

# **TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA**

Movimento de Terra e Pavimentação

## **FOLHAS DE EXERCÍCIO DA DISCIPLINA**

### **PROJETO DE PAVIMENTO**

Prof. Dr. Edson de Moura

Disponível em: [www.professoredmoura.com.br](http://www.professoredmoura.com.br)

1º semestre / 2024


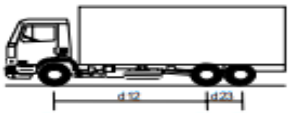
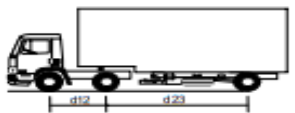




Na Tabela 03 estão apresentadas as classes dos veículos associados: silhueta, número de eixos, peso bruto total (PBT) ou capacidade máxima total (CMT), caracterização, classe e código, dos veículos que dispensam a autorização especial de trânsito (AET)

Tabela 1 – Classe dos veículos

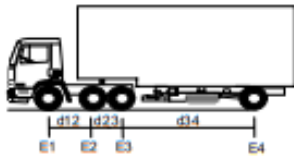
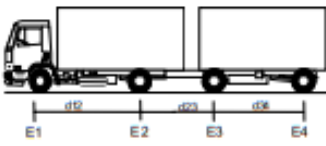
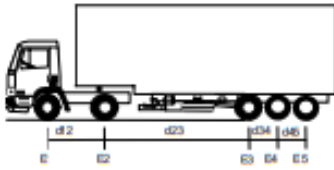

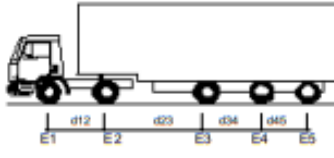
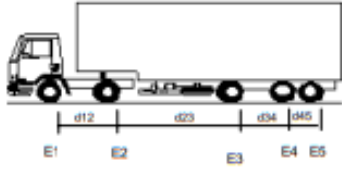
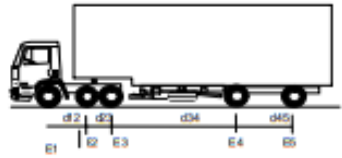
**TABELA DE CLASSIFICAÇÕES:**( Resolução do Contran 12/98 de 06/02/98 )

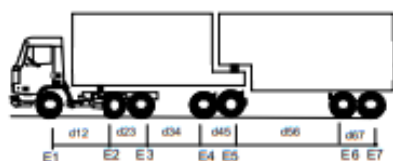
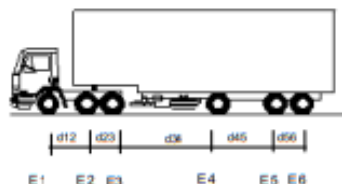
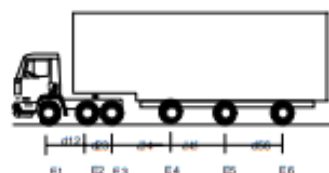
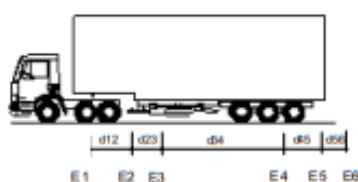
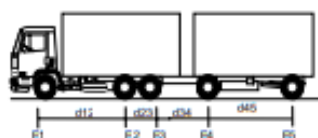
Os valores do PBT/CMT entre parênteses, correspondem ao limite máximo de PBT/CMT, permitido pela legislação (tolerância de + 5% sobre o PBT) - Lei 7.408/85 e Resolução 104/98 de 21/12/98. Salientamos que os limites de PBT e CMT estabelecidos pelo fabricante prevalecem sobre estes desde que não ultrapassem o limite legal de 45 tn, conforme Artigo 100 do Código de Trânsito Brasileiro.

**VEÍCULOS QUE NÃO NECESSITAM DE AET:**

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT / CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	2	16 (16,8)	<b>CAMINHÃO</b> E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12 ≤ 3,50 m	2C	65 ou 66
	3	23 (24,2)	<b>CAMINHÃO TRUCADO</b> 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 ≤ 2,40 m	3C	67
	3	26 (27,3)	<b>CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE</b> 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
	4	31,5 (33,1)	<b>CAMINHÃO SIMPLES</b> 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 ≤ 2,40 m	4C	69
	4	29 (30,5)	<b>CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO</b> E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. 1,20 m < d34 ≤ 2,40 m	4CD	70
	4	33 (34,7)	<b>CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE</b> 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 ≤ 2,40 m	2S2	71
	4	36 (37,8)	<b>CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE</b> 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

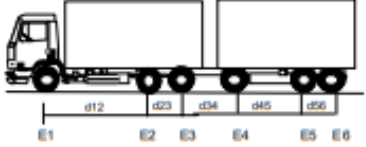
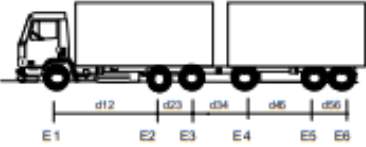

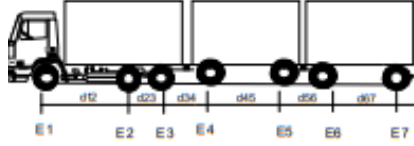
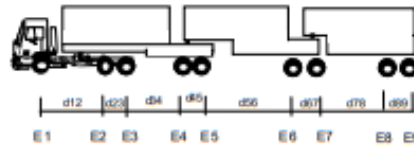
05 Silhuetas.doc

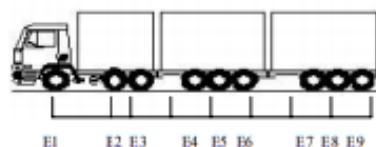
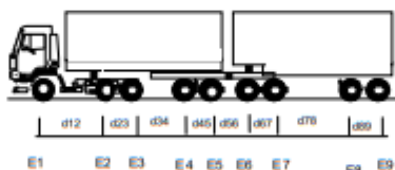
SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT / CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	4	33 (34,7)	<b>CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE</b> E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. E4 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. d12, d34 > 2,40 m 1,20 m < d23 ≤ 2,40 m	3S1	72
	4	36 (37,8)	<b>CAMINHÃO + REBOQUE</b> 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
	5	41,5 (43,6)	<b>CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE</b> 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
	5	40 (42)	<b>CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE</b> 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
	5	46 (48,30) Res. Contran 184/2005 desde que atenda o critério do comprimento	<b>CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE</b> 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	2I3	82
	5	43 (45,2)	<b>CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE</b> 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	2J3	84
	5	43 (45,2)	<b>CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE</b> 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

