

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS PELO MÉTODO PCA (1984) – ROTEIRO DE DIMENSIONAMENTO E EXEMPLO DE CÁLCULO

Wellington Borba Broering¹, Patricia Odozynski da Silva², Gabriel Petry da Silva³,
Fábio Krueger da Silva⁴

^{1, 2, 3, 4} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina/Departamento Acadêmico da Construção Civil/Campus Florianópolis/ wellbroering@gmail.com/patricia.odozynski@gmail.com
/petry.gabriel@gmail.com/fabio.krueger@ifsc.edu.br

Resumo: O principal objetivo deste artigo, de caráter didático, é apresentar um exemplo de cálculo de pavimentos rígidos pelo método desenvolvido pela Portland Cement Association (PCA) de 1984, evidenciando um roteiro completo de dimensionamento. A metodologia de cálculo se baseia no roteiro descrito na norma e baseia-se em múltiplas tentativas, arbitrando-se um valor inicial de espessura de revestimento, tendo como base as condições já pré-definidas em projeto. Executando-se o roteiro, verifica-se se a espessura arbitrada atende aos parâmetros máximos de fadiga e erosão, que são de 100%. Caso contrário, o roteiro de cálculo é desenvolvido novamente, até encontrar-se uma espessura de revestimento que garanta perfeito funcionamento e atenda a vida útil prevista em projeto. As condições envolvem a definição do período de projeto, o tipo de fundação, o tipo de subleito, a resistência característica do concreto, a presença ou não de barras de transferência, a presença ou não de acostamento de concreto, características do solo, composição do tráfego e coeficiente de segurança. No roteiro, utiliza-se uma folha de cálculo padrão, fazendo-se uso de quadros e ábacos para encontrar os parâmetros necessários a fim de definir o somatório do consumo de fadiga e erosão. Pode-se concluir que no exemplo didático, o somatório do consumo de fadiga foi de 34,07% e o consumo de erosão de 29,00%, evidenciando uma espessura de placa de 21 centímetros.

Palavras-Chave: método PCA 1984, pavimento rígido, dimensionamento, fadiga, erosão, roteiro de cálculo.

1 INTRODUÇÃO

A Portland Cement Association (PCA) apresenta dois métodos principais para o dimensionamento de pavimentos de concreto simples: o mais tradicional, datado de 1966, é o mais utilizado no país, no entanto o mais atual, datado de 1984, vem sendo mais utilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), permeando novos conceitos no dimensionamento de pavimentos rígidos.

O método mais atual retrata um modelo de análise estrutural de elementos finitos, contrariando o método anterior de 1966, que está relacionado a modelos estruturais de placas com suporte contínuo. Além disso, o modelo de análise leva em conta: o tipo e o grau de transferência de carga nas juntas transversais; os efeitos da existência ou não de acostamentos de concreto; a contribuição estrutural das sub-bases de concreto pobre rolado ou convencional, ou então de sub-bases tratadas com cimento; a ação dos eixos tandem triplos; introduz o modelo de ruína por erosão da fundação do pavimento, usando-o ao mesmo tempo como modelo modificado de fadiga.

Destaca-se por trazer a facilidade de combinar facilmente diferentes fatores de projeto, englobando múltiplas soluções para uma mesma questão, definindo, a solução mais econômica, em se tratando de investimentos iniciais para construção do pavimento.

2 ROTEIRO DE DIMENSIONAMENTO – EXEMPLO DE CÁLCULO

O dimensionamento pelo método PCA/84 é baseado por tentativas, arbitrando-se um valor inicial de espessura de revestimento e tendo como base as condições de dimensionamento conhecidas. Após se executar o roteiro de cálculo é possível verificar se a espessura inicial adotada atende os requisitos do pavimento quanto à análise de fadiga e de erosão. Caso contrário, aumenta-se a espessura e é desenvolvido o roteiro de cálculo novamente, até se obter a espessura de revestimento rígido que garanta o perfeito funcionamento e a vida útil prevista para o pavimento, com o menor custo envolvido.

