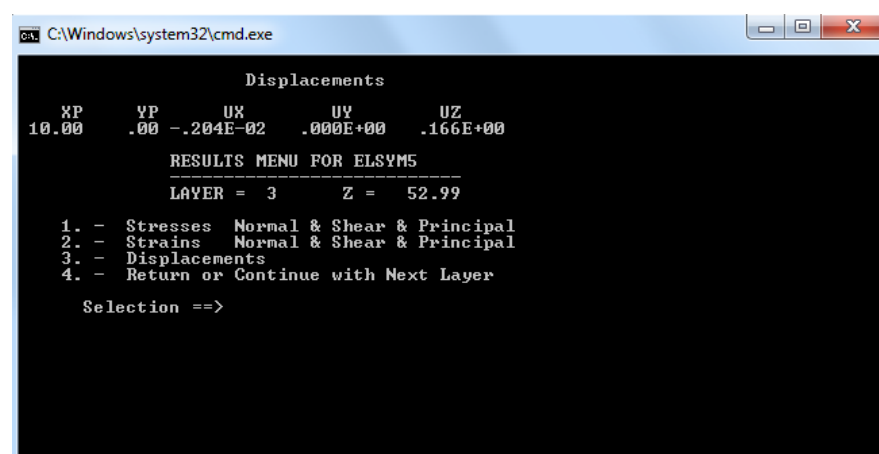


Figura 66 - Menu de resultados da 5ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

RESULTS MENU FOR ELSYM5
=====
LAYER = 5      Z = 88.01

1. - Stresses  Normal & Shear & Principal
2. - Strains   Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
  
```

Figura 67 - Tensões normais e radiais 5ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Normal Stresses
=====
XP    YP    SXX    SYX    SZZ
10.00 .00 -.256E-02 -.144E-02 -.794E-01

Shear Stresses
=====
SXV    SXZ    SYZ
.000E+00 .281E-02 .000E+00

Principal -- Stresses
=====
XP    YP    PS1    PS2    PS3
10.00 .00 -.144E-02 -.246E-02 -.795E-01

Shear Stresses
=====
PSS1    PSS2    PSS3
.390E-01 .511E-03 .385E-01

RESULTS MENU FOR ELSYM5
=====
LAYER = 5      Z = 88.01

1. - Stresses  Normal & Shear & Principal
2. - Strains   Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
  
```

Figura 68 - deformações normais e radiais 5ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Normal Strains
=====
XP    YP    EXX    EYX    EZZ
10.00 .00 .376E-03 .394E-03 -.063E-03

Shear Strains
=====
EXV    EXZ    EYZ
.000E+00 .906E-04 .000E+00

Principal -- Strains
=====
XP    YP    PE 1    PE 2    PE 3
10.00 .00 .394E-03 .378E-03 -.064E-03

Shear Strains
=====
PSE1    PSE2    PSE3
.126E-02 .165E-04 .124E-02

RESULTS MENU FOR ELSYM5
=====
LAYER = 5      Z = 88.01

1. - Stresses  Normal & Shear & Principal
2. - Strains   Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
  
```

Figura 69 - Deslocamentos normais e radiais 5ª camada

```

C:\Windows\system32\cmd.exe

Displacements
XP      YP      UX      UY      UZ
10.00   .00   -.187E-02   .000E+00   .140E+00

RESULTS MENU FOR ELSYM5
-----
LAYER = 5      Z = 88.01
1. - Stresses Normal & Shear & Principal
2. - Strains Normal & Shear & Principal
3. - Displacements
4. - Return or Continue with Next Layer