**SILHUETA**


Nº DE EIXOS	PBT / CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
5	43 (45,2)	<b>CAMINHÃO + REBOQUE</b> 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	2C3	76
5	43 (45,2)	<b>CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE</b> 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	3C2	77
6	48,5 (50,93) Res. Contran 184/2005 desde que atenda o critério do comprimento	<b>CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE</b> 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
6	53 (55,65) Res. Contran 184/2005 desde que atenda o critério do comprimento	<b>CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE</b> 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
6	50 (52,5) Res. Contran 184/2005 desde que atenda o critério do comprimento	<b>CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE</b> 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	3J3	85
7	57 (59,9) Res. Contran 184/2005 desde que atenda o critério do comprimento	<b>BI TREM ARTICULADO (caminhão trator trucado + dois semi reboques)</b> 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	91

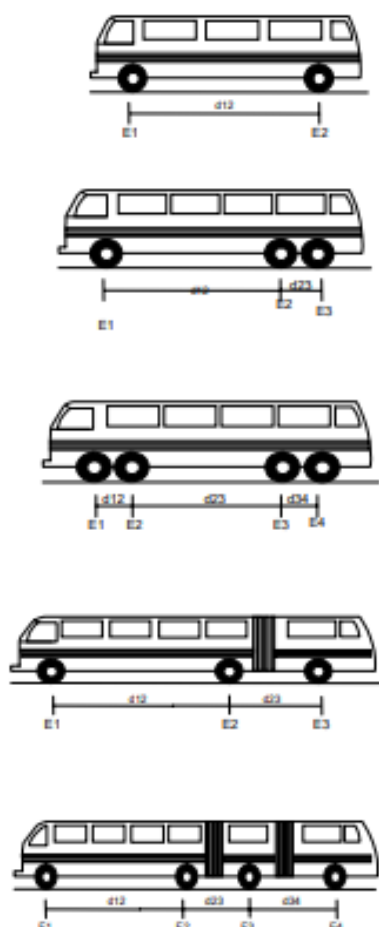
**SILHUETA**

Nº DE EIXOS	PBT / CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
	6	<b>50 (52,5)</b> <b>CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE</b> 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
	6	<b>50 (52,5)</b> <b>ROMEU E JULIETA (caminhão trucado + reboque)</b> 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	3D3	90
	7	<b>57 (59,9)</b> <b>ROMEU E JULIETA (caminhão trucado + reboque)</b> 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	88
	7	<b>63 (66,2)</b> <b>TREMINHÃO (caminhão trucado + dois reboques)</b> 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
	9	<b>74 (77,7)</b> <b>TRI TREM (caminhão trator trucado + três semi reboques)</b> 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

**SILHUETA**


Nº DE EIXOS	PBT / CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
9	74 (77,7)	<b>RODOTREM (caminhão trator trucado + dois semi reboques com dolly)</b> 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
9	74(77,7)	<b>TREMINHÃO DE 9 EIXOS(caminhão trucado + dois reboques)</b> 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.	3Q6	89
9	80(84)	<b>ROMEU E JULIETA DE 9 EIXOS(caminhão trucado + reboque)</b> 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.	3D6	94
	>45	<b>NECESSITA AET</b>	<b>X</b>	88



**SILHUETA**


Nº DE EIXOS	PBT / CMT MÁX. (t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE	CÓDIGO
2	16 (16,8)	<b>ÔNIBUS</b> E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático. E2 = eixo duplo; carga máxima 10 ton. $d12 \leq 3,50$ m	2C	65 ou 66
3	19,5 (20,5)	<b>ÔNIBUS TRUCADO</b> 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	3CB	86
4	25,5 (26,8)	<b>ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL TRUCADO</b> E1E2 = conjunto de eixos direcionais; carga máxima 12 ton. E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $1,20$ m < $d34 \leq 2,40$ m	4CB	87
3	26 (27,3)	<b>ÔNIBUS URBANO ARTICULADO</b> 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
4	36 (37,8)	<b>ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO</b> 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

**Tabela 2 - 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

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

2

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  
 P<sub>24h</sub> = fator de variação diária  
 4,35 = número médio de semanas no mês

**Tabela 3 - 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	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times p^{4,0175}$
	$\geq 8$	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times p^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times p^{3,4720}$
	$\geq 11$	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times p^{5,4840}$
Tandem triplo	0 - 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times p^{3,3549}$
	$\geq 18$	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times p^{5,5789}$

P = peso bruto total sobre o eixo



Tabela 4 - 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	$(P/22,95)^{4,22}$

Tabela 5 - 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
Simple (roda simples)	7,8	6	3	0,8	0,28	0,02	1,02	0,33	0,02
Simple (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

Tabela 6 - 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	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						

# 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 <sub>(ano zero)</sub> = 365*FV*VDM			FV = 16,78	
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio	N =	8504889	8,50E+06	Solicitações	
simples (roda simples)	7,2	6,0	3,0	0,58	0,28	0,02					
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)			$N_{(ano\ zero)} = 365 * FV * VDM$	FV =
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio		
simples (roda simples)		6,0	3,0				<b>N =</b> <b>solicitações</b>	Determinar o valor de N para um período de 10 anos utilizando uma taxa de crescimento de ____/ano.
simples (roda dupla)		10,0	5,0					
tandem duplo (roda dupla)		17,0	6,0					
tandem triplo (roda dupla)		25,5	9,0					

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 anos =**

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 <sub>(ano zero)</sub> = 365*FV*VDM	FV =
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio		
simples (roda simples)		6,0	3,0				<b>N =</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">solicitações</span>	Determinar o valor de N para um período de 10 anos utilizando uma taxa de crescimento de ____/ano.
simples (roda dupla)		10,0	5,0					
tandem duplo (roda dupla)		17,0	6,0					
tandem triplo (roda dupla)		25,5	9,0					

