

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

PROJETO DE PAVIMENTO

Dimensionamento de pavimento de concreto

2º. Semestre – 2024 - prof. Edson de Moura

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DE MOURA

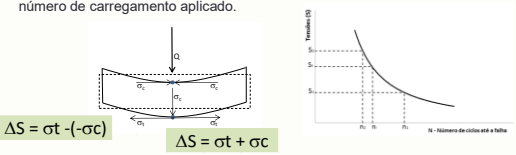
1

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Regra de dano linear cumulativo – Palmgren-Miner

Estruturas submetidas a carregamentos cíclicos estão sujeitas, comumente, a ruptura por fadiga.

O procedimento consiste em 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 ou  $\Delta S$  a diferença tensão aplicada e N o número de carregamento aplicado.



MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DE MOURA

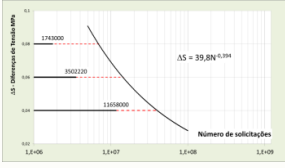
2

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Regra de dano linear cumulativo – Palmgren-Miner

Exercício resolvido

Dado uma determinada curva S-N de um dado material. Três níveis de diferenças de tensões ( $\Delta S$ ) 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?



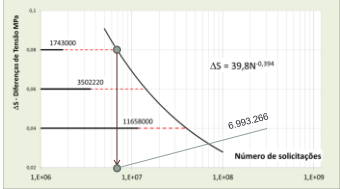
MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DE MOURA

3

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Regra de dano linear cumulativo – Palmgren-Miner



$\Delta S = 39,8N^{-0.394}$   
 $p / \Delta S = 0,08$   
 $0,08/39,8 = N^{-0.394}$   
 $0,00201 = N^{-0.394}$   
 $N = 0,00201^{1/(-1/0.394)}$   
 $N = 6.993.266$

Tensões $\Delta S$ (Mpa)	Falha Solicitado	Dano cumulativo (%)	Vida remanescente
0,08	6.993.266	1743000	24,9
0,06	14512956	3502220	24,1
0,04	40615146	11658000	28,7
		D	77,8
0,037	49501996	<b>11008841</b>	22,2

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DE MOURA

4

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Regra de dano linear cumulativo – Palmgren-Miner

Tensões $\Delta S$ (Mpa)	Falha Solicitado	Dano cumulativo (%)	Vida remanescente
0,64	725		
0,31	7800		
0,19	11080		
	D		
0,16			

$\Delta S = 9,8N^{-0.212}$

Tensões $\Delta S$ (Mpa)	Falha Solicitado	Dano cumulativo (%)	Vida remanescente
0,71	9189		
0,62	76345		
0,57	123543		
0,27	2110890		
0,21			

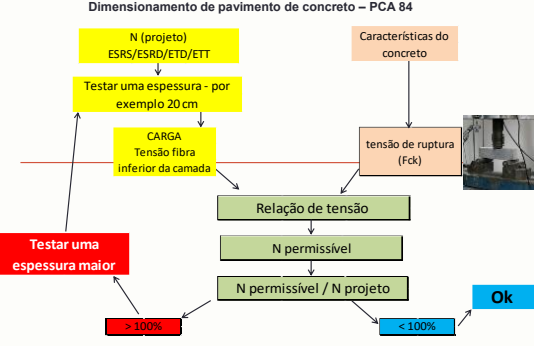
MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DE MOURA

5

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Dimensionamento de pavimento de concreto – PCA 84



MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DE MOURA

6

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Dimensionamento de pavimento de concreto – PCA 84

N admissível (permissível) em função da relação de tensão

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

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

7

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Dimensionamento de pavimento de concreto – PCA 84

Roteiro para determinação da tensão de tração a flexão na fibra inferior da camada de concreto

$$\sigma = \frac{12P(1-\mu^2)}{\pi h^3} \int_0^{\frac{a}{h}} \frac{m^2 \cos^2 \theta}{1 + \frac{4}{\pi}(1-\mu) \ln^2 m - (1-\mu)^2 a^2} \sin^2 \theta \, d\theta$$

Equação de Westergaard

Tensão de tração na fibra inferior

Deflexão

Tensão de tração na fibra inferior

Deflexão

Ábacos de G. Pickett e Ray (ESRD, ETD e ETT)

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

8

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Composição do tráfego

Parte A – determinação do volume total (Vt) de veículos, com carga superior a 10 t/ eixo, que irão solicitar a via no período de 20 anos.