Selection ==>
  
```

Na Tabela 46 é apresentado o resumo das tensões, deformações e deslocamentos dos cinco pontos da estrutura no programa Elsym 5. A análise foi feita a título de exemplo, o que demonstra que não faz sentido a análise em vários pontos considerados. Devido às características de rigidez das camadas de base, sub-base e de reforço, verificadas através de seus respectivos módulos de resiliência, não se tratam de materiais cimentados, assim, a determinação dos parâmetros de análise em vários desses pontos não se faz necessário.

Tabela 46 - Resumo dos parâmetros de análise da estrutura

Camadas e posição (cm)	Parâmetros		
1ª - 0,01 cm	Tensões (kgf/cm ²)		
	PS1	PS2	PS3
	-0,638*10 ⁻¹	-0,184*10 ⁻²	-0,244*10 ⁻²
	Deformações radiais (mm/mm)		
	PE1	PE2	PE3
	0,185*10 ⁻³	-0,263*10 ⁻³	-0,485*10 ⁻³
	Deslocamentos radiais (mm)		
	UX	UY	UZ
	0,878*10 ⁻²	0,00	2,93
1ª - 9,99 cm	Tensões (kgf/cm ²)		
	PS1	PS1	PS1
	0,189*10 ⁻²	0,117*10 ⁻²	-0,957
	Deformações radiais (mm/mm)-		
	PE1	PE1	PE1
	0,448*10 ⁻³	0,179*10 ⁻³	-0,289*10 ⁻³
	Deslocamentos radiais (mm)		
	UX	UY	UZ
	-0,731*10 ⁻²	0,00	2,06
2ª - 27,99 cm	Tensões (kgf/cm ²)		
	PS1	PS1	PS1
	0,400	0,327	0,451
	Deformações radiais (mm/mm)		
	PE1	PE1	PE1
	0,554*10 ⁻³	0,432*10 ⁻³	-0,882*10 ⁻³
	Deslocamentos radiais (mm)		
	UX	UY	UZ
	-0,218*10 ⁻¹	0,00	1,89
3ª - 52,99	Tensões (kgf/cm ²)		
	PS1	PS2	PS3
	0,165	0,153	-0,191
	Deformações radiais (mm/mm)		
	PE1	PE2	PE3
	0,446*10 ⁻³	0,405*10 ⁻³	-0,755*10 ⁻³
	Deslocamentos radiais (mm)		
	UX	UY	UZ
	-0,204*10 ⁻¹	0,00	1,66
5ª - 88,01 cm	Tensões (kgf/cm ²)		
	PS1	PS2	PS3
	-0,144*10 ⁻²	-0,246*10 ⁻²	-0,795*10 ⁻¹
	Deformações radiais (mm/mm)		
	PE1	PE2	PE3
	0,394*10 ⁻³	0,378*10 ⁻³	-0,864*10 ⁻³
	Deslocamentos radiais (mm)		
	UX	UY	UZ
	-0,187*10 ⁻¹	0,00	1,40

Os pontos críticos para essa estrutura são: o deslocamento vertical na superfície (U_v), a deformação de tração (ϵ_t) na fibra inferior do revestimento (9,99 cm) e a tensão vertical (τ_v) no topo do subleito (88,01 cm) sendo:

U_v na superfície do pavimento = 2,93 mm

ϵ_t na fibra inferior da camada de rolamento = $0,448 \cdot 10^{-3}$ (mm/mm) e,

τ_v no topo do subleito = $-0,795 \cdot 10^{-1}$ (kgf/cm²)

6.3.2.3 – Tensão vertical – topo do subleito

Para a tensão vertical (τ_{adm}) no topo do subleito determinada no programa Elsym 5 $\tau_v = -0,795 \cdot 10^{-1}$ (kgf/cm²), segundo a equação proposta por Heukelon, resultou em um número N de $2,62 \cdot 10^{-3}$ solicitações. Trata-se de um valor de N muito baixo.

Em resumo, pelo deslocamento na superfície e pela tensão admissível no topo do subleito, pode-se concluir que a estrutura está subdimensionada.

6.6 - MEDINA - Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos

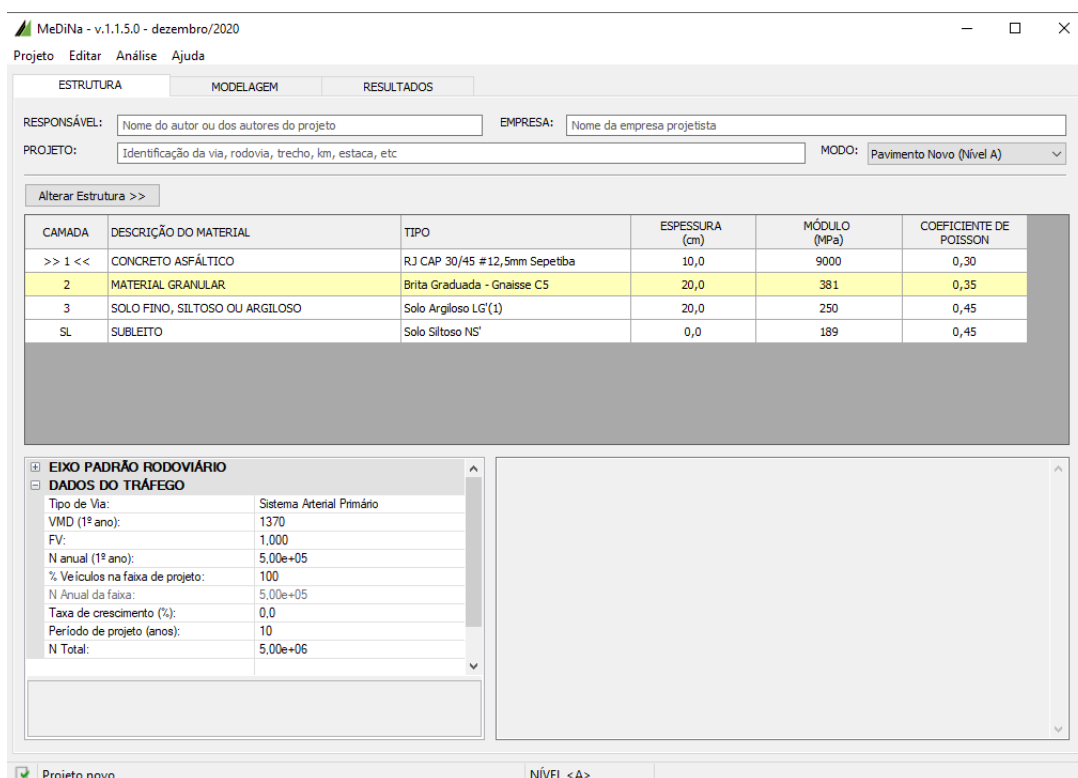
O Método de dimensionamento Nacional de pavimento é uma ferramenta de cálculo do método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, desenvolvido pelo DNIT e apresentado em 2018 posteriormente sofreu algumas modificações em 2019 e 2020.

O método está disponível no site do DNIT e conta três manuais:

- Manual de Utilização do AEMC - Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas que calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos com até oito camadas sob carregamento de rodas do tipo eixo rodoviário
- Manual de Utilização do BackMedina - Um programa que realiza a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento a partir das bacias deflectométricas levantadas em campo por equipamentos do tipo FWD.
- Manual de Utilização do MeDiNa - Um programa de computador que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas.

O Programa Medina apresenta uma tela inicial (**Figura 70**), em que a primeira aba: "ESTRUTURA" é apresentado um cabeçalho e uma estrutura com 4 camadas com os parâmetros característicos correspondentes. Pode-se alterar o número de camadas e modificar os parâmetros, como espessura, módulo etc., além de incrementar ou diminuir camadas.

Figura 70 – Tela inicial do Medina



MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto EMPRESA: Nome da empresa projetista

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetba	10,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaiss C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG'(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS'	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1.000
N anual (1º ano):	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	5,00e+06

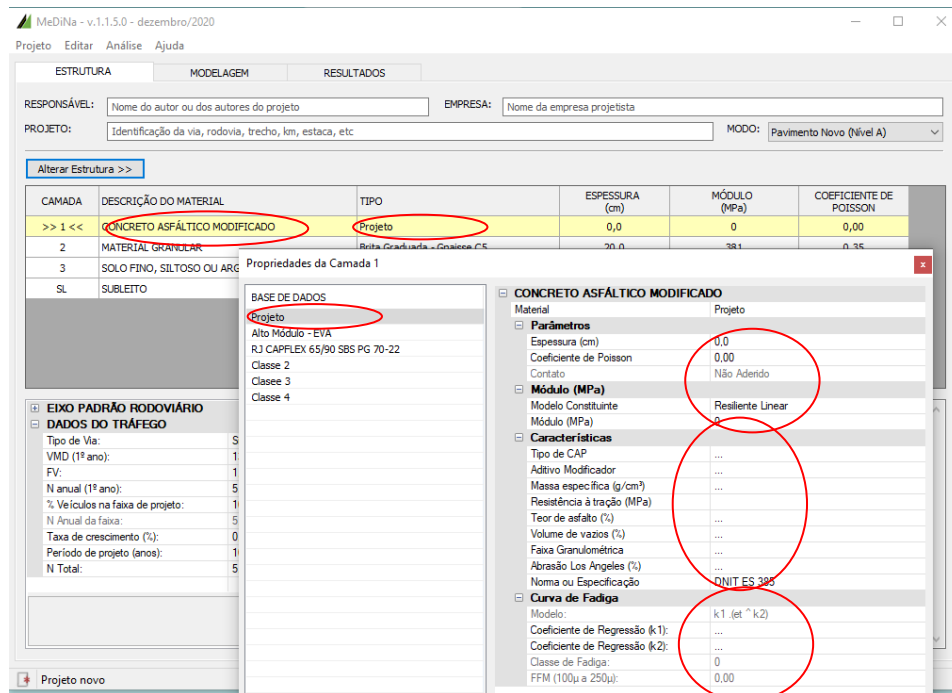
Projeto novo NÍVEL <A>

Importante - ao utilizar o programa é necessário que os parâmetros que caracterizam os materiais utilizados como: módulo de resiliência, deformação permanente e a fadiga, sejam dos materiais que serão utilizados na construção do pavimento. Assim, os parâmetros encontrados no banco de dados do programa referem-se única e exclusivamente a finalidade didática de manuseio do programa.

Para adicionar um novo material, na coluna "DESCRIÇÃO DO MATERIAL" selecionar, por exemplo: 1ª. Camada e adicionar um novo material concreto asfáltico modificado, em seguida, na coluna "TIPO" adicionar um novo material em "PROJETO" e preencher todos os parâmetros e coeficientes que caracterizam esse novo material: módulo de resiliência, deformação permanente e fadiga (

Figura 71). Proceder dessa forma com todos os materiais correspondentes ao número de camadas da estrutura a ser testada.

Figura 71 - Incremento de material - Medina



MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto EMPRESA: Nome da empresa projetista

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	Projeto	0,0	0	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	Reta Graduada - Granica CE	20,0	38,1	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARG				
SL	SUBLEITO				

Propriedades da Camada 1

BASE DE DADOS

Projeto

Alto Módulo - EVA

RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22

Classe 2

Classe 3

Classe 4

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: S

VMD (1º ano): 1

FV: 1

N anual (1º ano): 5

% Veículos na faixa de projeto: 1

N Anual da faixa: 5

Taxa de crescimento (%): 0

Período de projeto (anos): 1

N Total: 5

CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO

Material: Projeto

Parâmetros

Espessura (cm): 0,0

Coefficiente de Poisson: 0,00

Contato: Não Aderido

Módulo (MPa)

Modelo Constituinte: Resiliente Linear

Módulo (MPa): 0

Características

Tipo de CAP: ...

Aditivo Modificador: ...

Massa específica (g/cm³): ...

Resistência à tração (MPa): ...

Teor de asfalto (%): ...

Volume de vazios (%): ...

Faixa Granulométrica: ...

Abração Los Angeles (%): ...

Norma ou Especificação: DNIT ES 395

Curva de Fadiga

Modelo: k1 (et. ° k2)

Coefficiente de Regressão (k1): ...

Coefficiente de Regressão (k2): ...

Classe de Fadiga: 0

FFM (100µ a 250µ): 0,00

No programa também é possível determinar o número N de solicitações ESRD durante a vida de serviço. Na mesma tela inicial, na parte inferior (Figura 72) preencher os campos solicitados e automaticamente é calculado o Número N.

Figura 72 - Determinação do número N - Medina

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto EMPRESA: Nome da empresa projetista

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO	Alto Módulo - EVA	10,0	10982	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaíse C5	20,0	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS	0,0	189	0,45

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário

VMD (1º ano): 1370

FV: 1.000

N anual (1º ano): 5,00e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100

N Anual da faixa: 5,00e+05

Taxa de crescimento (%): 0,0

Período de projeto (anos): 10

N Total: 5,00e+06

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

Projeto novo NÍVEL <A>

Após a inserção dos materiais e seus respectivos parâmetros e coeficientes e a determinação do número N, proceder com o dimensionamento da estrutura. Observe-se que ao processar o dimensionamento, somente uma camada será avaliada quanto as suas características, essa camada é a camada que está selecionada (com aspas no número da camada).

Para dimensionar, acionar "análise" e em seguida "dimensionar (F2)". Como resultado é apresentado um descritivo (Figura 73)

Figura 73 - Descritivo como resultado do dimensionamento

MeDiNa - v.1.1.5.0 - dezembro/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Nome do autor ou dos autores do projeto EMPRESA: Nome da empresa projetista

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc. MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	11,0	9000	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Brita Graduada - Gnaíse C5	20	381	0,35
3	SOLO FINO, SILTOSO OU ARGILOSO	Solo Argiloso LG(1)	20,0	250	0,45
SL	SUBLEITO	Solo Siltoso NS	0,0	189	0,45

Entre com os dados dos materiais

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Primário

VMD (1º ano): 2000

FV: 1.000

N anual (1º ano): 7,30e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100

N Anual da faixa: 7,30e+05

Taxa de crescimento (%): 0,0

Período de projeto (anos): 10

N Total: 7,30e+06

VMD (1º ano): Volume Médio Diário no ano de abertura do tráfego

DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO NOVO ---

Seção do pavimento dimensionada considerando os dados inseridos pelo Engenheiro Projetista no programa MeDiNa.

Nível de confiabilidade da análise: 85%

Área Trinçada Estimada do pavimento no fim do período: 29,1%

Afundamento de Trilha de Roda: 3,7mm

Os resultados obtidos pelo programa devem ser avaliados criteriosamente antes de serem aprovados para a execução de campo.

Projeto novo NÍVEL <A>

Como resultado têm-se as seguintes observações

Nível de confiabilidade da análise: 85% - para estrutura testada tem-se estatisticamente 85% de confiabilidade nos resultados

Área Trincada Estimada do pavimento no fim do período: 29,1% - Devido ao número de camadas, aos parâmetros e coeficientes de módulo de resiliência, deformação permanente e fadiga e as espessuras inseridas na estrutura, como resultado tem-se 29,1% de área trincada para o período de 10 anos de serviço.

Afundamento de Trilha de Roda: 3,7mm - De forma análoga à % de área trincada, têm-se a previsão de deformação permanente de 3,7 mm para o período de projeto.

Os resultados obtidos pelo programa devem ser avaliados criteriosamente antes de serem aprovados para a execução de campo.

Também é possível acessar relatórios contendo todos os detalhes do dimensionamento bem com as bacias de deflexão

Os programas podem ser obtidos do site do DNIT. Abaixo estão elencados os sites para acessar os programas Medina, além de um tutorial no Youtube.

<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina>

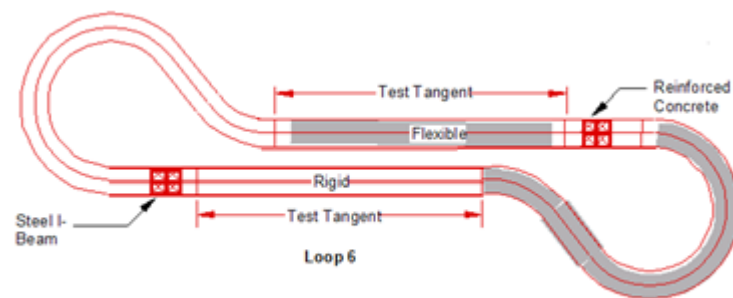
<file:///D:/Users/Edson/Desktop/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>

<https://www.youtube.com/watch?v=G2uGooek3o4>