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 =

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 <sub>(ano zero)</sub> = 365*FV*VDM	FV =
	Sobrecarga	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio		
simples (roda simples)		6,0	3,0				<b>N =</b> <b>solicitações</b>	Determinar o valor de N para um período de 10 anos utilizando uma taxa de crescimento de ____/ano.
simples (roda dupla)		10,0	5,0					
tandem duplo (roda dupla)		17,0	6,0					
tandem triplo (roda dupla)		25,5	9,0					

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 =**

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transportes e Obras de Terra

APOSTILA DE PROJETO DE PAVIMENTO

Prof. Dr. Edson de Moura



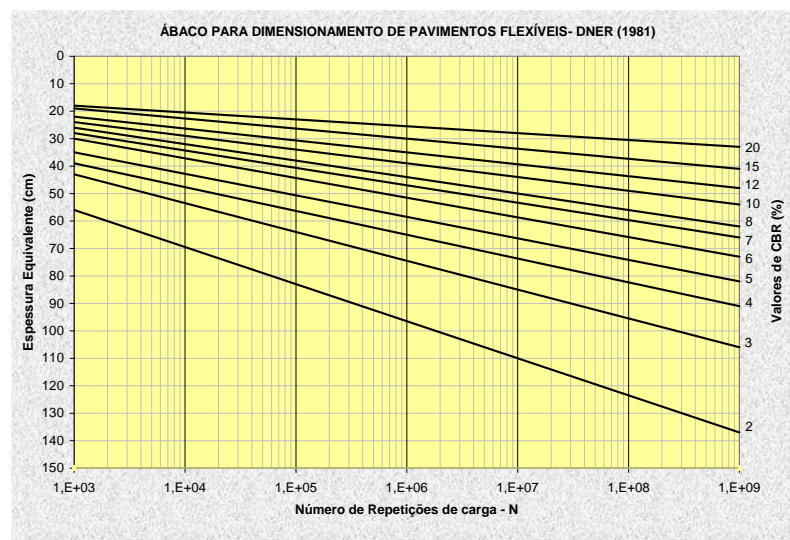
Tabela 7 - Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais DNIT

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

Tabela 8 - Espessuras de revestimento asfálticos

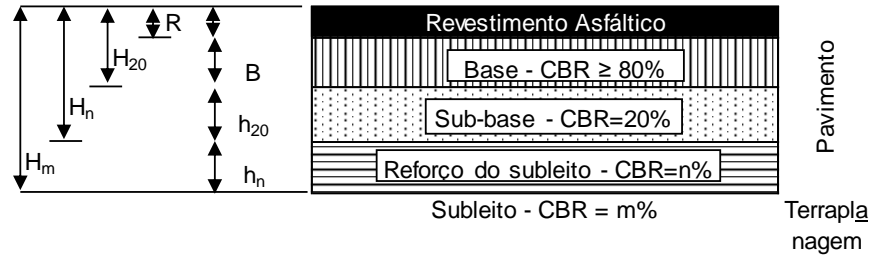
N (repetições) do ESRD de 80 kN	Tipo de Revestimento	Espessura (mm)
$\leq 10^6$	Tratamentos superficiais	15 a 30
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	CA, PMQ, PMF	50
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico	75
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico	100
$N > 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico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

Figura 1 - Ábaco para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis- DNER (1981).



$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (9)$$

Figura 2 - Simbologia das camadas



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:

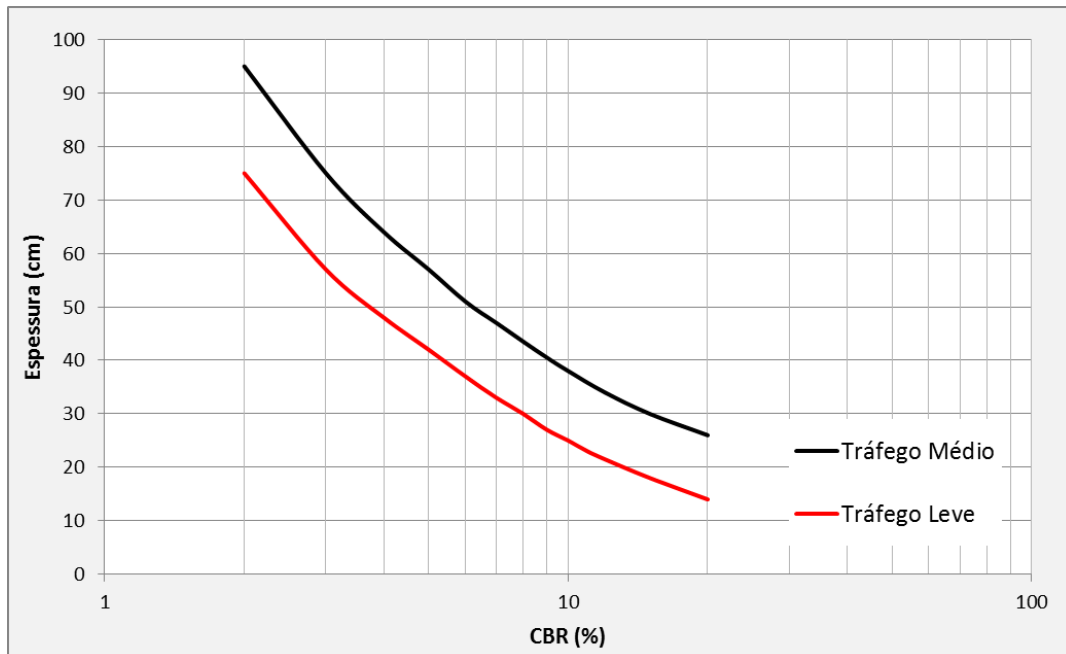
Considerar uma camada de binder (PMQ de graduação densa) como parte da espessura total do revestimento.

Pavimentos	Número N (solicitações)	Condições subleito
A	$7 \cdot 10^6$	$CBR_m = 3\%$
B	$7 \cdot 10^5$	$CBR_m = 5\%$
C	$7 \cdot 10^8$	$CBR_m = 4\%$
D	$3 \cdot 10^7$	$CBR_m = 6\%$

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.

Figura 3 - Ábaco de Dimensionamento para tráfego leve e médio SIURB/PMSP - (adaptação do método do Corpo de Engenheiros - USACE)



Na Tabela 16 são apresentas as espessuras Hsl correlatas aos valores de CBR, para ambos os dois tipos de tráfegos.