Por exemplo: VDM (VDMA) = 1857 veículos e tx. de crescimento = 4,58% ao ano.

$V_p = V \cdot (1 + (t/100)^P)$	$V_p = 1857 \cdot (1 + (4,58/100)^{20}) = 3558$ veic/dia
$V_t = VDMA$	$V_m = (V_t + V_p)/2$
$V_t = 365 \cdot P \cdot V_m$	$V_t = 365 \cdot 20 \cdot 2707 = 19.761.100$ veículos

Parte B – Distribuição dos veículos e ponderação quanto aos tipos de eixo

Classificação	Carga por Eixos (t)	Σ de cargas por tipo de veículo				
Classe	Tipo	ESRS (6t)	ESRD (10t)	ETD (17t)	ETT (25,5t)	
2C	com 2	6	10			16
3C	com 3	6	10	17		33
253	com 4	6	10	17		33
253	com 5	6	10		25,5	42
313	com 6	6	10	17 (x2)		50
304	com 7	6		17 (x3)		57
376	com 9	6	10	17 (x4)		84
Σ por tipo de eixo (t)		42	50	187	26	305
Ponderação (tipo de eixo%)		13,8	16,4	61,4	8,4	

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

9

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Composição do tráfego

Vt = 19.761.100 veículos

Hipóteses de distribuição de carga da frota

Veículos comerciais que trafegam com: Sobrecarga: 15 % Carga máxima legal 80 % e Vazio 5 %

Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de Vt por carga	Fator de eixo (%)
ESRS (6t)	13,8	2725669	2
ESRD (10t)	16,4	3244844	2
ETD (17t)	61,4	12135717	3
ETT (25,5t)	8,4	1654870	3

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

10

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Composição do tráfego

Hipóteses de distribuição de carga da frota

Veículos comerciais que trafegam com: Sobrecarga: 15 % Carga máxima legal 80 % e Vazio 5 %

Tipo de Eixo	Ponderação (%)	Particularização de Vt por carga	Fator de eixo (%)	Número de repetições previstas			Cargas por eixo		
				Sobrecarga (30%)	Carregado	Vazio	Sobrecarga	Carregado	Vazio
				15	80	5			
ESRS (6t)	13,8	2725669	2	8177	43611	2726	7,8	6,0	3,0
ESRD (10t)	16,4	3244844	2	9735	51918	3245	13,0	10,0	5,0
ETD (17t)	61,4	12135717	3	54611	291257	18204	22,1	17,0	6,0
ETT (25,5t)	8,4	1654870	3	7447	39717	2482	33,2	25,5	9,0

Resumindo: ao longo de 20 anos, irão passar 291.257 eixos tandem duplo (ETD) carregado com 17 t.

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

11

FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo

Dimensionamento com verificação do Consumo de Resistência por Fadiga (CRF)

Dimensionamento

Determinação	Número	01	$R_{f,base} = 20 \text{ cm}$	$R_{f,base} = 42,5 \text{ kg/cm}^2$	Coefficiente de reação (R) = 4 kg/(cm <sup>2</sup> cm)	FSC = 1,3
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (t)	Carga corrigida (t)			
Simplex (eixo simples)	Novo	3,0	3,0	4		
	Carregado	6,0	6,0	8		
	Sobrecarga	7,8	7,8	10		
Simplex (eixo duplo)	Novo	10	10	7		
	Carregado	10,0	10,0	13		
	Sobrecarga	13,0	13,0	17		
Tandem Duplo	Novo	6,0	6,0	8		
	Carregado	13,0	13,0	17		
	Sobrecarga	22,1	22,1	29		
Tandem Tripla	Novo	9,0	9,0	12		
	Carregado	25,5	25,5	33		
	Sobrecarga	33,2	33,2	43		