7.1 - Histórico

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO baseia-se em dados coletados da pista experimental da AASHTO, que projetada a partir de 1951 e construída entre 1956 e 1958 na cidade Ottawa, Illinois - USA. Teve seu tráfego, utilizado na elaboração do dimensionamento, monitorado entre 1958 e 1960 e apresenta as versões: 61, 72, 86, 93, 2000 e 2002. Na **Figura 74** é apresentada as características do loop utilizado.

Figura 74 - Características do loop da pista da AASHTO ROAD TEST



Na **Figura 75** estão apresentados os seis loops construídos entre a cidade de Ottawa e Utica no Estado de Illinois - USA e na **Figura 76** detalhe de um dos loops.

Figura 75 - Os seis loops da AASHTO ROAD TEST

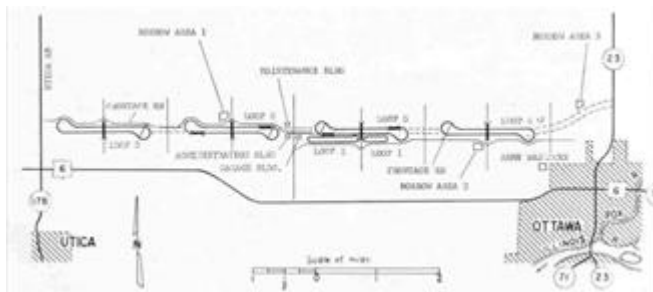


Figura 76 - Detalhe de um dos loops



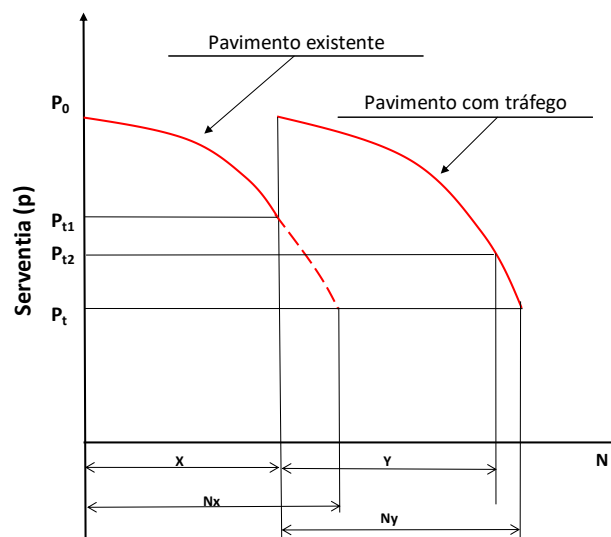
7.2 - Serventia

Foram avaliados os efeitos de cargas de tráfego, o que, por meio de fatores de equivalência de carga estrutural definidos ao final dos experimentos, consubstanciou-se no estabelecimento da relação entre a repetição de cargas (80kN - eixo padrão) com a espessura das camadas e a perda de qualidade de rolamento expressa em termos da variação da serventia.

Entre os diversos resultados obtidos das pesquisas, o experimento de destacou pelo estabelecimento de um modo de quantificar a condição de ruptura de um pavimento, baseado na opinião subjetiva dos usuários e na mensuração objetiva de determinados defeitos nos pavimentos. Este modo de avaliação da condição de ruptura consiste na aferição da condição de serventia do pavimento. A serventia (p) pode ser definida como uma medida de quão bem um pavimento em dado instante do tempo serve ao tráfego usuário, com conforto e segurança de rolamento, considerando-se a existência de tráfego misto, sob qualquer condição climática. Tal medida varia entre 0,5 e 5,0, sendo o valor 5,0 como o pavimento em melhor qualidade.

O desenvolvimento da serventia de um dado pavimento em função da solicitação do tráfego, sendo a serventia a habilidade de um pavimento servir ao tráfego com segurança, conforto e economia. (Figura 77)

Figura 77 - Esquema da serventia de um dado pavimento



Onde: P_0 = serventia inicial do pavimento original ou da camada de reforço quando construída;

P_{t1} = serventia final do pavimento existente exatamente antes da construção da camada de reforço;

P_{t2} = serventia final desejada com a camada de reforço depois da passagem do tráfego previsto;

P_f = serventia final quando da ruptura;

x = número de repetições equivalentes no momento em que o reforço será construído;

y = número de repetições equivalentes durante a vida em serviço do reforço;

Nx= número de repetições necessários para o pavimento existente atingir a ruptura; e,
 Ny= número de repetições necessários para o pavimento com reforço atingir a ruptura.

7.3 – Equação de Desempenho

As equações para dimensionamento do método da AASHTO/93 estão baseadas no binômio serventia-desempenho: serventia é uma medida da habilidade de um pavimento de cumprir suas funções em um momento particular do tempo, desempenho é a medida da história de serventia de um pavimento no decorrer do tempo.

A Equação 37 relaciona o tráfego (N), a serventia e as espessuras de camadas para descrever o desempenho de dado pavimento no tempo, para pavimentos flexíveis:

$$\log W_{18} = Z_R \times S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07 \quad 37$$

Subleito – Módulo de resiliência característico

Obtenção do valor de módulo de resiliência característico ponderado pelo parâmetro da sazonalidade e umidade (Uf) - Equação 38

$$U_f = \left(\frac{3020}{MR}\right)^{2,3} \quad (38)$$

Na Tabela 47 são apresentados, a título de exemplo, valores de módulo de resiliência para a camada de subleito encontrados para as estações do ano e o valor da Ufm.

Tabela 47 – Valores de módulo de resiliência associado a sazonalidade

Estação	MR (psi)	Uf
Primavera	9000	0,0811
Verão	6500	0,1715
Outono	10000	0,0637
Inverno	10000	0,0637
Ufm		0,0950

Módulo de resiliência característico

$$\text{Log MR} = 3,478 - 0,435 \text{Log } U_f$$

$$\text{Para } U_{fm} = 0,950 - \text{MR} = 8400 \text{ psi}$$

SN - Structural Number, é o número estrutural, ele indica um valor abstrato que expressa a capacidade estrutural de dado pavimento, necessária para dada combinação de suporte de subleito (por intermédio de seu módulo de resiliência) número total de repetições de um eixo-padrão de 80kN, serventia desejada para o final do período de projeto (vida útil) e condições ambientais (AASHTO, 1986), calculado pela equação 39:

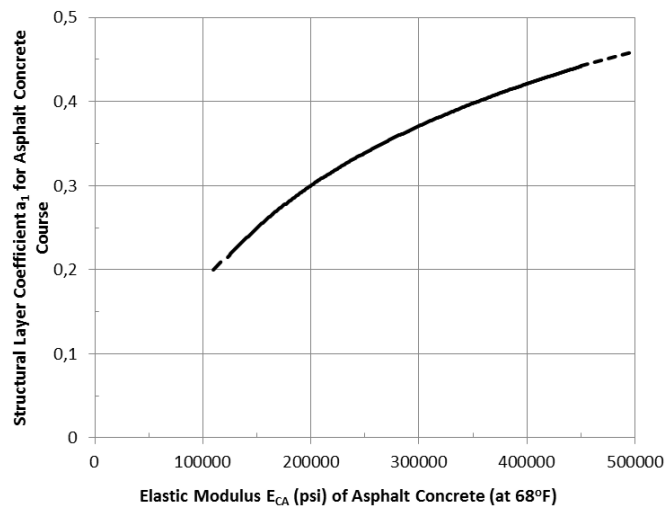
$$\text{SN} = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3 \quad (39)$$

Onde:

- a_i = coeficiente estrutural da i-ésima camada
- D_i = espessura (em polegadas) da i-ésima camada
- m_i = coeficiente de drenagem da i-ésima camada.

O coeficiente estrutural do concreto asfáltico (a_1) pode ser determinado pelo gráfico da Figura 78.

Figura 78 - Determinação do coeficiente estrutural do concreto asfáltico a_1



Os coeficientes estruturais da base granulares (a_2) e da sub-base granulares (a_3) podem ser obtidos com as equações apresentadas na Tabela 48.

Tabela 48 - Coeficiente estruturais das camadas de base e sub-base

Camada	Equação
Bases granulares	$a_2 = 0,249 \log E_B - 0,977$
Sub-bases granulares	$a_3 = 0,277 \log E_{SB} - 0,839$

Recomenda-se que para obtenção do módulo de resiliência com base no valor de CBR aplica-se a Equação 40:

$$MR (\text{psi}) = 1500 * CBR \quad (40)$$

A qualidade da drenagem do pavimento associada a capacidade de escoamento de 50% da água adsorvida é apresentada na Tabela 49. Os valores de m_i variam de 0,4 a 1,4 (Tabela 50) e é função das condições da permeabilidade e escoamento da água da estrutura das camadas de base, sub-base e reforço.

Tabela 49 - tempo de escoamento de 50% da água adsorvida

Qualidade de drenagem	Tempo para remoção de 50% da água adsorvida
Excelente	2 horas
Boa	1 dia
Regular	1 semana
Pobre	1 mês
Muito pobre	Não drena

Tabela 50 - Valor de m_i - coeficiente de drenagem

Qualidade de drenagem	Porcentagem do tempo em que a estrutura é exposta à saturação			
	Mneios do que 1%	1 a 5%	5 a 25%	Mais do que 25%
Excelente	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
Boa	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,00
Regular	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,80
Pobre	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,60
Muito pobre	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

Z_r = é o nível de confiança embutido no processo de dimensionamento para assegurar que as alternativas de projeto, atemem para o período de vida útil estipulado, conforme limites especificados na Tabela 51.

Tabela 51 - Valores especificados de Z_r

Classificação funcional de vias	Nível de confiança recomendado Z_r para vias (%)	
	Urbanas	Rurais
Free ways	85 - 99,9	80 - 99,9
Atérias principais	80 - 90	75 - 95
Coletoras	80 - 95	75 - 95
Locais	50 - 80	50 - 80

S_0 é o desvio padrão combinado de todas as variáveis de projeto, sendo de $S_0 = 0,35$ para pavimentos flexíveis e $S_0 = 0,45$ para pavimentos de concreto.

Tabela 52 é apresentado os materiais normalmente empregados e o os respectivos valores de: módulo de resiliência e coeficiente estruturais.

Tabela 52 - Materiais, módulos de resiliência e coeficientes estruturais

Material	Parâmetro de controle	CE
CAUQ e PMQ a 20°C	MR= 3.160 MPa	0,44
	MR= 2.110 MPa	0,37
	MR= 1.406 MPa	0,3
Bases granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 33%	0,10
Sub-base granulares	CBR = 100%	0,14
	CBR = 23%	0,1
Materiais cimentados (7 dias)	$R_{c,7} = 5,6$ MPa	0,22
	$R_{c,7} = 3,1$ MPa	0,16
	$R_{c,7} = 1,4$ MPa	0,13

Determinação das espessuras

As espessuras das camadas (D) são determinadas pelos seguintes passos:

Determinação dos números estruturais necessários sobre o subleito (SN3), sobre a sub-base (SN2) e sobre a base (SN1). Para tanto deverá ser utilizada a equação 1. O cálculo dos números estruturais necessários sobre o subleito, sub-base e base é realizado com a utilização dos respectivos módulo de resiliência, representativo de cada uma das camadas.

A espessura do revestimento (D1) é então calculada pela Equação 41:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad (41)$$

A espessura da base (D2) é então calculada pela Equação 42:

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 * m_2} \quad (42)$$

A espessura da sub-base (D3) é então calculada pela Equação 43:

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 * m_3} \quad (43)$$

Importante! As espessuras obtidas com as equações acima devem respeitar as espessuras mínimas da Tabela 53.

Tabela 53 - Espessuras mínimas do revestimento e de bases granulares em função do N

N* - Número de solicitações do eixo padrão - 80 kN	Revestimento de CA (polegadas)	Base granular (polegadas)
$N < 5 \times 10^4$	1" ou TS**	4"
$5 \times 10^4 < N < 1,5 \times 10^5$	2"	4"
$1,5 \times 10^5 < N < 5 \times 10^5$	2,5"	4"
$5 \times 10^5 < N < 2 \times 10^6$	3"	6"
$2 \times 10^6 < N < 7 \times 10^6$	3,5"	6"
$N > 7 \times 10^6$	4"	6"

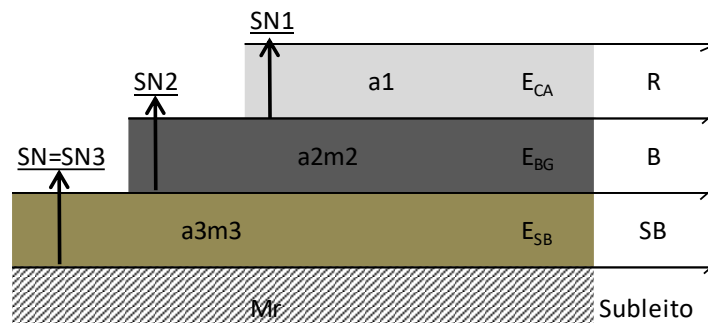
(*) - N número de repetições do ESRD (80 kN) - FECs da pista da AASHTO

(**) - possível emprego de tratamento superficial

Na

Figura 79 é apresentado o esquema elucidativo da estrutura das camadas de um pavimento dimensionado pelo método da AASHTO/93.

Figura 79 - Esquema elucidativo da estrutura das camadas - AASHTO/93



Exercício resolvido

Dados: Dimensionar um pavimento pelo método da AASHTO-1993 considerando os seguintes parâmetros de projeto:

- $N = 6,8 \cdot 10^7$ solicitações (valor obtido para os FECs da AASHTO)
- Tipo de via arterial urbana,
- Nível de serventia inicial = 4,2.
- Módulo de resiliência efetivo do subleito = 3.500 psi.
- Materiais disponíveis: CAUQ ($M_r = 500.000 \text{ psi}$),
BGS com CBR=70% e
Sub-base granular com CBR=30%.
- Condição de drenagem do pavimento excelente, sem saturação.
- Nível de serventia final = 2,5

Resolução

Nível de confiança

$$Z_r * S_0 = 90\% * 0,35 = 0,315$$

(i) SN da camada de sub-base

Para a determinação da camada de SN + 1 assente sobre o subleito, considerar na equação 34 o valor de módulo de resiliência do subleito, MR = 3500 psi, logo temos:

$$\text{Log}(6,8 * 10^7) = 0,315 + 9,36 * \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \frac{4,2 - 2,5}{4,2 - 1,5}}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1) * 5,19}} + 2,32 \log 3500 - 8,07$$

$$7,8325 = 0,2672 + 9,36 \log(SN + 1) + \frac{0,2009}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1) * 5,19}}$$

Lado esquerdo

lado direito

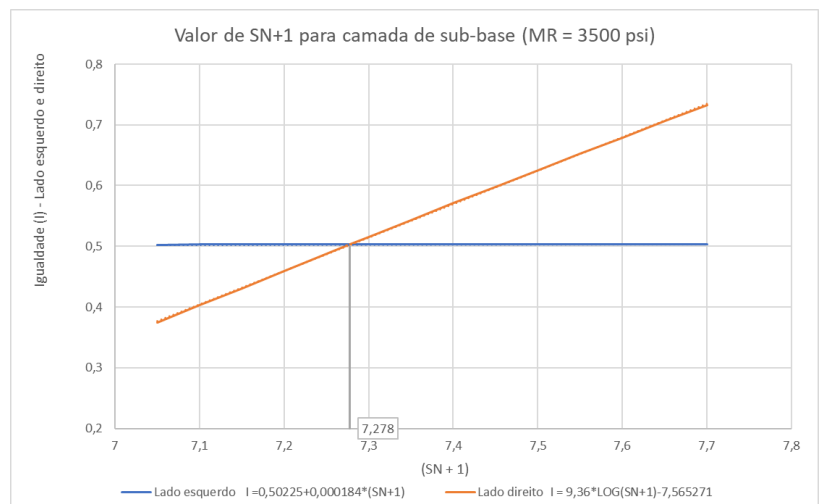
$$\frac{0,2009}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1) * 5,19}} = 9,36 \log(SN + 1) - 7,5653$$