Tabela 9- Valores das espessuras Hsl 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

Tabela 10 - 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

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<sub>SB</sub> ou M-CBR<sub>SB</sub>
- $H_{REF}$  espessura fornecidas pela figura 01 para CBR<sub>REF</sub> ou M-CBR<sub>REF</sub>
- $H_{SL}$  espessura fornecidas pela figura 01 para CBR<sub>SL</sub> ou M-CBR<sub>SL</sub>

Figura 4 - Esquema elucidativo PMSP para tráfego médio.

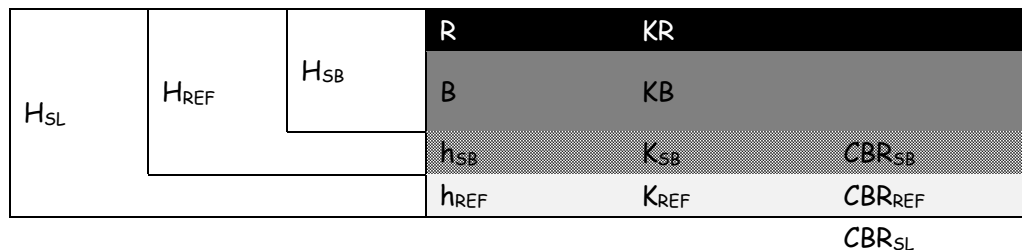
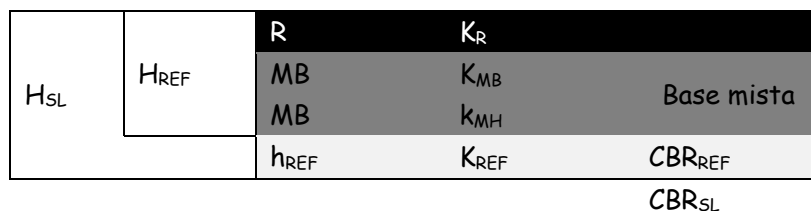


Figura 5 - Esquema elucidativo PMSP para tráfego leve com base mista



Reitera-se que:

- (i) adotaremos nessas notas de aula a opção de base mista somente para tráfego leve.
- (ii) A camada de reforço do subleito é opcional. Utiliza-se em função da capacidade de suporte do subleito.
- (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.

Tabela 11 - 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

Tabela 12 - 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

Figura 6 - 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

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

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

## Exercícios

Ex-1		Ex-2		Ex-3		Ex-4		Ex-5	
Estacas	CBR <sub>SL</sub>	Estacas	CBR <sub>SL</sub>	Estacas	CBR <sub>SL</sub>	Estacas	CBR <sub>SL</sub>	Estacas	CBR <sub>SL</sub>
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 <sub>REF</sub>	11%	CBR <sub>REF</sub>		CBR <sub>REF</sub>	10%	CBR <sub>REF</sub>	12%	CBR <sub>REF</sub>	10%

## Distribuição t de Student

gl	0,600	0,750	0,900	$p(t_p \leq T)$				
1	0,325	1,000	3,078	0,950	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,289	0,816	1,886	0,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,277	0,765	1,638	0,900	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,271	0,741	1,533	0,880	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,267	0,727	1,476	0,860	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,265	0,718	1,440	0,840	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,263	0,711	1,415	0,820	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,262	0,706	1,397	0,800	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,261	0,703	1,383	0,780	2,262	2,821	3,260	4,781
10	0,260	0,700	1,372	0,760	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,260	0,697	1,363	0,740	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,259	0,695	1,356	0,720	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,259	0,694	1,350	0,700	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,258	0,692	1,345	0,680	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,258	0,691	1,341	0,660	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,258	0,690	1,337	0,640	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,257	0,689	1,333	0,620	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,257	0,688	1,330	0,600	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,257	0,688	1,328	0,580	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,257	0,687	1,325	0,560	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,257	0,686	1,323	0,540	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,256	0,686	1,321	0,520	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,256	0,685	1,319	0,500	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,256	0,685	1,318	0,480	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,256	0,684	1,316	0,460	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,256	0,684	1,315	0,440	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,256	0,684	1,314	0,420	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,256	0,683	1,313	0,400	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,256	0,683	1,311	0,380	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,256	0,683	1,310	0,360	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,255	0,681	1,303	0,300	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,254	0,679	1,296	0,250	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,254	0,677	1,289	0,200	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,253	0,674	1,282	0,100	1,960	2,326	2,576	3,291



Tabela 13 - Valores Usuais de Módulo de Resiliência ou Elasticidade

Materiais	Intervalo de valores de módulo de resiliência (MPa)
<b>Concreto asfálticos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revestimento (CAP 50/70)</li> <li>• Revestimento (CAP 30/45)</li> <li>• Binder (CAP 50/70)</li> <li>• Binder (CAP 30/45)</li> </ul>	2000 a 5000 2500 a 4500 2000 a 3000 2500 a 4000
<b>Materiais granulares</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brita graduada</li> <li>• Macadame hidráulico</li> </ul>	150 a 300 250 a 450
<b>Materiais estabilizados quimicamente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo-cimento</li> <li>• Brita graduada tratada com cimento - BGTc</li> <li>• Concreto compactado com rolo - CCR</li> </ul>	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 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo de comportamento laterítico LA, LA' e LG'</li> <li>• Solo de comportamento não laterítico</li> </ul>	100 a 200 25 a 75

IP-DE-P00/001 (2006) – DER-SP

Figura 7 - Guide Pratique de Dimensionnement - LCPC

$$\begin{array}{c}
 \frac{h_1}{E_1} \\
 \hline
 \frac{h_2}{E_2} = \frac{h'}{E_2} = \frac{h''}{E_1}
 \end{array}
 \quad p/\mu = 0,5$$