2.1 Condições de Dimensionamento Conhecidas

Para se dimensionar corretamente o revestimento rígido, é necessário conhecer alguns parâmetros de projeto: **Período de Projeto:** o período previsto para o funcionamento pleno do pavimento (vida útil, dado em anos); **Fundação:** a disposição e o tipo de fundação sob o pavimento, bem como sua espessura (em centímetros); **Subleito:** a capacidade de suporte, utilizando o índice CBR (em porcentagem); **Concreto:** a resistência característica do concreto à tração na flexão aos 28 dias (em Megapascal); **Juntas:** a utilização ou não utilização de barras de transferências de cargas de uma placa de revestimento para outra; **Acostamento:** a composição do acostamento (a utilização ou não utilização de acostamentos de concreto); **Coefficiente de Recalque:** coeficiente “K” (em Megapascal por metro), variando conforme o tipo de solo, o valor de suporte do subleito e a espessura da sub-base; **Composição do tráfego:** a carga (em Quilonewton) e a frequência no período de projeto (em número de eixos); **Coefficiente de Segurança:** a majoração de segurança das cargas, variando conforme o volume do tráfego pesado.

2.2 Dimensionamento – Folha de Cálculo

Para o dimensionamento do pavimento é utilizado uma Folha de Cálculo, conforme a figura 01. Esta folha de cálculo relaciona diversos fatores, e seu objetivo final é fornecer os danos acumulados de consumo de fadiga e dano por erosão sendo que, para um dimensionamento correto, tais consumos e danos não ultrapassem 100%. A parte inicial da folha de cálculo se refere às condições de dimensionamento conhecidas, bem como as colunas (1) e (3), que são dados coletados (a partir do tráfego do local) e estatisticamente calculados para atender a vida útil de projeto. A seguir será apresentado

um roteiro de cálculo para se executar o dimensionamento do revestimento rígido segundo o método PCA/84, utilizando-se um exemplo.

2.2.1 Condições de Dimensionamento Conhecidas

Inicialmente é necessário preencher a folha de cálculo com as condições conhecidas do projeto, sendo estes: período do projeto, especificações da fundação, suporte do subleito, resistência característica à tração na flexão do concreto ($F_{ctm,k,28}$), tipo de junta e acostamento do projeto, coeficiente de recalque (K), composição do tráfego e coeficiente de segurança adotado (FS).

Tabela 01 – Tabela de composição do tráfego.

Eixo	Carga (tf)	Carga (kN)	Nº de solicitação por dia (n1)	Nº de Solicitações durante o período de projeto (N)
Simples	10	98	14	102.200
	8	78,4	2	14.600
	5	49	16	116.800
Tandem Duplo	17	166,6	10	73.000
	16	156,8	2	14.600
	15	147	2	14.600
Tandem Triplo	27	264,6	8	58.400
	9,6	94,08	8	58.400
Total				452.600

Fonte: Apostila de Pavimentação Unisul (2017).

De acordo com o exemplo utilizado, têm-se as seguintes condições: **Período de Projeto:** 20 anos; **Fundação:** Sistema subleito – Sub-base Granular com 10 cm de espessura; **Suporte do Subleito:** CBR = 5%; $F_{ctm,k,28}$: 4,5 MPa; **Junta e Acostamento:** utilização de barras de transferência e sem acostamento de concreto; **K** = 38 MPa/m; O coeficiente de recalque é encontrado em tabela, de acordo com: a composição do solo do sistema de fundação, do índice de suporte do subleito (CBR 5%) e da espessura da sub-base (10 cm); **Composição do tráfego:** as condições de tráfego do exemplo são dadas pela tabela 2, sendo a solicitação durante o período de projeto é dada pelo produto do número de solicitações pelo período de projeto em dias; **FS:** 1,1 (moderada frequência).

2.2.2 Espessura

Em tese, são necessárias diversas execuções do roteiro de cálculo para se encontrar uma espessura ideal. Por questões didáticas, após múltiplas tentativas, o

exemplo apresentado utilizará a espessura de 21 centímetros, que atende melhor a solicitação de carga do tráfego e que se dispõe mais economicamente viável.

2.2.3 Carga por Eixo XFs

Após ter conhecimento das condições iniciais de projeto, utilizando a folha de cálculo, preenche-se a coluna (2): Carga por Eixo x FS, ou seja, a carga de cada eixo multiplicada pelo fator de segurança adotado, no caso, 1,1. Sendo assim, o resultado é apresentado por meio da figura 01.