Para a determinação do valor de SN + 1 da camada de sub-base, atribui-se valores para SN + 1 (Tabela 54) de maneira que a igualdade seja verdadeira (Figura 80), temos:

Tabela 54 - Valores de SN+1

MR subleito - 3500 psi		
SN + 1	Lado esq.	Lado Dir.
7,05	0,5035	0,3738
7,10	0,5036	0,4025
7,15	0,5036	0,4310
7,20	0,5036	0,4594
7,25	0,5036	0,4875
7,30	0,5036	0,5154
7,35	0,5036	0,5432
7,40	0,5036	0,5707
7,45	0,5036	0,5981
7,50	0,5036	0,6253
7,55	0,5036	0,6523

Figura 80 - Igualdade entre os lados esquerdo e direito



Considera-se então 7,278 de onde se obtém $SN = SN_3 = 6,278$ esse valor SN a da camada do pavimento sobre o subleito (sub-base).

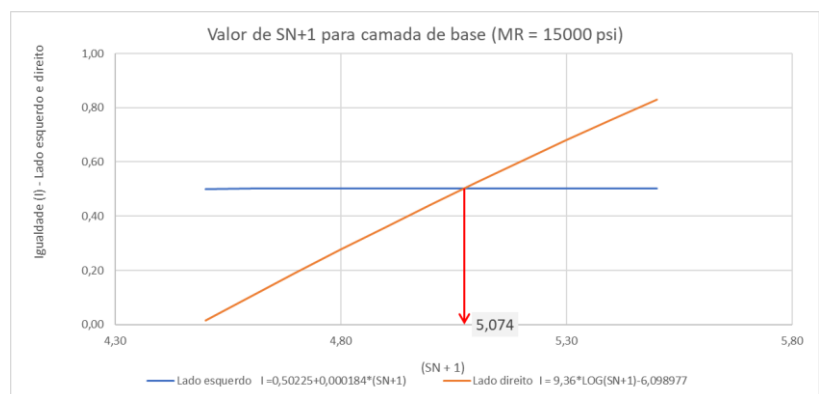
(ii) SN da camada de base

Da mesma forma, para a determinação da espessura da camada de SN + 1 (base) assente sobre a camada de sub-base, considerar na equação 34 o valor de módulo de resiliência da camada de sub-base $MR = 15.000$ psi (CBR = 30%). Atribui-se valores para SN + 1 (Tabela 55) de maneira que a igualdade seja verdadeira (Figura 81), temos:

Tabela 55 - Valores de SN + 1
para camada de base

MR sub-base = 15.000 psi		
SN + 1	Lado esq.	Lado Dir.
4,50	0,5031	0,0151
4,60	0,5031	0,1044
4,70	0,5031	0,1919
4,80	0,5031	0,2774
4,90	0,5032	0,3613
5,00	0,5032	0,4434
5,10	0,5032	0,5239
5,20	0,5032	0,6028
5,30	0,5032	0,6802
5,40	0,5032	0,7562
5,50	0,5033	0,8308

Figura 81 - Igualdade entre os lados esquerdo e direito para
camada de base



Considera-se então 5,074 de onde se obtém $SN = SN_2 = 4,074$ esse valor SN da camada de base.

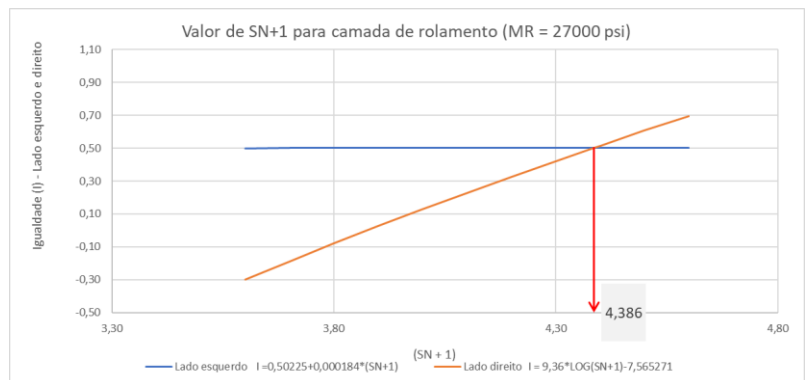
(iii) SN da camada de revestimento

Analogamente, para a determinação da espessura da camada de $SN + 1$ (revestimento) assente sobre a camada de base, considerar na equação 34 o valor de módulo de resiliência da camada de base $MR = 27.000$ psi ($CBR = 70\%$). Atribui-se valores para $SN + 1$ (Tabela 56) de maneira que a igualdade seja verdadeira (Figura 82), temos:

Tabela 56 - Valores de $SN + 1$ para camada de base

MR base = 27.000 psi		
$SN + 1$	Lado esq.	Lado Dir.
3,60	0,5029	-0,2998
3,70	0,5029	-0,1884
3,80	0,5029	-0,0800
3,90	0,5030	0,0256
4,00	0,5030	0,1285
4,10	0,5030	0,2289
4,20	0,5030	0,3269
4,39	0,5031	0,5030
4,40	0,5031	0,5160
4,50	0,5031	0,6073
4,60	0,5031	0,6967

Figura 82 - Igualdade entre os lados esquerdo e direito para camada de base



Considera-se então 4,386 de onde se obtém $SN = SN_1 = 3,386$ esse valor SN do revestimento. Para determinação das espessuras das camadas de sub-base, base e do revestimento, aplicar as equações 37, 38 e 39, para tanto determinar previamente os valores de a_1 , a_2 e a_3 e também m_2 e m_3 . Tabela 57

Tabela 57 - valores de SN, a_i e m_i

Camada	SN	a_i	m_i^{***}
Revestimento	$SN_1 = 3,386$	$a_1 = 0,46^*$	-
Base	$SN_2 = 4,074$	$a_2 = 0,13^{**}$	1,35
Sub-base	$SN_3 = 6,278$	$a_3 = 0,11^{**}$	1,35

(*) valor extraído da Figura 66

(**) valor determinada conforme Tabela 30

(***) valores de m_i adotado como excelente drenagem e sem saturação (Tabela 32)

Espessura do revestimento

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transportes e Obras de Terra

APOSTILA DE PROJETO DE PAVIMENTO

Prof. Dr. Edson de Moura

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{3,386}{0,46} = 7,36"$$

A espessura mínima recomendada para a camada de rolamento para o número N especificado é de 4", portanto o valor encontrado atende a espessura mínima.

Espessura da base

$$D_1 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_1 * m_2} = \frac{4,074 - 3,386}{0,13 * 1,35} = 3,92"$$

A espessura mínima recomendada para a camada de base para o número N especificado é de 6", portanto o valor encontrado não atende a espessura mínima. Deve-se recalcular o valor de SN2, adotando o a espessura mínima da camada - 6"

$$SN_2 = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 =$$

$$SN_2 = 0,46 * 7,36 + 0,13 * 6 * 1,35 = 4,439$$

Assim o valor de SN2 que era de 4,074, passa para 4,439 e espessura de 6"

Espessura da Sub-base

$$D_3 = \frac{SN_3 - SN_2}{a_3 * m_3} = \frac{6,278 - 4,439}{0,11 * 1,35} = 13,4"$$

Na Tabela 58 é apresentado o resultado do dimensionamento da estrutura do pavimento flexível pelo método da AASHTO

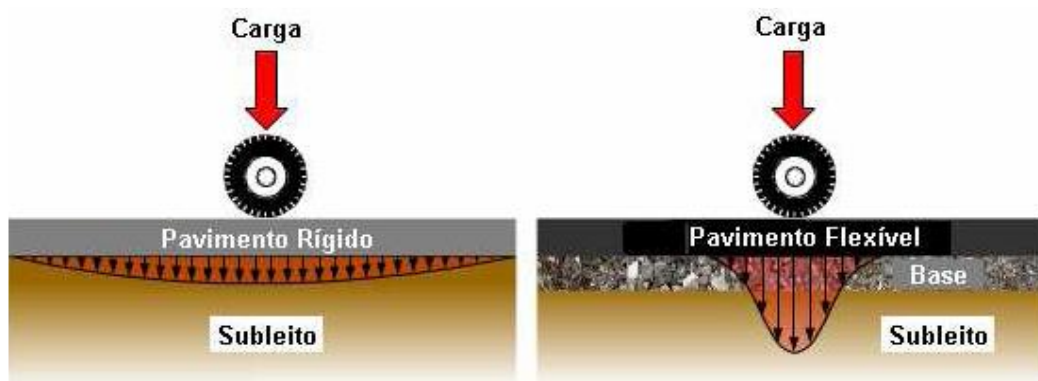
Tabela 58 - Estrutura do pavimento conforme dimensionamento da AASHTO

Camada	SN	Espessura (")
Revestimento	3,386	7,4
Base	4,439	6
Sub-base	6,278	13,4
Total		23,8

8.1 – Introdução

Pavimento de concreto é a denominação atribuída aos pavimentos que possuem sua camada de rolamento de concreto de cimento Portland, esse tipo de pavimento também é conhecido como pavimento rígido. O DNIT (1994) define esse tipo de pavimento como: “*Pavimento cujo revestimento é constituído de concreto de cimento*”. Estão apresentadas na **Figura 83** as características estruturais, a forma como as tensões atuam e os respectivos deslocamentos nos pavimentos de concreto e flexível.

Figura 83 - Distribuição de cargas nos pavimentos rígido e flexível.



Enquanto uma dada carga atuante sobre um pavimento flexível impõe nessa estrutura um campo de tensões muito concentrado, nas proximidades do ponto de aplicação dessa carga, em um pavimento de concreto, verifica-se um campo de tensões bem mais disperso, com os efeitos da carga distribuídos de maneira semelhante em toda a dimensão da placa, (Figura 69). Yoder & Witczak (1975) não fazem uso das terminologias de pavimento de concreto e/ou pavimento flexível, mas da forma como as tensões são distribuídas no solo da fundação (subleito). Neste texto será adotado o termo pavimento de concreto.

Diversos são os tipos de pavimentos de concreto, simples, simples com barra de transferência, com estrutura armada etc. Estão apresentados nas Figura 84, Figura 85, Figura 86, Figura 87 e Figura 88 os tipos mais comuns de pavimentos de concreto.

Figura 84 - Pavimento de concreto simples

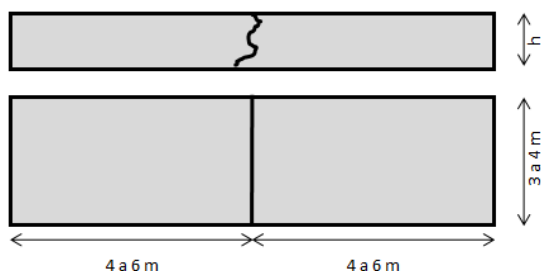


Figura 85 - Pavimento de concreto simples com barra de transferência

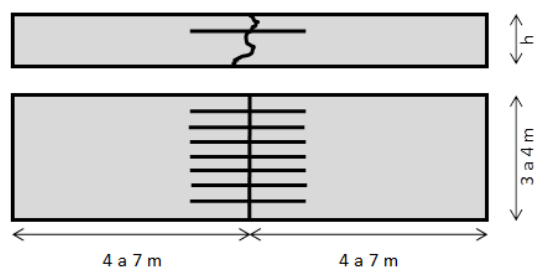


Figura 86 - Pavimento de concreto com armadura descontínua sem função estrutural

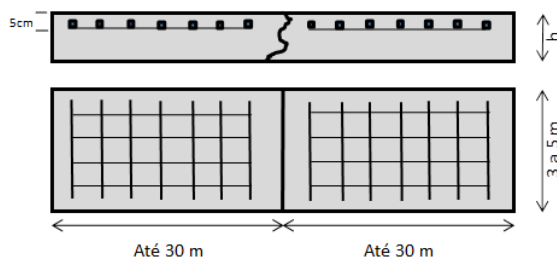


Figura 87 - Pavimento de concreto com armadura contínua sem função estrutural

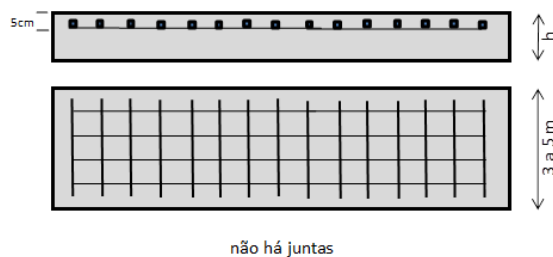
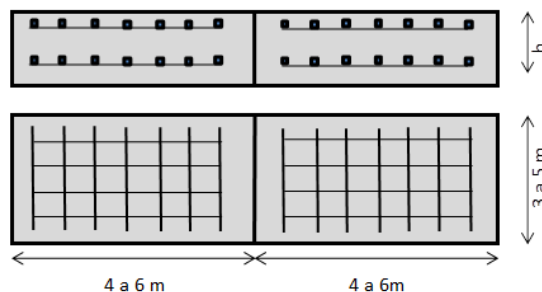


Figura 88 - Pavimento de concreto armado



Esses tipos de pavimentos podem ser aplicados em vias de tráfego intenso, em áreas sujeitas ao derramamento de combustíveis, áreas de tráfego pesados localizados como: portos, terminais de cargas e pátios de manobras, pisos industriais, aeroportos e em pontes, túneis e viadutos.

8.2 – Regra de dano linear cumulativo – Palmgren-Miner

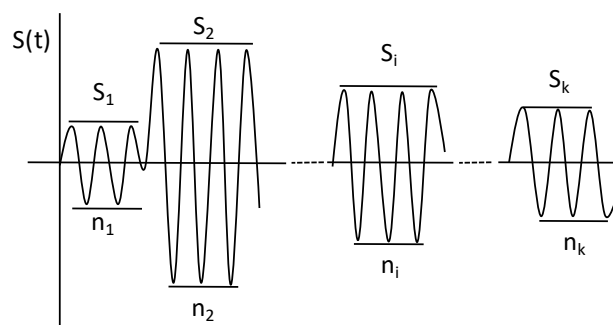
Estruturas submetidas a carregamentos cíclicos estão sujeitas, comumente, a ruptura por fadiga. O equacionamento da vida de fadiga nessas condições trata-se de procedimento bastante complexo. Palmgren aplicou a regra de dano linear em rolamentos de esfera de uma indústria Sueca, Miner utilizou a mesma regra para a determinação da vida de fadiga em fuselagem de aeronaves. Da

associação dos resultados que esses dois pesquisados obtiveram, passou a ser comumente conhecida como a regra de dano linear de Palmgren-Miner, conforme Lee, et all, (2005) e MORAWSKI (2013).

O procedimento foi o determinar o número de ciclos a que uma dada estrutura suporta antes de apresentar a falha. Utiliza-se uma curva denominada de S-N, em que: S a tensão aplicada e N o número de carregamento aplicado.

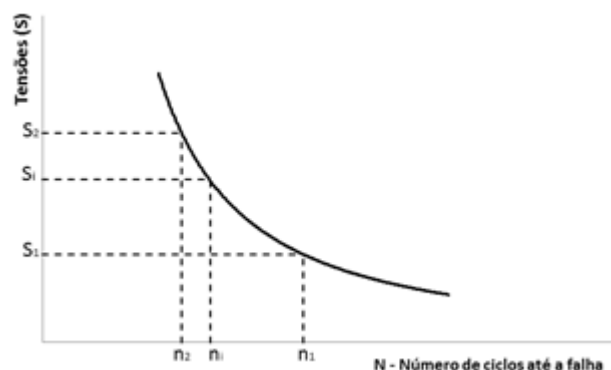
O processo de tensões pode ser descrito como ciclos de tensões e, portanto, um espectro de amplitudes pode ser definido conforme apresentado na Figura 89. Observe-se que em um histórico de carregamento pode-se ter vários níveis de tensões (S_k) conjugados com diferentes números de ciclos (n_k).

Figura 89 - Espectro de amplitude de ciclos de tensões



Utilizando os dados na curva S-N (Figura 90), o número de ciclos respectivo de S_i é N_i , ocasionaria a falha se não houvesse outros níveis de tensões presentes. O carregamento sujeito ao nível de tensão S_1 correspondente ao ciclo n_1 ocasionaria a falha da estrutura, entretanto, se n_1 for menor que N_1 , esse recebe uma fração menor de dano, o qual pode ser representado por D_1 , denominado de fração de dano. Vários carregamentos de diferentes (ou não) níveis de tensões, associados também a distintos (ou não) número de ciclos, resultam em frações de dano D_i .

Figura 90- Curva S-N



Isso resulta que a regra de dano linear de Palmgren-Miner é uma regra de dano linear cumulativo (D_i). O dano D_i de um nível de tensão S_i é linearmente proporcional a razão entre o número de ciclos em serviço n_i e o número de ciclos que levaria o material a falha, naquele nível de tensão N_i , equação 44

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (44)$$

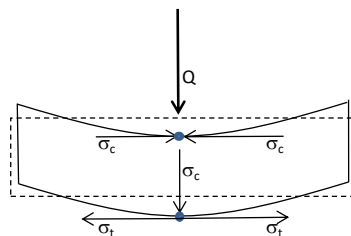
O dano total (D) a que o material estaria sujeito, seria a somatória de todas as frações de dano correspondente a k níveis de tensão, equação 45. Sendo que a falha ocorre quando $D \geq 1$.

$$D = \sum_{i=1}^k \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (45)$$

Limitações da regra de dano linear cumulativo de Palmgren-Miner:

- Linearidade - Considera-se que todos os ciclos de determinada magnitude causam o mesmo dano, independente do momento em que são aplicados.
- Não interativo - Admite-se que a presença de uma tensão (S_2) não interfere do dano causado por outra tensão (S_1) e
- Tensões independentes - Aceita-se que a regra que governa o dano causado por S_1 é a mesma que governa o dano causado por S_2
- A ação da carga dos veículos caracteriza-se por cargas repetidas e itinerantes, ou seja, cargas cíclicas e que pode não ocorrer no mesmo local, embora, os pavimentos possuam tráfego canalizado. A ação do carregamento propicia na fibra inferior da camada do pavimento: tensões horizontais de tração (+) e verticais de compressão (-) (Figura 91). Analogamente, na fibra superior ocorrem tensões horizontal e vertical de compressão (-). O trincamento da camada do pavimento está intimamente ligado ao gradiente dessas tensões ortogonais de tração e ao número de repetições de solicitação.

Figura 91 - Placa com carregamento pontual - tensões horizontais de tração (-) e compressão (+)



Exercício resolvido5

Dado uma determinada curva S-N de um dado material, conforme apresentada na Figura 92. Três níveis de diferenças de tensões aplicadas: 0,08, 0,06 e 0,04 Mpa, e os seguintes números de solicitações: 1.730.000, 3.502.220 e 11.658.000, respectivamente. Deseja-se saber o dano cumulativo que o material sofreu com os três níveis diferenças de tensões e para uma diferença de tensão de $\Delta S = 0,037$ Mpa qual o número de solicitações permitidas para que ocorra a falha do material? - Resolução Figura 92.