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

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

Equação 12

Equação 13

Ex-1	<table><tr><td><math>h_1 = 20 \text{ cm}</math> <math>E_1 = 350 \text{ MPa}</math></td></tr><tr><td><math>h_2 = 25 \text{ cm}</math> <math>E_2 = 100 \text{ MPa}</math></td></tr><tr><td></td></tr></table>	$h_1 = 20 \text{ cm}$ $E_1 = 350 \text{ MPa}$	$h_2 = 25 \text{ cm}$ $E_2 = 100 \text{ MPa}$		<table><tr><td><math>h_{\text{equiv}} =</math></td></tr><tr><td><math>E_1 = 350 \text{ MPa}</math></td></tr><tr><td></td></tr></table>	$h_{\text{equiv}} =$	$E_1 = 350 \text{ MPa}$	
$h_1 = 20 \text{ cm}$ $E_1 = 350 \text{ MPa}$								
$h_2 = 25 \text{ cm}$ $E_2 = 100 \text{ MPa}$								
$h_{\text{equiv}} =$								
$E_1 = 350 \text{ MPa}$								
Ex-2	<table><tr><td><math>h_1 = 15 \text{ cm}</math> <math>E_1 = 850 \text{ MPa}</math></td></tr><tr><td><math>h_2 = 20 \text{ cm}</math> <math>E_2 = 180 \text{ MPa}</math></td></tr><tr><td></td></tr></table>	$h_1 = 15 \text{ cm}$ $E_1 = 850 \text{ MPa}$	$h_2 = 20 \text{ cm}$ $E_2 = 180 \text{ MPa}$		<table><tr><td><math>h_{\text{equiv}} =</math></td></tr><tr><td><math>E_2 = 180 \text{ MPa}</math></td></tr><tr><td></td></tr></table>	$h_{\text{equiv}} =$	$E_2 = 180 \text{ MPa}$	
$h_1 = 15 \text{ cm}$ $E_1 = 850 \text{ MPa}$								
$h_2 = 20 \text{ cm}$ $E_2 = 180 \text{ MPa}$								
$h_{\text{equiv}} =$								
$E_2 = 180 \text{ MPa}$								

### 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  $\text{CBR}_{\text{NI}} = 5\%$  e pavimento II com subleito de  $\text{CBR}_{\text{NII}} = 12\%$ .

Na Tabela 33 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 14 - 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  $MR = 18 \cdot \text{CBR}^{0,64}$  - DER-SP

(\*\*\*) Valor de  $MR = 22 \cdot \text{CBR}^{0,8}$  - 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 34 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 15 - 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	<b>1,02</b>	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	<b>1,03</b>	125	270	3000	300	190	80000
	1,55E-04	9,58E+07	<b>1,09</b>	125	300	3000	300	190	80000
	1,39E-04	1,34E+08	<b>1,52</b>	150	270	3000	300	190	80000
	1,36E-04	1,41E+08	<b>1,60</b>	150	300	3000	300	190	80000



**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: $\epsilon_t \text{ adm} > \epsilon_t \text{ atuante}$
------------------------	----------	--------------	-----------------------------------------------------------------------------------

$$\epsilon_{tf} = 10^{-3,546541} * e_{CA}^{-0,717727} * e_{BGS}^{-0,163944} * E_{CA}^{-0,472859} * E_{BGS}^{-0,355946} * E_{Sub}^{-0,149334} * Q_{ESRD}^{0,920915}$$

$\epsilon_t$  = 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		-0-	60	-0-

(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	

**Exercício 1**

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

Pavimento invertido		N = 5,1*10 <sup>7</sup>		
	Material	Espessuras (cm)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	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	$\sigma_t$ (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**

$$\epsilon_v = \left( \frac{K}{N} \right)^{\frac{1}{n}}$$

		mm/mm	Relação	
Deformação	$\epsilon_v(\text{adm})$			Asphalt Institute (Santucci, 1984)
	$\epsilon_v(\text{atuante})$	1,04E-04		(Elsym 5)

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

		(kgf/cm <sup>2</sup> )	Relação	
Tensão	$\sigma_v(\text{adm})$			Kostemberger Heukelon equação 37
	$\sigma_v(\text{atuante})$	0,108		(Elsym 5)

**Exercício 2**

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

Pavimento invertido		N = 8*10 <sup>6</sup>		
	Material	Espessuras (cm)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	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

FATEC - FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

Departamento de Transportes e Obras de Terra

Prof. Edson

Aluno : \_\_\_\_\_

n .matrícula \_\_\_\_\_

Data 28/07/2023

Questão 1 – Atendendo no mínimo a estrutura encontrada no dimensionamento, verificar mecanicisticamente a compatibilidade da estrutura face a tensão de tração na fibra inferior da camada cimentada, condicionar a espessura da BGTC para adequação da estrutura. Determinar a estrutura (concebida) ao menor custo (VALOR < R\$ 24.800,00)

Adotar: N de projeto = 5,90E+07

solicitações

$\sigma_t(\text{ruptura}) = 1,3$

Mpa

FCL = 0,05

$\sigma_t(\text{adm}) = \left( \frac{17,137 - \log(\frac{N_{\text{projeto}}}{FCL})}{19,608} \right) * \sigma_t(\text{ruptura})$

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

onde:

$\sigma_t$  = tensão de tração na flexão na base (MPa)

$e_{\text{CAUQ}}$  = espessura de CAUQ (mm)

$e_{\text{BGTC}}$  = espessura da base (mm)

$e_{\text{BGS}}$  = espessura da subbase (mm)

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

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

$\sigma_t(\text{atuante}) < 1,00$

Camada

MR (MPa)

Espessuras (mm)

\$ /espessura

Revestimento

100 /125/150

2500,5cm

BGTC

170 a 270

7000/10cm

BGS

150/200/250

3000/10 cm

Subleito

200

Camada

Esp. (mm)

Revestimneto

BGS

BGTC

Custo

$\sigma_t(\text{adm}) = 0,5347$

MPa

Esp. de BGTC (mm)	teste 1	teste 2	teste 3	teste 4	teste 5	teste 6	teste 7	
	$\sigma_t$ (atuante)	Relação	$\sigma_t$ (atuante)	Relação	$\sigma_t$ (atuante)	Relação	$\sigma_t$ (atuante)	Relação
170	0,6859	1,28	0,6843	1,28	0,6831	1,19	0,6381	1,19
180	0,6412	1,20	0,6397	1,20	0,6386	1,12	0,5966	1,12
190	0,6016	1,13	0,6003	1,12	0,5992	1,05	0,5598	1,05
200	0,5663	1,06	0,5651	1,06	0,5641	1,05	0,5269	0,99
210	0,5347	1,00	0,5335	1,00	0,5326	1,00	0,4975	0,93
220	0,5062	0,95	0,5050	0,94	0,5042	0,94	0,4710	0,88
230	0,4804	0,90	0,4793	0,90	0,4784	0,89	0,4469	0,84
240	0,4569	0,85	0,4558	0,85	0,4550	0,85	0,4251	0,79
250	0,4354	0,81	0,4344	0,81	0,4337	0,81	0,4051	0,76
260	0,4158	0,78	0,4148	0,78	0,4141	0,77	0,3868	0,72
270	0,3977	0,74	0,3968	0,74	0,3961	0,74	0,3700	0,69