CONCLUSÃO: Valor do CRF não satisfatório, sendo acima de 100% - deve-se adotar

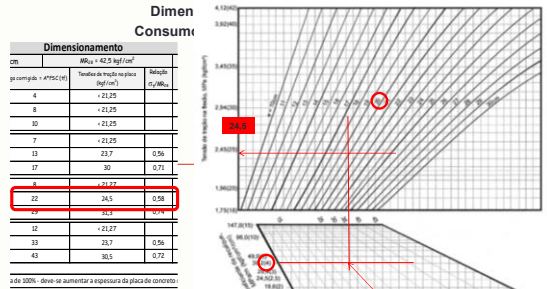
FSC fator de segurança de carga relaciona-se com a forma de aplicação da carga no pavimento (cíclica) comparativamente a forma do ensaio em laboratório do concreto (estática)

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

12

2



MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

13

### Dimensionamento com verificação do Consumo de Resistência por Fadiga (CRF)

Dimensionamento									
Determinação Número 01	$f_{R_{II}} = 20 \text{ cm}$	$MR_{II} = 42.5 \text{ kg/cm}^2$							
Distância de repetição de cargas	Nº admissíveis de repetições de cargas	Distância de repetição de cargas	Nº admissíveis de repetições de cargas	C (N)	Tensão de tração na placa (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relação $\sigma/\sigma_{R_{II}}$	Número de repetições permitidas	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga
0,50	ilimitado	0,68	3.500		+21,25		ilimitado	2726	0%
0,51	400.000	0,69	2.500		+21,25		ilimitado	43611	0%
0,52	300.000	0,70	2.000		+21,25		ilimitado	8177	0%
0,53	240.000	0,71	1.500		+21,25		ilimitado		0%
0,54	180.000	0,72	1.100		+21,25		ilimitado	3245	0%
0,55	130.000	0,73	850		23,7	0,56	300.000	5398	55,36
0,56	100.000	0,74	650		24	0,52	1500	9735	148,97
0,57	75.000	0,75	480		24,5		ilimitado	29257	360,86
0,58	57.000	0,76	360		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,59	42.000	0,77	270		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,60	32.000	0,78	210		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,61	24.000	0,79	160		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,62	18.000	0,80	120		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,63	14.000	0,81	90		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,64	11.000	0,82	70		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,65	8.000	0,83	50		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,66	6.000	0,84	40		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
0,67	4.500	0,85	30		24,5	0,58	57.000	29257	360,86
CRF total									10930,2

(\*) Igual à tensão de tração na fadiga devido à carga dividida pela incidência perpendicular à tração na fadiga do concreto.

CONCLUSÃO: Valor de CRF não satisfatório. Muito acima de 100% - deve-se aumentar a espessura da placa de concreto de forma a diminuir a tensão de tração na placa.

Teste de placa com 20 cm, CRF foi de 10930%. Muito alto!

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

14

### Dimensionamento com verificação do Consumo de Resistência por Fadiga (CRF)

Dimensionamento									
Determinação Número 02	$f_{R_{II}} = 28 \text{ cm}$	$MR_{II} = 42.5 \text{ kg/cm}^2$							
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (N)	Carga completa - 4750 (N)	Tensão de tração na placa (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relação $\sigma/\sigma_{R_{II}}$	Número de repetições permitidas	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga	
Simplex (eixo simplex)	Vazio	3,0	4	+21,25		ilimitado	2726	0%	
	Carruagem	6,0	8	+21,25		ilimitado	43611	0%	
	Solavanga	7,8	10	+21,25		ilimitado	8177	0%	
Simplex (eixo duplo)	Vazio	10	7	+21,25		ilimitado	3245	0%	
	Carruagem	30,0	13	+21,25		ilimitado	5098	0%	
	Solavanga	13,0	17	+21,25		ilimitado	9735	0%	
Tandem Duplo	Vazio	6,0	8	+21,25		ilimitado	18204	0%	
	Carruagem	17,0	22	+21,25		ilimitado	291257	0%	
	Solavanga	22,1	29	+21,25		ilimitado	54611	0%	
Tandem Triplo	Vazio	9,0	12	+21,25		ilimitado	2482	0%	
	Carruagem	25,5	33	+21,25		ilimitado	39717	0%	
	Solavanga	33,2	43	+21,25		ilimitado	7447	0%	
CRF total									0%

CONCLUSÃO: Valor de CRF não satisfatório. Muito acima de 100% - deve-se aumentar a espessura da placa de concreto de forma a diminuir a tensão de tração na placa.