Figura 92 - Curva S-N definida por três níveis de tensões

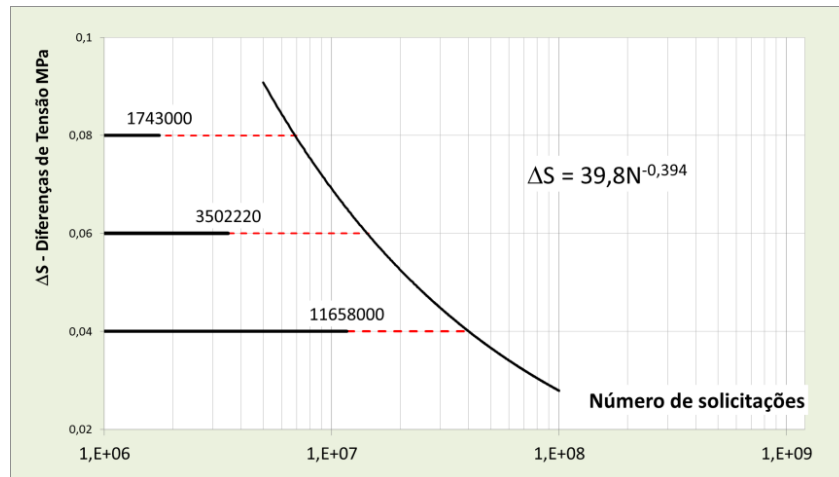


Figura 93 - Resolução

Tensões ΔS (Mpa)	N		Dano cumulativo (%)	Vida remanescente
	Falha	Solicitado		
0,08	6992822	1743000	24,9	
0,06	14512956	3502220	24,1	
0,04	40615146	11658000	28,7	
		D	77,8	
0,037	49501996	11008841		22,2

5 A apresentação dessa forma de exercício, consiste em maneira didática de fixação dos conceitos de dano cumulativo de Palmgren-Miner.

Exercício 1

$$\Delta S = 27,8N^{-0,46}$$

Tensões ΔS (Mpa)	N		Dano cumulativo (%)	Vida remanescente
	Falha	Solicitado		
0,64				
0,31				
0,19				
		D		
0,16				

Exercício 2

$$\Delta S = 9,8N^{-0,212}$$

Tensões ΔS (Mpa)	N		Dano cumulativo (%)	Vida remanescente (%)
	Falha	Solicitado		
0,71				
0,62				
0,57				
0,27				
		D		
0,21				

8.3- Métodos

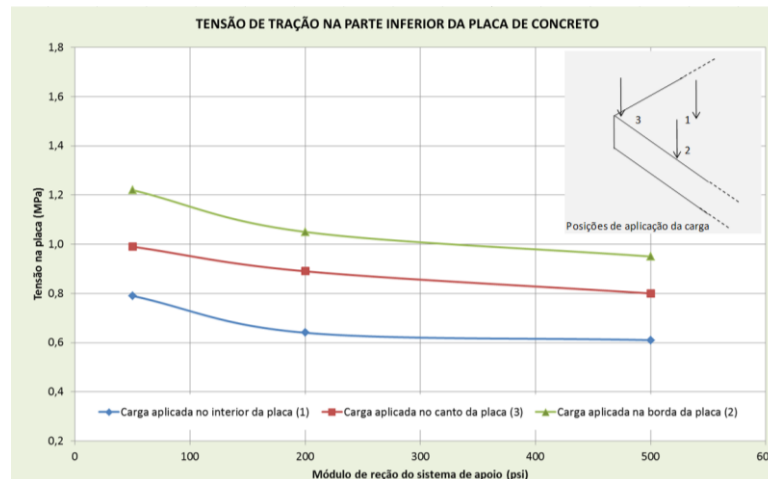
Dentre os métodos de dimensionamentos de pavimentos de concreto temos os mais difundidos: Portland Cement Association - PCA de 1966 e 1984 e o método da American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO (1993).

Considera-se na concepção desses métodos as equações de Westergaard, que determina a tensão (σ) de tração na parte inferior da placa de concreto, (equação 46) e pelas equações analíticas (

Figura 94) que traz os módulos de reação (k) (abordado adiante) em função das tensões geradas pelas cargas aplicadas no interior, na borda e no canto da placa de concreto.

$$\sigma = \frac{12P(1-\mu^2)}{\pi h^2} \int_0^\infty \frac{\alpha^2 \gamma \cos \frac{\alpha x}{\tau} \left[\cos \frac{\beta y}{\tau} + (1-\mu)\alpha^2 \sin \frac{\beta y}{\tau} \right] e^{-\frac{\gamma \tau}{\tau}}}{1 + 4(1-\mu)\alpha^2 \gamma^2 - (1-\mu)^2 \alpha^4} d\alpha \quad (46)$$

Figura 94 - Equações analíticas de Westergaard



Inclui-se também na formulação os ábacos de Pickett e Ray (1950) que baseado na superposição de efeitos e nos estudos de Westergaard (equação 1), obtém-se, para vários tipos de eixos rodoviários a tensão de tração na placa (σ_t) partindo da carga por eixo e com o coeficiente de recalque (k).

Os métodos têm como dados de entrada as características da fundação da via, expresso pelo valor do CBR do material subjacente, dados do tráfego obtido através de contagem e classificação e as propriedades do concreto expresso em resistência.

8.3.1 – Método da PCA (1966)

Esse método se fundamenta nas teorias de Westergaard e nos ábacos de Pickett e Ray e no estudo de fadiga do concreto. Não considera a transferência de carga entre as placas, apresenta como posição crítica a borda transversal, adota o consumo por fadiga segundo a regra de danop liner cumulativo de Palmgren-Miner ($CRF_T = \sum CRF_{cada\ eixo}$) e considera também o aumento do módulo de reação do sistema para base cimentada.

8.3.2 – Método da PCA (1984)

Como no método da PCA (1966) o método (1984) também está fundamentado na teoria de Westergaard (1925) e nos ábacos de Pickett e Ray, diferencia-se no emprego da teoria do líquido denso⁶ em que o deslocamento é diretamente proporcional à pressão exercida - expresso pelo coeficiente de recalque (k) também denominado de módulo de reação ou módulo de Westergaard, equação 47.

$$p = k * w \qquad k = \frac{P}{w} \qquad (47)$$

onde p = pressão exercida (MPa)
w = deslocamento (m)
k coeficiente de recalque (MPa/m)

Diferencia-se também na inclusão de barras de transferência de cargas entre as placas, a posição crítica passou da borda transversal para a borda longitudinal. Incluem-se ainda em sua concepção, ensaios laboratoriais, dados de pistas experimentais e a avaliação de pavimentos em serviço.

Dessas teorias determinam-se as espessuras das placas de concreto em função da resistência à flexão do concreto. O método foi concebido por G Picket e Ray em que o dimensionamento é feito com base no consumo de resistência à fadiga (CRF), quando essa placa é submetida a ação repetida de carga de tráfego durante o período adotado de projeto.

O consumo dessa resistência à fadiga é associado a relação: tensão de tração/módulo de ruptura do concreto que a placa de concreto será submetida quando em vida de serviço. Quando a relação tensão de tração/módulo aumenta, diminui o número de solicitações que pode gerar falha à placa de concreto, em contrapartida, quando essa relação decresce, o número de solicitações para que ocorra a falha aumenta. Conclui-se que a passagem de uma única carga, suficiente para gerar tensões de tração à uma dada placa de concreto não ocasionará dano, entretanto, com a passagem sucessivas cargas (na ordem de milhões) ocasionara a falha por fadiga da placa. Observe-se que, o parâmetro tensão de tração é obtido através dos ábacos concebidos por G Picket e Ray que teve como base a equação de Westergaard. Pode-se deduzir que esse parâmetro foi concebido considerando carga dinâmica, uma vez que se trata de cargas de veículos em movimento, já o módulo de ruptura é um parâmetro determinado em laboratório através de um ensaio estático⁷. Devido a essa diferenciação entre a forma de atuação da carga aplica-se um fator de segurança de carga (FSC)⁸

⁶ Meio isotrópico, homogêneo e elástico – clássico modelo de Boussinesq.

⁷ A solicitação da estrutura do pavimento (camada de concreto) ocasionada pela passagem dos veículos pode-se considerar como sendo uma solicitação dinâmica, entretanto, a tensão de tração à flexão em barras prismáticas de prismas de concreto, denominado de módulo de ruptura, é obtida através de uma carga estática. Estudos têm questionado a correlação entre: o coeficiente de impacto de cargas estáticas e a ação de cargas dinâmica. Desses questionamentos verificou-se que o efeito da carga dinâmica pode ser considerado o mesmo ou levemente inferior ao efeito causado pela carga estática. Salienta-se que ainda pairam dúvidas acerca da correlação entre esses tipos de solicitação. Uma forma de contornar a

Com estudos de pistas experimentais e em pavimento em serviços foi possível determinar as magnitudes das cargas que acaba por provocar os maiores danos. Assim, a contagem do tráfego e, por conseguinte, sua classificação torna-se indispensável para o dimensionamento desse tipo de pavimento.

Tabela 59 - Relação de tensões ao número admissível de repetições de carga

Relação de tensões (*)	N. admissível de repetições de carga	Relação de tensões (*)	N. admissível de repetições de carga
0,5	Ilimitado	0,68	3500
0,51	400.000	0,69	2500
0,52	300.000	0,7	2000
0,53	240.000	0,71	1500
0,54	180.000	0,72	1100
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
0,6	32.000	0,78	210
0,61	24.000	0,79	160
0,62	18.000	0,8	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 a tensão de tração na flexão devida à carga dividida pela resistência característica à tração na flexão do concreto

Apresentam-se na Tabela 59 a relação entre tensão de tração à flexão e o módulo de ruptura. Observe-se que para valores de relação inferior a 0,5 o número admissível de repetição de carga é ilimitado. Isso implica que a magnitude da carga que proporcionou essa relação não desenvolve tensão de tração significativa a ponto de ser considerada. O mesmo pôde ser observado na composição do tráfego para o dimensionamento para pavimentos flexíveis, a carga exercida pelos automóveis não desenvolve tensões apreciáveis no pavimento e assim são desconsideradas.

favor da segurança é a de aplicar um fator de segurança de carga (FSC). A adoção desse fator foi baseada em pistas experimentais de BATES (1924), MARYLAND (1952) e AASHTO (1962) além de milhares de quilômetros de estradas em serviço.

- ⁷ Adotar
- FSC = 1,0 para tráfego leve – estradas rurais, ruas residenciais.
 - FSC = 1,1 para tráfego médio – rodovias e vias urbanas com tráfego de caminhões pesados
 - FSC = 1,2 para tráfego pesado – rodovias
 - FSC = 1,3 tráfego especial

Logo, somente o valor relação superior a 0,5 é considerado no dimensionamento. A título de exemplificação a relação de 0,53, por exemplo, indica 240.000 repetições de carga e para 0,79 esse número cai para 160 solicitações. Em outras palavras, para uma relação de 0,53 após 240.000 solicitações na placa de concreto ocorrerá a falha por fadiga.

8.3.2.1 - Procedimento

O procedimento de dimensionamento consiste em verificar se a espessura inicialmente adotada é compatível, face ao consumo de resistência à fadiga provocada pela ação do tráfego. Na mesma sequência de outros métodos, procede-se para o método da PCA: subleito, tráfego e espessuras em função da qualidade do concreto, definida pelo módulo de ruptura.

As placas de concreto têm a função de base e de revestimento simultaneamente, assim, a camada subjacente onde essas placas de concreto estão assentes é denominada de sub-base e abaixo dessa está o subleito. Sempre que nos referirmos à camada subjacente à placa de concreto estaremos nos referindo ao conjunto da sub-base e subleito.

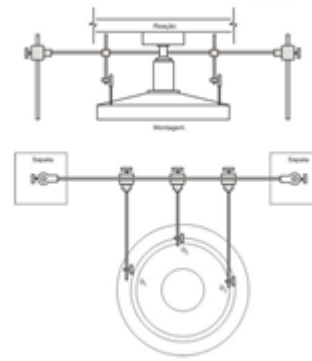
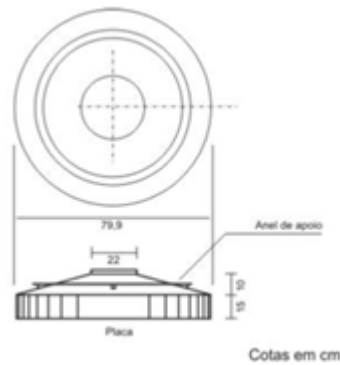
Como mencionado anteriormente, as teorias que dão base ao método de dimensionamento da PCA levam em consideração a tensão de tração das placas que, por sua vez, depende do coeficiente de recalque (k) das camadas subjacentes (sub-base e subleito). No método é considerada a determinação desses coeficientes de recalque, no topo da camada onde a placa é assente e também no topo do subleito. A determinação do coeficiente de recalque (k) é através de ensaio de prova de carga em situ, o procedimento está preconizado norma do DNIT 055/2004 ME - *Pavimento rígido - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projetos e avaliação de pavimentos - Método de ensaio*.

Suscintamente o procedimento e equipamentos para a determinação do coeficiente de recalque (k) consiste em:

- Sistema de reação com carga mínima de 78 kN a 98 kN (normalmente se utiliza o eixo traseiro uma carreta ou caminhão carregado), a distância entre os apoios deve ser maior de 2,4 m;
- Macaco hidráulico com capacidade entre 98 kN e 196 kN, com sensibilidade de carga de 0,01 MPa (0,1 kgf/cm²);
- Placa de reação com diâmetro de 76 cm (5.000 cm²) (Figura 95)

Figura 95 - Representação esquemática da placa de reação

Figura 96 - Sistema de fixação dos extensômetros sobre a placa de reação



- Três extensômetros de 10 mm de curso (sens. 0,01 mm)
- Dispositivo de sustentação munida de duas hastes verticais, viga transversal de no mínimo 5,5 m e, duas hastes de fixação com possibilidades de movimentos verticais e horizontais (Figura 96)

Coloca-se a placa de reação sobre uma fina camada de areia, que regularizou a camada a ser ensaiada. Posiciona-se o sistema de reação (caminhão), o macaco hidráulico deve ser instalado sobre a placa de reação e seu topo sob a viga transversal de reação conforme Figura 97, em seguida, as hastes que irão sustentar os extensômetros (Figura 98). Aplicar um carregamento inicial de forma a se obter um deslocamento de 0,25 mm a 0,50 mm, em seguida, remover o carregamento. Esperar a estabilização das leituras nos extensômetros, ajustar a placa.