Espessuras (mm) e E do subleito (MPa) - VALORES ADOTADOS

	Esspessuras (mm)	E (MPa)
Revestimento	100	
BGTC	220	
BGS	150	
Subleito	200	

	Esspessuras (mm)	E (MPa)
Revestimento	100	
BGTC	220	
BGS	200	
Subleito	200	

	Esspessuras (mm)	E (MPa)
Revestimento	100	
BGTC	220	
BGS	250	
Subleito	200	

	Esspessuras (mm)	E (MPa)
Revestimento	125	
BGTC	200	
BGS	150	
Subleito	200	

	Esspessuras (mm)	E (MPa)
Revestimento	125	
BGTC	200	
BGS	200	
Subleito	200	

	Esspessuras (mm)	E (MPa)
Revestimento	125	
BGTC	200	
BGS	250	
Subleito	200	

	Esspessuras (mm)	E (MPa)
Revestimento	150	
BGTC	190	
BGS	150	
Subleito	200	

Análise de custo

\$ Revestimento	5000
\$ BGS	4500
\$ BGTC	15400
Total	24900

\$ Revestimento	5000
\$ BGS	6000
\$ BGTC	15400
Total	26400

\$ Revestimento	5000
\$ BGS	7500
\$ BGTC	15400
Total	27900

\$ Revestimento	6250
\$ BGS	4500
\$ BGTC	14000
Total	24750

\$ Revestimento	6250
\$ BGS	6000
\$ BGTC	14000
Total	26250

\$ Revestimento	6250
\$ BGS	7500
\$ BGTC	14000
Total	27750

\$ Revestimento	7500
\$ BGS	4500
\$ BGTC	13300
Total	25300

### 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	$\sigma_t(ruptura) =$	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:

$\sigma_t$  = 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	-o-	> 75	2500/5cm
	BGTC	-o-	> 240	6000/10cm
	BGS	-o-	200	1000/10 cm
	Subleito	100/150		

$\sigma_t(adm)$	0,0000	MPa
-----------------	--------	-----

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

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

Espe. de BGTC (mm)	Condição 1		Condição 2		Condição 3		Condição 4		Condição 5		Condição 6		Condição 7		Condição 8	
	$\sigma_t$ (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	$\sigma_t$ (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	$\sigma_t$ (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	$\sigma_t$ (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	$\sigma_t$ (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	$\sigma_t$ (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	$\sigma_t$ (atuante)	$\frac{\sigma_t(\text{atuante})}{\sigma_t(\text{adm})} \leq 1$	$\sigma_t$ (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																
	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.																
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	

Ex-1 - Determinar qual a espessura da camada cimentada (BGTC) para que a tensão admissível (baseada no Nprojeto) 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, com as possíveis combinações abaixo.

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

**Exercício 1**

Adotar: N de projeto =	8,60E+07	solicitações	$\sigma_t(\text{ruptura}) =$	1,1 Mpa	FCL = 0,05
------------------------	----------	--------------	------------------------------	---------	------------

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

onde:

$\sigma_t$  = tensão de tração na flexão na base (MPa)

$e_{\text{CAUQ}}$  = espessura de CAUQ (mm)

$e_{\text{BGTC}}$  = espessura da base (mm)

$e_{\text{BGS}}$  = espessura da subbase (mm)

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

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

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

Simulação			Espessuras (mm)	
	Camada	MR (MPa)	recomendadas	\$
	Revestimento	-0-	> 125	2500/5cm
	BGTC	-0-	> 200	6000/10cm
	BGS	-0-	200	1000/10 cm
	Subleito	100 a 175		

$\sigma_t(\text{adm}) =$		MPa
--------------------------	--	-----

Espessuras de BGTC (mm)	Condição 1		Condição 2		Condição 3	
	$\sigma_t(\text{atuante})$	$\frac{\sigma_{t(\text{atuante})}}{\sigma_{t(\text{adm})}} \leq 1$	$\sigma_t(\text{atuante})$	$\frac{\sigma_{t(\text{atuante})}}{\sigma_{t(\text{adm})}} \leq 1$	$\sigma_t(\text{atuante})$	$\frac{\sigma_{t(\text{atuante})}}{\sigma_{t(\text{adm})}} \leq 1$
180						
190						
200						
210						
220						
230						
240						
250						
260						
270						
280						

Espessuras (mm) e E do subleito (MPa) - VALORES ADOTADOS

Revestimento	Espessuras (mm)	E (MPa)	Espessuras (mm)	E (MPa)	Espessuras (mm)	E (MPa)
		-0-		-0-		-0-
BGTC		-0-		-0-		-0-
BGS		-0-		-0-		-0-
Subleito						

Análise de custo	\$ Revestimento		\$ Revestimento		\$ Revestimento	
	\$ BGTC			\$ BGTC		\$ BGTC
	\$ BGS			\$ BGS		\$ BGS
Total			Total		Total	

Ex-2 - Determinar qual a espessura da camada cimentada (BGTC) para que a tensão admissível (baseada no Nprojeto) 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, com as possíveis combinações abaixo.