2.2.4 Tensão Equivalente (TE)

A tensão equivalente relaciona a espessura da placa (do revestimento) adotada para encontrar um coeficiente de recalque do sistema subleito/sub-base. O quadro de referência associa, para o exemplo, a espessura adotada da placa de 21 cm e, para o K do sistema subleito/sub-base 38 MPa/m, executa-se a interpolação dos valores, encontrando uma tensão equivalente. Os quadros dispõem, além de diferentes valores para cada tipo de eixo (simples, tandem duplo e tandem triplo), também para a condição de acostamento (com ou sem acostamento de concreto). Logo, para o exemplo, utilizou-se o quadro para eixos simples, tandem duplo e tandem triplo para a condição sem acostamento de concreto. Como o método utiliza uma série de tabelas e ábacos ficaria extensível a apresentação de todo esse material. Portanto, optou-se por não apresentá-las, ficando a critério do leitor consultá-las por meio das referências. Interpolando os valores, encontram-se os valores apresentados na figura 01.

2.2.5 Fator de Fadiga (FF)

O fator de fadiga é calculado a partir da razão entre a tensão equivalente de cada tipo de eixo pela resistência do concreto à tração na flexão aos 28 dias ($F_{ctm,k,28} = 4,5$ MPa). Os valores encontrados para cada eixo são observados na figura 01.

2.2.6 Fator de erosão (FE)

O fator de erosão relaciona a espessura da placa adotada, as condições das juntas (com barras de transferência ou entrosamento de agregados) e do acostamento

(com ou sem acostamento de concreto). Por meio de quadros há a associação, para o exemplo, da espessura adotada da placa de 21 cm e, para o K do sistema subleito/sub-base 38 MPa/m, executa-se a interpolação dos valores, encontrando o fator de erosão.

Logo, utilizou-se os quadros para eixos simples, tandem duplo e tandem triplo para a condição sem acostamento de concreto e juntas com barras de transferência, encontrando-se os valores visualizados por meio da figura 01.

2.2.7 Número Admissível de Solicitações (fadiga)

Com o fator de fadiga encontrado anteriormente, o tipo de eixo (simples, duplo ou triplo) e auxílio de ábacos, faz a análise da fadiga atuante no pavimento. Assim, obtém-se o número admissível de repetições de carga em função do fator de fadiga. O ábaco utilizado traz em sua primeira linha, à esquerda, a carga por eixo multiplicado pelo fator de segurança para eixos simples e, à direita, a carga por eixo multiplicado pelo fator de segurança para eixos tandem duplos. O mesmo ábaco é utilizado tanto para condição de acostamento de concreto ou sem este.

Não há ábaco para eixos tandem triplos, porém, é recomendado que se utilize a mesma carga para eixo simples, dividindo-se a carga do eixo tandem triplo por 3, e utilizando o fator de fadiga para eixos tandem triplos. Para o exemplo, as cargas do eixo tandem triplo de 297 e 104,5 kN foram consideradas 99 kN e 35 kN para serem aplicadas no ábaco na coluna de eixo simples.

Ressalta-se que, no ábaco de análise de fadiga para eixos tandem triplos não foi possível encontrar um número admissível de solicitação para a carga de 35 kN pois é um valor muito baixo, não presente no ábaco. Logo, admite-se que a quantidade de passadas é ilimitada. Os resultados são expressos na figura 01.

2.2.8 Número Admissível de Solicitações (Erosão)

De forma semelhante ao item anterior, com o fator de erosão encontrado, o tipo de eixo (simples, duplo ou triplo) e auxílio de ábacos, faz-se a análise da erosão atuante no pavimento. Assim, obtém-se o número admissível de repetições de carga em função do fator de erosão. O ábaco utilizado traz em sua primeira linha, à esquerda, a carga por eixo multiplicado pelo fator de segurança para eixos simples e, à direita, a carga por eixo multiplicado pelo fator de segurança para eixos tandem duplos. Utilizam-se ábacos diferentes para a condição com ou sem acostamento de concreto.

Assim como para fadiga, não há ábaco para eixos tandem triplos na análise da erosão, porém, é recomendado que se utilize a mesma carga para eixo simples, dividindo-se a carga do eixo tandem triplo por 3, e utilizando o fator de erosão para eixos tandem triplos. Para o exemplo, as cargas do eixo tandem triplo de 297 e 104,5 kN foram consideradas 99 kN e 35 kN para serem aplicadas no ábaco na coluna de eixo simples.

Ressalta-se que, no ábaco de análise de erosão para eixos tandem triplos não foi possível encontrar um número admissível de solicitação para a carga de 35 kN pois é um valor muito baixo, não presente no ábaco. Logo, admite-se que a quantidade de passadas é ilimitada. Os resultados são expressos na figura 01.

Figura 01 – Resultado final expresso na folha de cálculo padrão.