Figura 97 - Sistema de reação (caminhão)



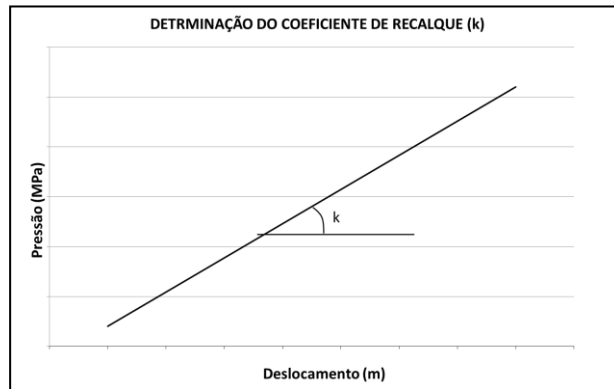
Figura 98 - Hastes de sustentação



http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Pavim_Concreto_Apres_Mod02%20ABCP.pdf

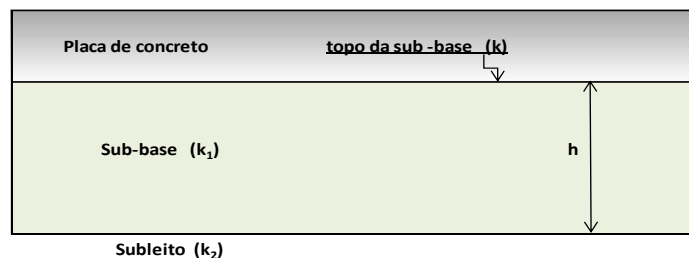
Iniciar o carregamento moderadamente aplicando a cargas de 0,015 MPa a 0,020 MPa (0,15 kgf/cm² a 0,20 kgf/cm²) e após a estabilização dos extensômetros registrar as leituras. Prosseguir com carregamentos sucessivos de carga de 0,015 MPa a 0,018 MPa (0,15 kgf/cm² a 0,18 kgf/cm²) com número de leituras suficiente para obter uma curva - pressão/deslocamento (6 pontos). No descarregamento da carga efetuam-se três leituras. Apresenta-se na **Figura 99** o gráfico para determinação do coeficiente de recalque.

Figura 99 - Curva para determinação de k



Na Figura 100 é mostrada esquematicamente a relação entre os coeficientes de recalque da sub-base (k_1) e do subleito (k_2). O ensaio de prova de carga é realizado nas camadas: de subleito e determina-se o respectivo coeficiente de recalque denominado de k_2 , da mesma forma determina-se o k_1 que é o coeficiente de recalque da sub-base. A interação entre esses valores culmina na obtenção do valor de k que é o coeficiente de recalque no topo da sub-base. Observe-se que os deslocamentos ocasionados no topo da sub-base é função da rigidez (deslocamentos) do subleito.

Figura 100 - Esquema da relação entre k_1 e k_2



Trata-se de um procedimento demorado e dispendioso, justifica-se sua determinação quando se tem uma grande extensão de via e através de estudo estatístico se obtém o k médio que será utilizado no dimensionamento. Quando não se tem extensões que justifique esse tipo de ensaio, pode-se utilizar a correlação do k com o CBR. Observe que no ensaio de CBR ocorre a penetração de uma superfície de forma análoga ao que se verifica com a placa no ensaio de prova de carga. Na Tabela 60 estão apresentados os valores k correspondentes ao CBR do subleito e os valores de k correspondentes no topo da sub-base de material granular para espessuras de 10, 15, 20 e 30.

Tabela 60 - Aumento de k devido à presença de sub-base granular de várias espessuras com mesmo valor de CBR

Valor de Suporte do Subleito		k no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de sub-base iguais a			
CBR (%)	K (MPa/m)	10 cm	15 cm	20cm	30 cm
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	4	38	42	49	59
6	38	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69
8	44	48	53	60	72
9	47	52	56	63	76
10	49	54	58	65	79
11	51	56	60	67	81
12	53	58	62	69	84
13	54	59	63	70	85
14	56	61	65	72	87
15	57	62	66	73	88
16	59	64	68	75	91
17	60	65	69	76	92
18	61	66	70	77	93
19	62	67	71	78	94
20	63	68	72	79	96

O aumento da resistência da sub-base expresso pelo CBR condiciona o valor de k no topo da sub-base de forma relativamente pequena. Admitindo-se os mesmos valores de k do subleito (mesmos valores de CBR) e variando-se o valor de CBR da sub-base ocorrem variações do k no topo da sub-base. (Tabela 61). Observe-se que as variações são pequenas, para espessura de sub-base de 10 cm e CBR variando de 20 % a 100%, praticamente os valores de k não mudaram, o mesmo é visto para as demais espessuras, (Tabela 54).

Tabela 61 - Coeficiente k em função de k₂ e k₁ para espessuras de sub-base de 10, 15 e 20 cm

Coeficiente de recalque do subleito (k ₂) (MPa/m) Espessuras (cm)	Coeficiente de recalque no topo da sub-base (k) (MPa/m)		
	10	15	20
CBR da sub-base = 20% - k ₁ = 69 MPa/m			
14	14	17	18
28	28	31	33
55	55	55	55
83	83	83	83
CBR da sub-base = 40% - k ₁ = 116 MPa/m			
14	16	20	22
28	30	33	36
55	55	58	61
83	83	83	83
CBR da sub-base = 60% - k ₁ = 160 MPa/m			
14	16	20	22
28	31	35	38
55	55	61	64
83	83	83	90
CBR da sub-base = 80% - k ₁ = 193 MPa/m			
14	17	21	25
28	31	37	42
55	55	63	66
83	83	91	94
CBR da sub-base = 100% - k ₁ = 222 MPa/m			
14	17	21	26
28	31	38	43
55	55	68	71
83	83	93	96

A mudança do material da sub-base de granular para solo melhorado com cimento (< 5% de cimento) ou ainda solo cimento (> 5% de cimento), acaba por condicionar um aumento significativo no valor de k. (Tabela 62).

Tabela 62 - Coeficiente k para diferentes espessuras e materiais de sub-bases

CBR %	k ₂ (MPa/m) Espessuras (cm)	Coeficiente de recalque no topo da sub-base (k)												
		Sub-base granular				Sub-base de solo melhorado com cimento				Sub-base de solo cimento				
		10	15	20	30	10	12,5	15	20	10	12,5	15	17,5	20
2	21	23	27	32	43	42	51	61	78	65	74	95	11	12
4	33	37	42	48	61	66	77	90	115	95	111	138	155	177
8	50	54	59	65	80	91	104	120	153	122	144	181	200	>228
20	69	73	79	86	101	119	137	155	196	1231	155	194	213	>228

8.3.2.2 - Tráfego

A composição do tráfego para determinação do número N para dimensionamento de pavimentos de concreto, não se difere do procedimento adotado pelo método do DNIT para pavimentos flexíveis. Com base no volume diário médio anual (VDMA) aplica-se uma taxa de crescimento que pode ser linear ou geométrica, o resultado é multiplicado pelo período de projeto. A diferença entre os dois tipos de determinação do número N é que para pavimentos de concreto devem-se particularizar os tipos de eixos quanto a sua carga e número de ocorrência no período de projeto.

Exemplo: Dimensionar a espessura de um pavimento de concreto (duas partes: A - número N e B - espessura da placa de concreto):

(Parte A) - Dado um VDMA = 1964, obtidos em um determinado período. A contagem contemplou somente veículos com carga no eixo traseiro acima de 10 t. Adotar taxa = 4,5%/ano de crescimento. Distribuição da carga por eixo conforme Tabela 28. Determinar o número de eixos solicitantes para cada tipo de carga por eixo para o período de projeto de 20 anos.

Classe	Tipo	Volume	VDMA
2C	Com. 2	87	36
3C	Com. 3	598	245
2S2	Com. 4	90	37
2S3	Com. 5	509	209
3S3	Com. 6	438	180
3D4	Com. 7	213	87
3T6	Com. 9	29	12
		1964	805
Fatores relativos a contagem			
semanal (3dias) =			46,8%
mensal =			8,7%
diário =			71,4%

$V_p = V_i * (1 + (t/100) * P)$	$V_p = 805 * (1 + (4,5/100) * 20) = 1530 \text{ veic./dia}$
$V_i = \text{VDMA}$	
$V_m = (V_i + V_p) / 2$	$V_m = (805 + 1530) / 2 = 1168$
$V_t = 365 * P * V_m$	$V_t = 365 * 20 * 1168 = 8.526.400 \text{ veículos}$

Onde: V_t = volume total

V_m = volume médio

V_i = volume inicial = volume diário médio anual

V_p = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto

(parte B)

Como mencionado anteriormente, no procedimento de dimensionamento de pavimento de concreto, pelo Método da PCA, adota-se uma dada espessura de placa de concreto e , verifica-se o valor de relação tensão de tração/módulo de ruptura do concreto (σ_t/MR) oferece caso $> 0,5$, valor esse em que ocorrerá o consumo por fadiga da placa de concreto pela ação do tráfego, nesse caso, calcula-se a porcentagem do consumo de resistência a fadiga (CRF), se a relação for $< 0,5$ desconsidera-se consumo por fadiga.

Considerar: $h = 20$ cm - (espessura inicial da placa de concreto)

$MR = 45$ kgf/cm² - (módulo de reação)

$k = 40$ kgf/cm²/cm - (coeficiente de recalque)

$FSC = 1,2$ - (fator de segurança de carga)

Para se determinar a tensão de tração (σ_t) a partir da qual começa a influenciar o método de dimensionamento aplica-se relação:

$$\frac{\sigma_t}{MR} \leq \frac{1}{2}$$

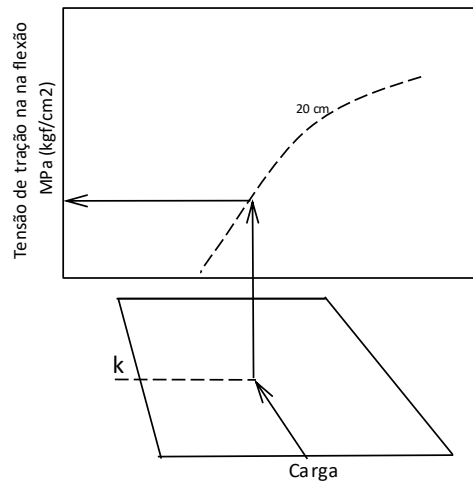
$$\sigma_t \geq \frac{MR}{2}$$

$$\sigma_t \geq \frac{45}{2}$$

$$\sigma_t \geq 22,5 \text{ kgf/cm}^2$$

Em posse da tensão de tração a flexão de 22,5 kgf/cm², determina-se a carga P' através dos ábacos de G Picket e Ray. Na Figura 101 está exemplificado o procedimento para determinação da tensão de tração (σ_t) para eixo simples. A determinação da carga P' deve-se fazer o caminho inverso no ábaco. Com a σ_t e h adotada, determina-se o primeiro ponto que traçando uma vertical por esse ponto (para baixo) até encontrar, na parte inferior do gráfico, o k correspondente, definindo assim o segundo ponto. Desse ponto (através das retas inclinadas) determina-se a carga P' . No caso do exemplo $P' = 12$ tf, e devido ao FSC de 1,2 a carga $P = 10$ t.

Figura 101 - Roteiro para determinação da tensão de tração a flexão



Pode-se concluir que para eixo simples $\leq 10,0$ t não gera tensões de tração (σ_t) na placa que propicie consumo de resistência por fadiga (CRF). Assim, deve-se considerar nos cálculos de CRF somente cargas superiores.

Na Tabela 63 é apresentado o procedimento para obtenção da determinação do número de repetições prevista e em seguida o dimensionamento da placa de concreto com a verificação da espessura adotado com CRF para a espessura de placa de concreto de 20 cm.

Tabela 63- Dimensionamento n. 1 de placa de concreto

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																
Vt = 365*P*Vm		Vm = (Vi + Vp)/2		Vi = VDMA		Vp = Vi* (1+(t/100)*P)		onde: Vt = volume total Vm = volume médio								
Vp = 805*(1 + (4,5/100)*20 = 1530 veic./dia								Vi = volume inicial = volume diário médio anual								
Vm = (805 + 1530)/2 = 1168		Vt = 365 * 20 * 1168 =		8.526.400		veículos		Vp = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto								
Determinação do número de repetições prevista																
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de 30%							
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)	70% dos veículos comerciais com carga máxima legal, 10% com sobrecarga e 20% vazios										
2C	Com. 2	6	10	-	-	16	Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de Vt por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo		
3C	Com. 3	6	-	17	-	23										
2S2	Com. 4	6	10	17	-	33										
2S3	Com. 5	6	10	-	25,5	42										
3S3	Com. 6	6	-	17	25,5	49										
3D4	Com. 7	6	-	17 (x3)	-	57										
3T6	Com. 9	6	-	17 (x4)	-	74	ESRS (6t)	14,3	1222214	2	4889	17111	2444	7,8	6,0	3,0
Σ por tipo de eixo		42	30	51	51	293	ESRD (10t)	10,2	873010	2	3492	12222	1746	13,0	10,0	5,0
Ponderação		14	10	17	17		ETD (17t)	17,4	1484117	3	8905	31166	4452	22,1	17,0	6,0
							ETT (25,5t)	17,4	1484117	3	8905	31166	4452	33,2	25,5	9,0
Dimensionamento																
Número 01		h _{adotado} = 20 cm			MR ₂₈ = 45 kgf/cm ²						FCS = 1,2					
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = A*FSC (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm ²)	Relação c ₁ /MR ₂₈	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstos	% de consumo de resistência à fadiga								
Simples (roda simples)	Vazio	3	3,6	-	-	-	2444	ilimitado								
	Carregado	6	7,2	-	-	-	17111	ilimitado								
	Sobrecarga	7,8	9,36	-	-	-	4889	ilimitado								
Simples (roda dupla)	Vazio	5	6	-	-	-	1746	ilimitado								
	Carregado	10	12	-	-	-	12222	ilimitado								
	Sobrecarga	13	15,6	28,2	0,63	14000	3492	24,9								
Tanden Duplo	Vazio	6	7,2	-	-	-	4452	ilimitado								
	Carregado	17	20,4	24	0,53	240000	31166	13,0								