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

**Exercício 2**

Adotar: N de projeto =	3,00E+08	solicitações	$\sigma_t(\text{ruptura}) =$	1,2 Mpa	FCL = 0,05
------------------------	----------	--------------	------------------------------	---------	------------

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

onde:

$\sigma_t$  = tensão de tração na flexão na base (MPa)

$e_{\text{CAUQ}}$  = espessura de CAUQ (mm)

$e_{\text{BGTC}}$  = espessura da base (mm)

$e_{\text{BGS}}$  = espessura da subbase (mm)

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

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

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

Simulação	Camada	MR (MPa)	Espessuras (mm)	
	Revestimento	-0-	recomendadas	\$
	BGTC	-0-	> 125	2500/5cm
	BGS	-0-	> 150	6000/10cm
	Subleito	> 400	140	1000/10 cm

$\sigma_t(\text{adm}) =$	MPa
--------------------------	-----

Espessuras de BGTC (mm)	Condição 1		Condição 2		Condição 3	
	$\sigma_t(\text{atuante})$	$\frac{\sigma_{t(\text{atuante})}}{\sigma_{t(\text{adm})}} \leq 1$	$\sigma_t(\text{atuante})$	$\frac{\sigma_{t(\text{atuante})}}{\sigma_{t(\text{adm})}} \leq 1$	$\sigma_t(\text{atuante})$	$\frac{\sigma_{t(\text{atuante})}}{\sigma_{t(\text{adm})}} \leq 1$
120						
130						
140						
150						
160						
170						
180						
190						
200						
210						
220						

Espessuras (mm) e E do subleito (MPa) - VALORES ADOTADOS

	Revestimento	Espessuras (mm)	E (MPa)	Espessuras (mm)	E (MPa)	Espessuras (mm)	E (MPa)
			-0-		-0-		-0-
	BGTC		-0-		-0-		-0-
	BGS		-0-		-0-		-0-
	Subleito						

Análise de Custo	\$ Revestimento		\$ Revestimento		\$ Revestimento	
	\$ BGTC		\$ BGTC		\$ BGTC	
	\$ BGS		\$ BGS		\$ BGS	
	Total		Total		Total	

DE PAVIMENTO  
dson de Moura



$\Delta S = 27,8N$				
Tensões $\Delta S(\text{Mpa})$	N		Dano cumulativo (%)	Vida remanescente
	Falha	Solicitado		
0,64		725		
0,31		7800		
0,19		11080		
D				
0,16				
$\Delta S = 9,8N^{-0,212}$				
Tensões $\Delta S(\text{Mpa})$	N		Dano cumulativo (%)	Vida remanescente (%)
	Falha	Solicitado		
0,71		9189		
0,62		76345		
0,57		123543		
0,27		2110890		
0,21				

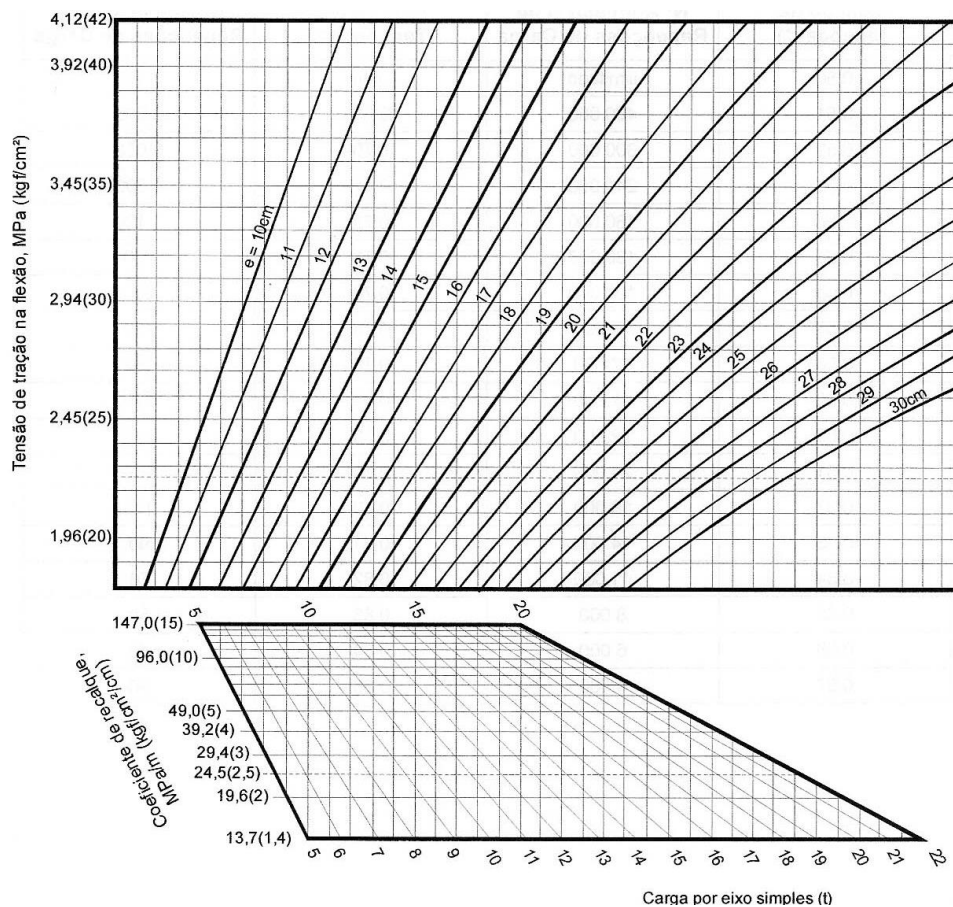
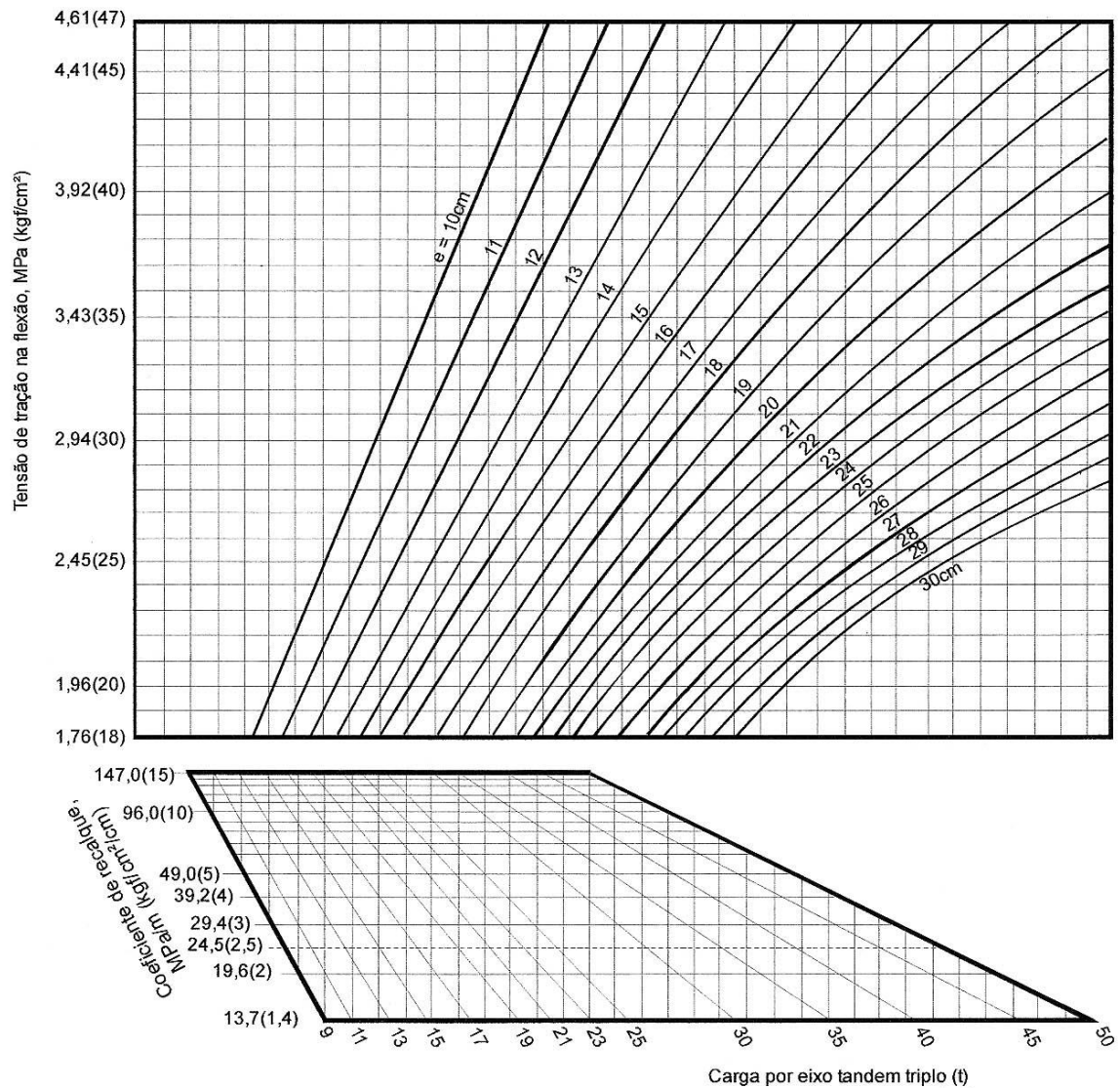