FOLHA DE CÁLCULO						
Projeto	Exemplo	Juntas com Barras de Transferência		Sim		
Espessura	21 cm	Acostamento de Concreto		Sim		
K	38 MPa/m	Período de Projeto		20 anos		
Fctm,k	4,5 MPa					
FS	1,1					
Carga por Eixo (KN)	Carga por Eixo x FS (KN)	Número Previsto de Solicitações	Número Admissível de Solicitações	Consumo de Fadiga (%)	Número Admissível de Solicitações	Consumo de Fadiga (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
EIXO SIMPLES			(8)	Tensão Equivalente	1,70	
			(9)	Fator de Fadiga	0,38	
			(10)	Fator de Erosão	2,97	
100	110	102200	300000	34,07%	1400000	7,30%
80	88	14600	ILIMITADO	0,00%	7000000	0,21%
50	55	116800	ILIMITADO	0,00%	ILIMITADO	0,00%
EIXOS TANDEM DUPLO			(11)	Tensão Equivalente	1,52	
			(12)	Fator de Fadiga	0,34	
			(13)	Fator de Erosão	3,10	
170	187	73000	ILIMITADO	0,00%	1100000	6,64%
160	176	14600	ILIMITADO	0,00%	2500000	0,58%
150	165	14600	ILIMITADO	0,00%	4000000	0,37%
EIXOS TANDEM TRIPLO			(14)	Tensão Equivalente	1,15	
			(15)	Fator de Fadiga	0,26	
			(16)	Fator de Erosão	3,20	
270	297	58400	ILIMITADO	0,00%	420000	13,90%
95	104,5	58400	ILIMITADO	0,00%	ILIMITADO	0,00%
TOTAL				34,07%	TOTAL	29,00%

Fonte: Apostila de Pavimentação Unisul (2017).

2.2.9 Consumo de Fadiga e Erosão

Encontrado o número admissível de solicitações analisando a fadiga e a erosão, calcula-se a porcentagem (para cada carga) do consumo de fadiga (CF) e erosão (CE), considerando que CF é calculado pela razão entre o número previsto de solicitações pelos números admissíveis de solicitações por fadiga e que CE é calculado pela razão en-

tre o número previsto de solicitações pelos números admissíveis de solicitações por erosão.

Logo, calculando-se para cada carga por eixo e seu respectivo número previsto e admissível de solicitações, tem-se os valores expressos na figura 01.

O somatório do consumo de fadiga e erosão devem ser inferiores à 100% para garantir o correto dimensionamento. Logo, para o exemplo aplicado, tem-se que o somatório de consumo de fadiga é de 34,07% e de consumo de erosão é de 29,00%.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se que o dimensionamento é baseado em tentativas e erros, sempre buscando minorar a fadiga e erosão, aliando segurança e custo, garantindo perfeito funcionamento e vida útil do pavimento. Com as condições de dimensionamento conhecidas e a utilização de uma folha de cálculo padrão, foi possível apresentar um exemplo de dimensionamento para esse tipo de pavimento.

Nota-se também o uso intensivo de quadros e ábacos a fim de obter-se uma série de parâmetros necessários para a posterior obtenção das porcentagens de fadiga e erosão. Estimando-se uma espessura, prossegue-se com os cálculos por todo o roteiro, até encontrar as porcentagens necessárias. Se estas forem superiores aos limites estabelecidos, aumenta-se a espessura e refazem-se todos os cálculos, até obter-se uma espessura tal que atenda esses limites.

Com a utilização de uma planilha *Excel*, por exemplo, tornam-se simples a definição de uma espessura de placa correta, pois é necessário apenas alterar os dados provenientes dos quadros e dos ábacos, visto que os critérios de projeto não se alteram.

Muitas bibliografias apresentam informações confusas e pouco agradáveis de interpretar, no entanto, com este artigo, os autores acreditam que a forma com que as informações e o roteiro de cálculo foram apresentados foi de fácil compreensão e interpretação, atendendo a maior esfera de profissionais possível, para os que buscam um pouco mais sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **MANUAL DE PAVIMENTOS RÍGIDOS**. 2 ed. Rio de Janeiro: Ipr - 714, 2005.
- HALLACK, Abdo. **Pavimento de Concreto**. Florianópolis: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2017. 214 slides, color.
- UNISUL (Santa Catarina). **Apostila de Pavimentação**: Unidade 8 - Dimensionamento de

Pavimentos. Florianópolis: Unisul, 2017. 82 p.