	Sobrecarga	22,1	26,5	29,5	0,66	6000	8905	148,4								
Tanden Triplo	Vazio	9	10,8	-	-	-	4452	ilimitado								
	Carregado	25,5	30,6	23,6	0,52	300000	31166	10,4								
	Sobrecarga	33,2	40	28,2	0,63	14000	8905	63,6								
											CRF total		260,3			

Observe-se que a carga do eixo simples roda dupla sobrecarregado com 13 t, propiciou um CRF de 24,9%. Já o eixo tanden duplo sobrecarregado com 22,1 t propiciou um CRF de 148,4%. A somatória de todos os CRF individuais resultou em 260,3%. Isso demonstra que a espessura adotada de 20 cm é insuficiente, deve-se aumentar a espessura de forma que a somatória de todos os valores individuais de CRF seja inferior a 100%, sendo ideal, um CRF total acima de 50% e inferior a 100%. Como mencionado anteriormente, para relações tensão de tração / $MR_{28} < 0,5$ não apresenta consumo por fadiga, assim a % de consumo é ilimitado.

Adotando-se uma espessura de 24 cm temos um CRF total de apenas 4,5% Tabela 64. Observe-se que esse consumo, implica em uma placa com espessura relativamente espessa, assim, recomenda-se testar uma placa com espessura menor. A sensibilidade do método é grande, a alteração de apenas 1 cm implica em uma alteração significativa do consumo por fadiga.

Tabela 64 - Dimensionamento n. 2 de placa de concreto

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																
Vt = 365*P*Vm		Vm = (Vi + Vp)/2		Vi = VDMA		Vp = Vi* (1+(t/100)*P)		onde: Vt = volume total Vm = volume médio Vi = volume inicial = volume diário médio anual								
Vp = 805*(1 + (4,5/100)*20 = 1530 veic./dia																
Vm = (805 + 1530)/2 = 1168		Vt = 365 * 20 * 1168 =		8.526.400		veículos		Vp = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto								
Determinação do número de repetições prevista																
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de 30% 70% dos veículos comerciais com carga máxima legal, 10% com sobrecarga e 20% vazios							
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)		Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de Vt por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo		
											20	70	10	Sobrecarga	Carregado	Vazio
2C	Com. 2	6	10	-	-	16										
3C	Com. 3	6	-	17	-	23										
2S2	Com. 4	6	10	17	-	33										
2S3	Com. 5	6	10	-	25,5	42										
3S3	Com. 6	6	-	17	25,5	49	ESRS (6t)	14,3	1222214	2	4889	17111	2444	7,8	6,0	3,0
3D4	Com. 7	6	-	17 (x3)	-	57	ESRD (10t)	10,2	873010	2	3492	12222	1746	13,0	10,0	5,0
3T6	Com. 9	6	-	17 (x4)	-	74	ETD (17t)	17,4	1484117	3	8905	31166	4452	22,1	17,0	6,0
Σ por tipo de eixo		42	30	51	51	293	ETT (25,5t)	17,4	1484117	3	8905	31166	4452	33,2	25,5	9,0
Ponderação		14	10	17	17											
Dimensionamento																
Número 02		h _{total} = 24 cm		MR _{2a} = 45 kgf/cm ²				FCS = 1,2								
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = A*FSC (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm ²)		Relação c ₁ /MR _{2a}	Número de repetições permissíveis		Número de repetições previstas		% de consumo de resistência à fadiga					
Simples (roda simples)	Vazio	3	3,6	-		-	-		2444		ilimitado					
	Carregado	6	7,2	-		-	-		17111		ilimitado					
	Sobrecarga	7,8	9,36	-		-	-		4889		ilimitado					
Simples (roda dupla)	Vazio	5	6	-		-	-		1746		ilimitado					
	Carregado	10	12	-		-	-		12222		ilimitado					
	Sobrecarga	13	15,6	22		0,49	-		3492		ilimitado					
Tanden Duplo	Vazio	6	7,2	-		-	-		4452		ilimitado					
	Carregado	17	20,4	<18		-	-		31166		ilimitado					
	Sobrecarga	22,1	26,5	23		0,51	400000		8905		2,2					
Tanden Triplo	Vazio	9	10,8	-		-	-		4452		ilimitado					
	Carregado	25,5	30,6	18		-	-		31166		ilimitado					
	Sobrecarga	33,2	40	23		0,51	400000		8905		2,2					
												CRF total		4,5		

Dando sequência, testaremos agora o dimensionamento número 3 com a espessura de 23 cm (Tabela 65), o CRF manteve-se na ordem de 18%.

Tabela 65 - Dimensionamento n. 3 de placa de concreto

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																																																					
Vt = 365*P*Vm		Vm = (Vi + Vp)/2		Vi = VDMA		Vp = Vi* (1+(t/100)*P)		onde:		Vt = volume total		Vm = volume médio																																									
Vp = 805*(1 + (4,5/100)*20 = 1530 veic./dia																																																					
Vm = (805 + 1530)/2 = 1168		Vt = 365 * 20 * 1168 =		8.526.400		veículos		Vp = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto																																													
Determinação do número de repetições prevista																																																					
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de 30%																																												
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)				70% dos veículos comerciais com carga máxima legal, 10% com sobrecarga e 20% vazios																																												
2C	Com. 2	6	10	-	-	16	Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de Vt por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo																																							
3C	Com. 3	6	-	17	-	23								ESRS (6t)	20,2	1721677	2	6887	24103	3443	7,8	6,0	3,0																														
252	Com. 4	6	10	17	-	33																		ESRD (10t)	14,4	1229769	2	4919	17217	2460	13,0	10,0	5,0																				
253	Com. 5	6	10	-	25,5	42																												ETD (17t)	40,9	3484346	3	20906	73171	10453	22,1	17,0	6,0										
353	Com. 6	6	-	17	25,5	49																																						ETT (25,9)	24,5	2090608	3	12544	43903	6272	33,2	25,5	9,0
3D4	Com. 7	6	-	17	-	23																																															
3T6	Com. 9	6	-	17	-	23																																															
Σ por tipo de eixo		42	30	85	51	208																																															
Ponderação		20	14	41	25																																																
Dimensionamento																																																					
Número 03		h _{adotado} = 23 cm			MR ₂₈ = 45 kgf/cm ²						FCS = 1,2																																										
Tipo de eixo		Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = A*FSC (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm ²)		Relação c ₁ /MR ₂₈		Número de repetições permissíveis		Número de repetições previstas		% de consumo de resistência à fadiga																																								
Simples (roda simples)		Vazio	3	3,6			-		-		3443		ilimitado																																								
		Carregado	6	7,2			-		-		24103		ilimitado																																								
		Sobrecarga	7,8	9,36			-		-		6887		ilimitado																																								
Simples (roda dupla)		Vazio	5	6			-		-		2460		ilimitado																																								
		Carregado	10	12			-		-		17217		ilimitado																																								
		Sobrecarga	13	15,6	23		0,51		400000		4919		1,2																																								
Tanden Duplo		Vazio	6	7,2			-		-		10453		ilimitado																																								
		Carregado	17	20,4	18,2		0,40		-		73171		ilimitado																																								
		Sobrecarga	22,1	26,5	24,5		0,54		180000		20906		11,6																																								
Tanden Triplo		Vazio	9	10,8			-		-		6272		ilimitado																																								
		Carregado	25,5	30,6	19,5		0,43		-		43903		ilimitado																																								
		Sobrecarga	33,2	40	24		0,53		240000		12544		5,2																																								
												CRF total		18,1																																							

O quarto dimensionamento (Tabela 66), com 21 cm apresentou um consumo de resistência à fadiga de 51%.

Tabela 66 - Dimensionamento n. 4 de placa de concreto

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																	
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$		$V_m = (V_i + V_p)/2$		$V_i = VDMA$		$V_p = V_i \cdot (1+(t/100) \cdot P)$		onde: V_t = volume total V_m = volume médio V_i = volume inicial = volume diário médio anual									
$V_p = 805 \cdot (1 + (4,5/100) \cdot 20) = 1530 \text{ veic./dia}$																	
$V_m = (805 + 1530)/2 = 1168$				$V_t = 365 \cdot 20 \cdot 1168 =$		8.526.400		veículos		V_p = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto							
Determinação do número de repetições prevista																	
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de 30% 70% dos veículos comerciais com carga máxima legal, 10% com sobrecarga e 20% vazios								
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)				Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de V_t por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo	
2C	Com. 2	6	10	-	-	16	ESRS (6t) ESRD (10t) ETD (17t) ETT (25,5t)	14,3 10,2 17,4 17,4								1222214 873010 1484117 1484117	2 2 3 3
3C	Com. 3	6	-	17	-	23											
252	Com. 4	6	10	17	-	33											
253	Com. 5	6	10	-	25,5	41,5											
353	Com. 6	6	-	17	25,5	48,5											
3D4	Com. 7	6	-	17 (x3)	-	57											
3T6	Com. 9	6	-	17 (x4)	-	74											
Σ por tipo de eixo		42	30	51	51	293											
Ponderação		14,3	10,2	17,4	17,4												
Dimensionamento																	
Número 04		$h_{rodado} = 21 \text{ cm}$				$MR_{28} = 45 \text{ kgf/cm}^2$				FCS = 1,2							
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = A*FSC (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm ²)	Relação c_1/MR_{28}	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga									
Simples (roda simples)	Vazio	3	3,6	-	-	-	2444	ilimitado									
	Carregado	6	7,2	-	-	-	17111	ilimitado									
	Sobrecarga	7,8	9,36	-	-	-	4889	ilimitado									
Simples (roda dupla)	Vazio	5	6	-	-	-	1746	ilimitado									
	Carregado	10	12	-	-	-	12222	ilimitado									
	Sobrecarga	13	15,6	24,5	0,54	180000	3492	1,9									
Tanden Duplo	Vazio	6	7,2	-	-	-	4452	ilimitado									
	Carregado	17	20,4	20,3	0,45	-	31166	ilimitado									
	Sobrecarga	22,1	26,5	27	0,60	32000	8905	27,8									
Tanden Triplo	Vazio	9	10,8	-	-	-	4452	ilimitado									
	Carregado	25,5	30,6	21,5	-	-	31166	ilimitado									
	Sobrecarga	33,2	40	26,4	0,59	42000	8905	21,2									
CRF total												51,0					

Registra-se que para uma espessura de 20 cm o consumo foi de 260% e ao aumentar apenas 1 cm o consumo ficou satisfatório, menor que 100%. Isso demonstra a sensibilidade do método.

Apresentam-se nas Figura 102, Figura 103 e

Figura 104 os ábacos para a determinação de tração (σ_t) para os eixos: simples roda simples e roda dupla, tandem duplo e triplo respectivamente.

Figura 102 - Ábaco de Picket e Ray - Determinação da tensão de tração (σ_t) - eixo simples

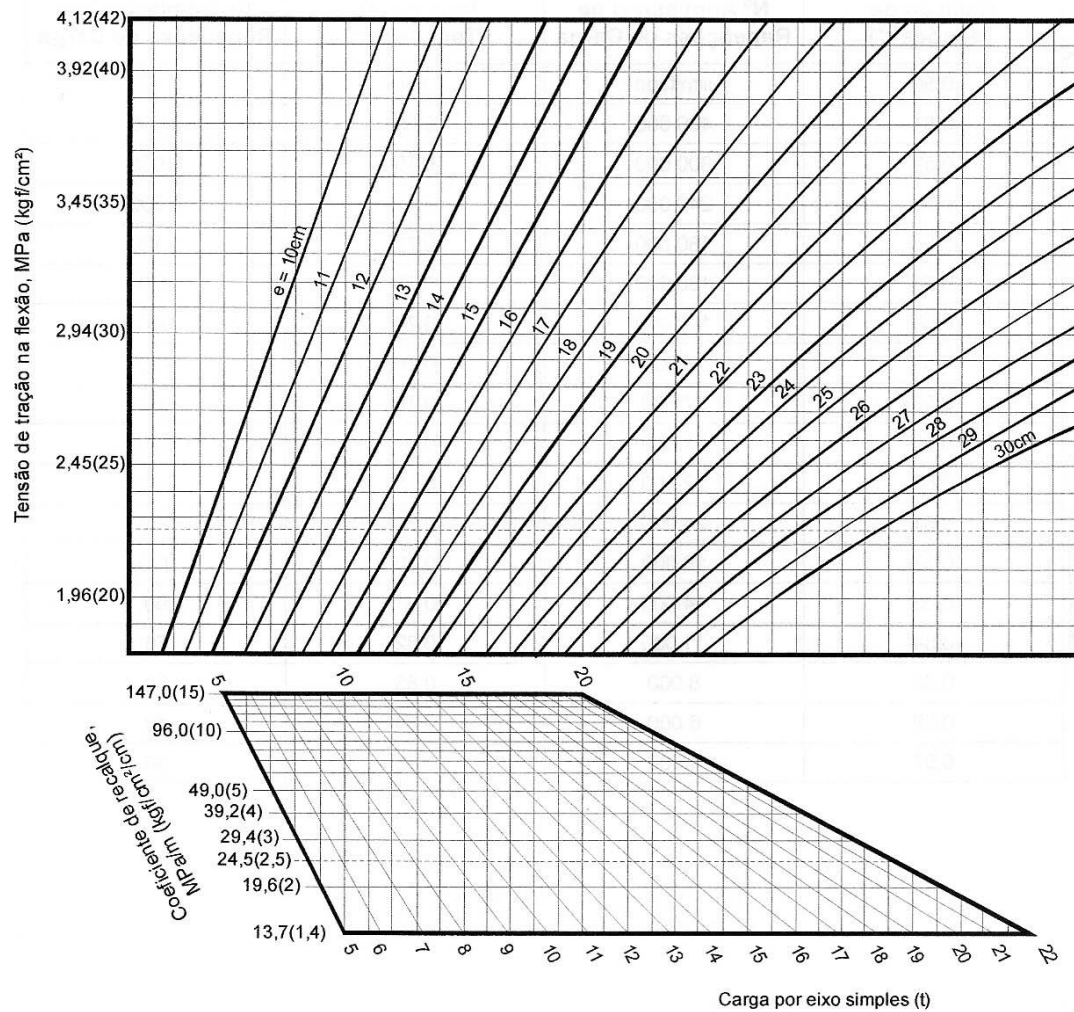


Figura 103 - Ábaco de Picket e Ray - Determinação da tensão de tração (σ_t) - eixo tandem duplo

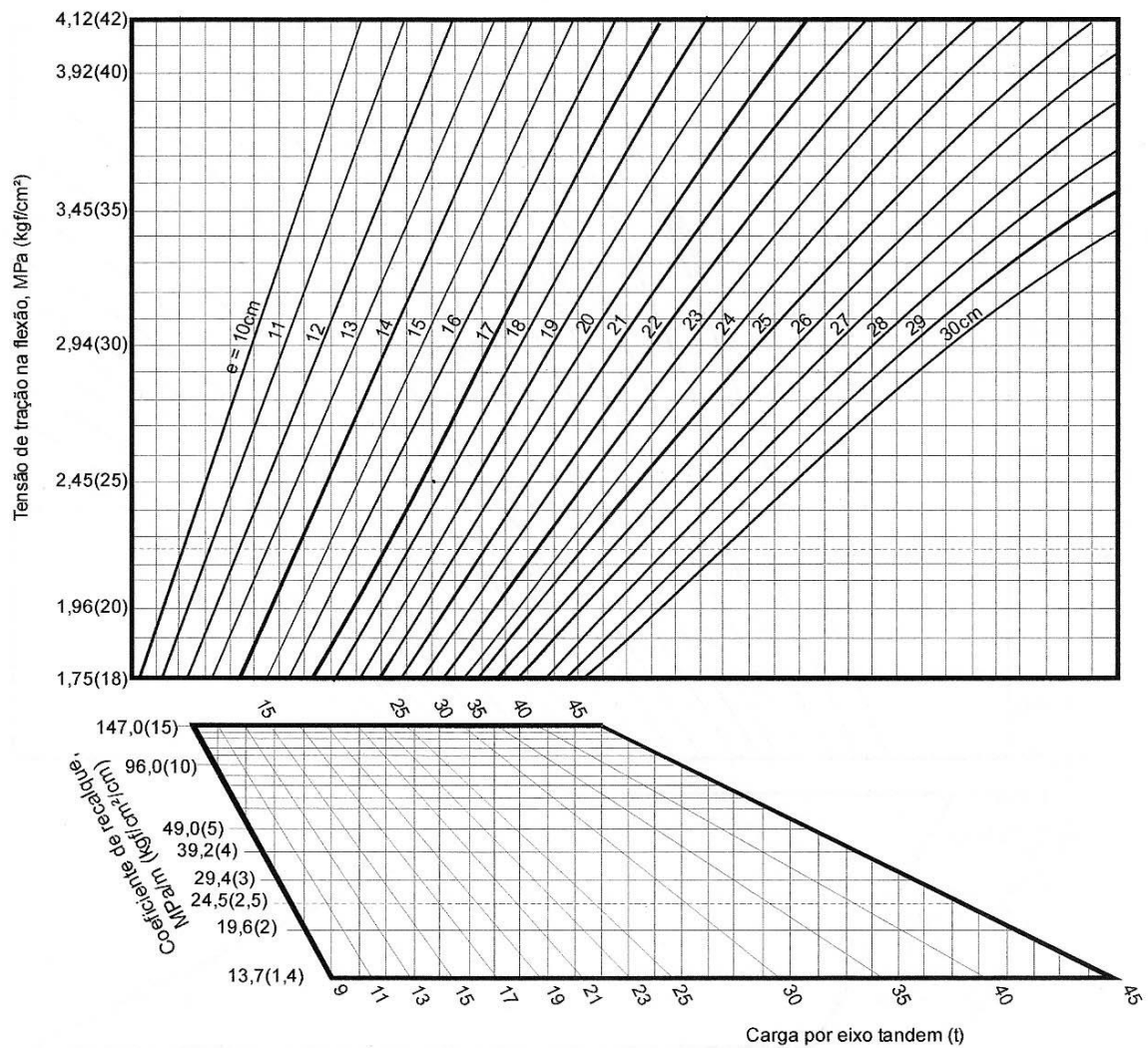
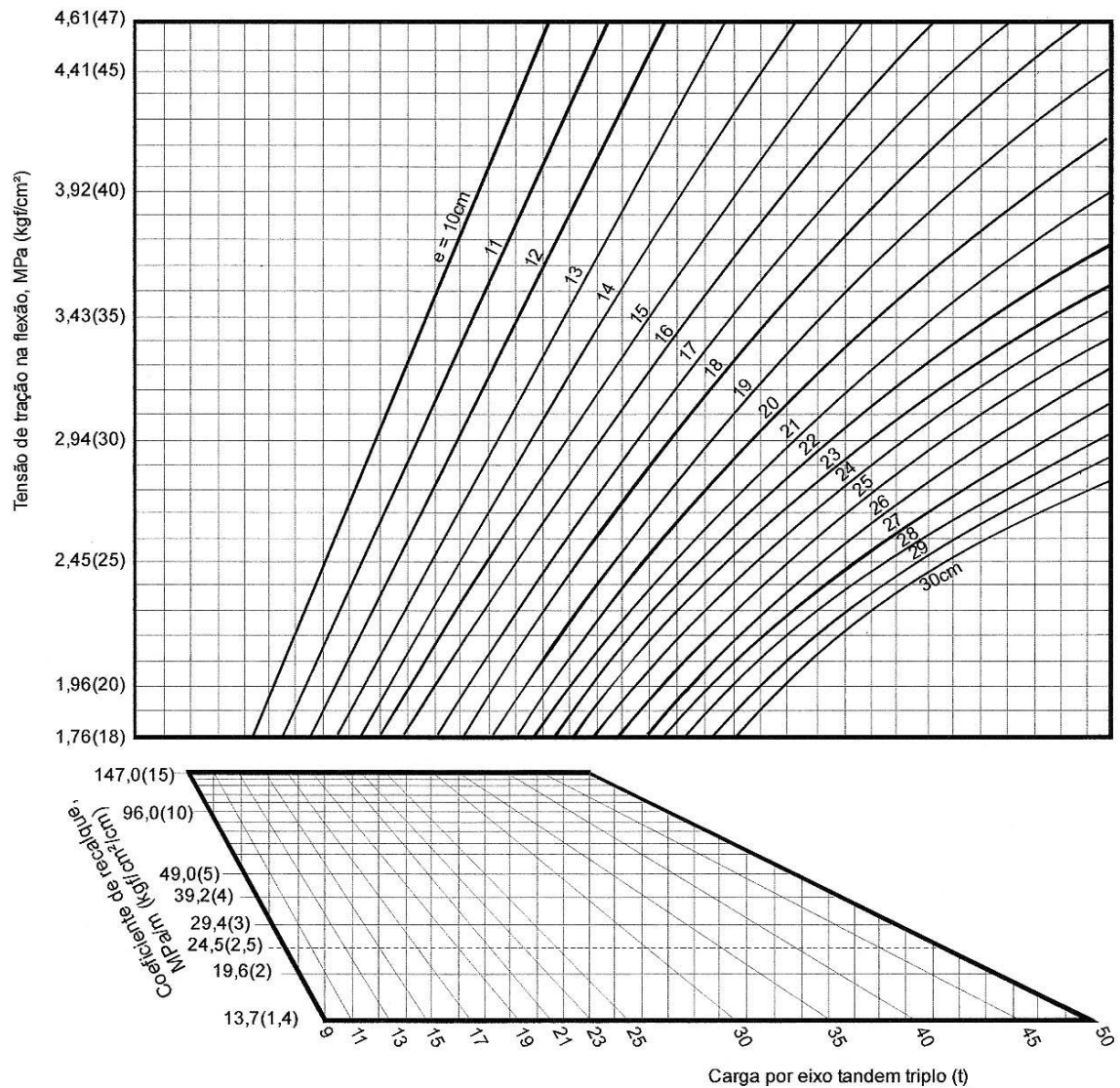


Figura 104 - Ábaco de Picket e Ray - Determinação da tensão de tração (σ_t) - eixo tandem triplo



Exercício 1			
Classe	Tipo	Volume	VDM
2C	Com. 2	95	
3C	Com. 3	601	
2S2	Com. 4	121	
2S3	Com. 5	407	
3S3	Com. 6	400	