Figura 9 - Ábaco de Picket e Ray - Determinação da tensão de tração ( $\sigma_t$ ) - eixo tandem triplo





Relação de tensões(*)	Nº admissível de repetições de carga	Relação de tensões	Nº admissível de repetições de carga
0,50	ilimitado	0,68	3 500
0,51	400.000	0,69	2 500
0,52	300.000	0,70	2 000
0,53	240.000	0,71	1 500
0,54	180.000	0,72	1 100
0,55	130.000	0,73	850
0,56	100.000	0,74	650
0,57	75.000	0,75	490
0,58	57.000	0,76	360
0,59	42.000	0,77	270
0,60	32.000	0,78	210
0,61	24.000	0,79	160
0,62	18.000	0,80	120
0,63	14.000	0,81	90
0,64	11.000	0,82	70
0,65	8.000	0,83	50
0,66	6.000	0,84	40
0,67	4.500	0,85	30

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

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  
 Coeficiente de reação (k) = 4 kgf/cm<sup>2</sup>/cm  
 Módulo de ruptura (MR) = 45 kgf/cm<sup>2</sup>  
 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  
 Coeficiente de reação (k) = 4 kgf/cm<sup>2</sup>/cm  
 Módulo de ruptura (MR) = 40 kgf/cm<sup>2</sup>  
 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  
 Coeficiente de reação (k) = 5 kgf/cm<sup>2</sup>/cm  
 Módulo de ruptura (MR) = 42,5 kgf/cm<sup>2</sup>  
 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)				$\Sigma$ 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				$MR_{28} =$ _____ $\text{kgf/cm}^2$				FCS =						
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Relação $\sigma_t/MR_{28}$	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																	
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$		$V_m = (V_i + V_p)/2$		$V_i = V_{DMA}$		$V_p = V_i \cdot (1 + (t/100) \cdot P)$		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)				$\Sigma$ 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)								Sobrecarga	Carregado	Vazio
							ESRD (10t)									6,0	3,0
							ETD (17t)									10,0	5,0
							ETT (25,5t)									17,0	6,0
																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 $\sigma_t/MR_{28}$	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)				$\Sigma$ 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)								Sobrecarga	Carregado	Vazio
							ESRD (10t)									6,0	3,0
							ETD (17t)									10,0	5,0
							ETT (25,5t)									17,0	6,0
																25,5	9,0
Ponderação																	
Dimensionamento																	
Número _____		$h_{adotado} =$ _____ cm		$MR_{28} =$ _____ $\text{kgf/cm}^2$						FCS =							
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Relação $\sigma_t/MR_{28}$	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)				$\Sigma$ 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)								Sobrecarga	Carregado	Vazio
							ESRD (10t)									6,0	3,0
							ETD (17t)									10,0	5,0
							ETT (25,5t)									17,0	6,0
																25,5	9,0
Ponderação																	
Dimensionamento																	
Número _____		$h_{adotado} =$ _____ cm		$MR_{28} =$ _____ $\text{kgf/cm}^2$						FCS =							
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Relação $\sigma_t/MR_{28}$	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:	$V_t = \text{volume total}$	$V_m = \text{volume médio}$
$V_p =$					$V_i = \text{volume inicial} = \text{volume diário médio anual}$	
$V_m =$	$V_t =$	$=$		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
							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 _____		$h_{\text{adotado}} = \text{_____ cm}$		$MR_{28} = \text{_____ kgf/cm}^2$			FCS =		
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (tf)	Carga corrigida = $A \cdot FSC$ (tf)	Tensões de tração na placa (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relação $\sigma_t/MR_{28}$	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	