Teste 2 de placa com 28 cm. Não houve CRF foi de 0%. Espessura muito alta!

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

15

### Dimensionamento com verificação do Consumo de Resistência por Fadiga (CRF)

Dimensionamento									
Determinação Número 03	$f_{R_{II}} = 23 \text{ cm}$	$MR_{II} = 42.5 \text{ kg/cm}^2$							
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (N)	Carga completa - 4750 (N)	Tensão de tração na placa (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relação $\sigma/\sigma_{R_{II}}$	Número de repetições permitidas	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga	
Simplex (eixo simplex)	Vazio	3,0	4	+21,25		ilimitado	2726	0%	
	Carruagem	6,0	8	+21,25		ilimitado	43611	0%	
	Solavanga	7,8	10	+21,25		ilimitado	8177	0%	
Simplex (eixo duplo)	Vazio	10	7	+21,25		ilimitado	3245	0%	
	Carruagem	30,0	13	+21,25		ilimitado	5098	0%	
	Solavanga	13,0	17	24,5	0,58	57.000	9735	17%	
Tandem Duplo	Vazio	6,0	8	+21,25		ilimitado	18204	0%	
	Carruagem	17,0	22	+21,25		ilimitado	291257	0%	
	Solavanga	22,1	29	25,5	0,60	18000	54611	303%	
Tandem Triplo	Vazio	9,0	12	+21,25		ilimitado	2482	0%	
	Carruagem	25,5	33	+21,25		ilimitado	39717	0%	
	Solavanga	33,2	43	25	0,59	40000	7447	18%	
CRF total									338%

CONCLUSÃO: Valor de CRF não satisfatório. Muito acima de 100% - deve-se aumentar a espessura da placa de concreto de forma a diminuir a tensão de tração na placa.

Teste 3 de placa com 23 cm, CRF foi de 338%. CRF muito alto! Precisa aumentar a espessura da placa

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

16

### Dimensionamento com verificação do Consumo de Resistência por Fadiga (CRF)

Dimensionamento									
Determinação Número 04	$f_{R_{II}} = 25 \text{ cm}$	$MR_{II} = 42.5 \text{ kg/cm}^2$							
Tipo de eixo	Condição	Carga por eixo (N)	Carga completa - 4750 (N)	Tensão de tração na placa (kgf/cm <sup>2</sup> )	Relação $\sigma/\sigma_{R_{II}}$	Número de repetições permitidas	Número de repetições previstas	% de consumo de resistência à fadiga	
Simplex (eixo simplex)	Vazio	3,0	4	+21,25		ilimitado	2726	0%	
	Carruagem	6,0	8	+21,25		ilimitado	43611	0%	
	Solavanga	7,8	10	+21,25		ilimitado	8177	0%	
Simplex (eixo duplo)	Vazio	10	7	+21,25		ilimitado	3245	0%	
	Carruagem	30,0	13	+21,25		ilimitado	5098	0%	
	Solavanga	13,0	17	+21,25		ilimitado	9735	0%	
Tandem Duplo	Vazio	6,0	8	+21,25		ilimitado	18204	0%	
	Carruagem	17,0	22	+21,25		ilimitado	291257	0%	
	Solavanga	22,1	29	24	0,56	100000	54611	55%	
Tandem Triplo	Vazio	9,0	12	+21,25		ilimitado	2482	0%	
	Carruagem	25,5	33	+21,25		ilimitado	39717	0%	
	Solavanga	33,2	43	23,5	0,55	130000	7447	6%	
CRF total									60%

Teste 4 de placa com 25 cm, CRF foi de 60%. Compatível!

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

17

Obrigado pela atenção

Nosso curso de Projeto de Pavimento

finda aqui!

MATERIAS DE PAVIMENTAÇÃO

PROF. DR. EDSON DEMOURA

18