3D4	Com. 7	298	
3T6	Com. 9	31	

Fatores relativos a contagem

semanal (3dias) =	41,8%
mensal =	9,5%
diário =	75,0%

Sobrecarga = 25%

75% dos veículos comerciais com carga máxima legal

10% com sobrecarga

15% vazios

Taxa de crescimento = 4,78%/ano

Espessura inicial = 19 cm

Coefficiente de reação (k) = 4 kgf/cm²/cm

Módulo de ruptura (MR) = 45 kgf/cm²

FSC = 1,1

Exercício 2			
Classe	Tipo	Volume	VDM
3C	Com. 3	289	
2S2	Com. 4	150	
3C2	Com. 5	300	
3S3	Com. 6	815	
3D4	Com. 7	27	
3T6	Com. 9	65	

Fatores relativos a contagem

semanal (3dias) =	49,8%
mensal =	10,4%
diário =	69,8%

Sobrecarga = 20%

70% dos veículos comerciais com carga máxima legal

20% com sobrecarga

10% vazios

Taxa de crescimento = 5,24%/ano

Espessura inicial = 20 cm

Coefficiente de reação (k) = 4 kgf/cm²/cm

Módulo de ruptura (MR) = 40 kgf/cm²

FSC = 1,2

Exercício 3			
Classe	Tipo	Volume	VDM
2C	Com. 2	139	
3C	Com. 3	879	
2S2	Com. 4	177	
2J3	Com. 5	595	
3J3	Com. 6	585	
3D4	Com. 7	436	
3T6	Com. 9	45	

Fatores relativos a contagem

semanal (3dias) =	40,0%
mensal =	8,7%
diário =	81,3%

Sobrecarga = 28%

80% dos veículos comerciais com carga máxima legal

15% com sobrecarga

5% vazios

Taxa de crescimento = 4,08%/ano

Espessura inicial = 21 cm

Coefficiente de reação (k) = 5 kgf/cm²/cm

Módulo de ruptura (MR) = 42,5 kgf/cm²

FSC = 1,3

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$		$V_m = (V_i + V_p)/2$		$V_i = \text{VDMA}$		$V_p = V_i \cdot (1 + (t/100) \cdot P)$		onde: V_t = volume total V_m = volume médio V_i = volume inicial = volume diário médio anual								
$V_p =$																
$V_m =$		$V_t =$		=				veículos		V_p = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto						
Determinação do número de repetições prevista																
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de % dos veículos comerciais com carga máxima legal, % com sobrecarga e % vazios							
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)		Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de V_t por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo		
														Sobrecarga	Carregado	Vazio
							ESRS (6t)								6,0	3,0
							ESRD (10t)								10,0	5,0
							ETD (17t)								17,0	6,0
							ETT (25,5t)								25,5	9,0
Ponderação																
Dimensionamento																
Número _____		$h_{adotado} =$ _____ cm		$MR_{28} =$ _____ kgf/cm^2						FCS =						
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm^2)	Relação σ_1/MR_{28}	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga								
Simples (roda simples)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Simples (roda dupla)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Duplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Triplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
								CRF total								

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto

$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$	$V_m = (V_i + V_p)/2$	$V_i = \text{VDMA}$	$V_p = V_i \cdot (1 + (t/100) \cdot P)$	onde:	$V_t = \text{volume total}$	$V_m = \text{volume médio}$
$V_p =$					$V_i = \text{volume inicial} = \text{volume diário médio anual}$	
$V_m =$	$V_t =$	$=$		veículos	$V_p = \text{volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto}$	

Determinação do número de repetições prevista

Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo										
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)		Hipóteses		Sobrecarga de ____% dos veículos comerciais com carga máxima legal, ____% com sobrecarga e ____% vazios							
						Tipo de Eixo			Ponderação (%)	Particularização de Vt por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo	
							Sobrecarga	Carregado							Vazio	
						ESRS (6t)								6,0	3,0	
						ESRD (10t)								10,0	5,0	
						ETD (17t)								17,0	6,0	
						ETT (25,5t)								25,5	9,0	
Ponderação																

Dimensionamento

Número _____		h _{adotado} = _____ cm		MR ₂₈ = _____ kgf/cm ²		FCS =		
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = A*FSC (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm ²)	Relação σ_t /MR ₂₈	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga
Simples (roda simples)	Vazio							
	Carregado							
	Sobrecarga							
Simples (roda dupla)	Vazio							
	Carregado							
	Sobrecarga							
Tanden Duplo	Vazio							
	Carregado							
	Sobrecarga							
Tanden Triplo	Vazio							
	Carregado							
	Sobrecarga							
							CRF total	

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$		$V_m = (V_i + V_p)/2$		$V_i = \text{VDMA}$		$V_p = V_i \cdot (1 + (t/100) \cdot P)$		onde: V_t = volume total V_m = volume médio V_i = volume inicial = volume diário médio anual								
$V_p =$																
$V_m =$		$V_t =$		$=$				veículos		V_p = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto						
Determinação do número de repetições prevista																
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de _____ % dos veículos comerciais com carga máxima legal, _____ % com sobrecarga e _____ % vazios							
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)		Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de V_t por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo		
														Sobrecarga	Carregado	Vazio
							ESRS (6t)								6,0	3,0
							ESRD (10t)								10,0	5,0
							ETD (17t)								17,0	6,0
							ETT (25,5t)								25,5	9,0
Ponderação																
Dimensionamento																
Número _____		$h_{adotado} =$ _____ cm		$MR_{28} =$ _____ kgf/cm^2						FCS =						
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm^2)	Relação σ_t/MR_{28}	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga								
Simples (roda simples)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Simples (roda dupla)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Duplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Triplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
								CRF total								

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$		$V_m = (V_i + V_p)/2$		$V_i = \text{VDMA}$		$V_p = V_i \cdot (1 + (t/100) \cdot P)$		onde: V_t = volume total V_m = volume médio V_i = volume inicial = volume diário médio anual								
$V_p =$																
$V_m =$		$V_t =$		$=$				veículos		V_p = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto						
Determinação do número de repetições prevista																
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de _____ % dos veículos comerciais com carga máxima legal, _____ % com sobrecarga e _____ % vazios							
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)		Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de V_t por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo		
														Sobrecarga	Carregado	Vazio
							ESRS (6t)								6,0	3,0
							ESRD (10t)								10,0	5,0
							ETD (17t)								17,0	6,0
							ETT (25,5t)								25,5	9,0
Ponderação																
Dimensionamento																
Número _____		$h_{adotado} =$ _____ cm				$MR_{28} =$ _____ kgf/cm ²				FCS = _____						
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm ²)	Relação σ_t/MR_{28}	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga								
Simples (roda simples)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Simples (roda dupla)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Duplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Triplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
								CRF total								

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$		$V_m = (V_i + V_p)/2$		$V_i = \text{VDMA}$		$V_p = V_i \cdot (1 + (t/100) \cdot P)$		onde: V_t = volume total V_m = volume médio V_i = volume inicial = volume diário médio anual								
$V_p =$																
$V_m =$		$V_t =$		$=$				veículos		V_p = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto						
Determinação do número de repetições prevista																
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de _____ % dos veículos comerciais com carga máxima legal, _____ % com sobrecarga e _____ % vazios							
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)		Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de V_t por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo		
														Sobrecarga	Carregado	Vazio
							ESRS (6t)								6,0	3,0
							ESRD (10t)								10,0	5,0
							ETD (17t)								17,0	6,0
							ETT (25,5t)								25,5	9,0
Ponderação																
Dimensionamento																
Número _____		$h_{adotado} =$ _____ cm		$MR_{28} =$ _____ kgf/cm^2						FCS =						
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm^2)	Relação σ_t/MR_{28}	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga								
Simples (roda simples)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Simples (roda dupla)	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Duplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
Tanden Triplo	Vazio															
	Carregado															
	Sobrecarga															
								CRF total								

Determinação do volume total de veículos para o período de projeto																	
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$		$V_m = (V_i + V_p)/2$		$V_i = \text{VDMA}$		$V_p = V_i \cdot (1 + (t/100) \cdot P)$		onde: V_t = volume total V_m = volume médio V_i = volume inicial = volume diário médio anual									
$V_p =$ _____																	
$V_m =$ _____		$V_t =$ _____		= _____		veículos		V_p = volume acrescido da taxa de crescimento anual para o período de projeto									
Determinação do número de repetições prevista																	
Classificação		Carga por Eixos (t)				Σ de cargas por tipo de veículo	Hipóteses		Sobrecarga de _____ % dos veículos comerciais com carga máxima legal, _____ % com sobrecarga e _____ % vazios								
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)		Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de V_t por carga	Fator de eixo (%)	Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Cargas por eixo			
							ESRS (6t)									6,0	3,0
							ESRD (10t)									10,0	5,0
							ETD (17t)									17,0	6,0
							ETT (25,5t)									25,5	9,0
Ponderação																	
Dimensionamento																	
Número _____		$h_{adotado} =$ _____ cm		$MR_{28} =$ _____ kgf/cm^2						FCS = _____							
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm^2)	Relação α_1/MR_{28}	Número de repetições permissíveis	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga									
Simples (roda simples)	Vazio																
	Carregado																
	Sobrecarga																
Simples (roda dupla)	Vazio																
	Carregado																
	Sobrecarga																
Tanden Duplo	Vazio																
	Carregado																
	Sobrecarga																
Tanden Triplo	Vazio																
	Carregado																
	Sobrecarga																
								CRF total									