

Contribuição ao projeto otimizado de pavimentos de concreto simples

Eduardo S Lira^a, João Carlos C Barbirato^b, Eduardo N Lages^c

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas

Av. Lourival Melo Mota, S/N – Tabuleiro do Martins – Maceió - AL – CEP 57072-900,

*enl@ctec.ufal.br

RESUMO: No projeto de pavimentos de concreto simples da PCA (1984), empregam-se tabelas e ábacos para verificar a fadiga da placa de concreto e a erosão do subleito/sub-base. Caso um desses critérios não seja atendido, ou se constate o atendimento dos critérios com margem de segurança elevada, repete-se o cálculo para um novo conjunto de parâmetros, sendo usual o ajuste da espessura da placa. Concebe-se um algoritmo computacional para minimizar o custo da placa do pavimento, que combina a espessura da placa com a resistência característica à tração na flexão do concreto. Adota-se o guia da AUSTROADS (2010), por reunir explicitamente as equações analíticas envolvidas no processo de verificação dos critérios em pauta. Um exemplo numérico é apresentado e discutido, o qual evidencia que o ajuste combinado da espessura da placa com a resistência do concreto possibilita a definição de projetos mais otimizados frente àqueles em que se ajusta apenas a espessura.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento rígido. Otimização. Custo. MATLAB.

ABSTRACT: In the design of simple rigid pavements of the PCA (1984), tables and abacuses are used to verify the plate's bending fatigue and subgrade erosion. If one of these criteria is not met, or even if the criteria are met by a high margin, the calculation must be repeated for a new set of parameters, in which the adjustment of the plate's thickness is usual. A computational algorithm, which combines the thickness of the plate with the characteristic tensile strength in the concrete bending, is designed to minimize the cost of the simple rigid pavement plate. The AUSTROADS guide (2010) is used to explicitly gather the analytical equations involved in the process of verifying the criteria in question. A numerical example is presented and discussed, which shows that the combined adjustment of the plate's thickness with the concrete's resistance allows the definition of more optimal projects compared to those in which only the thickness is accounted for.

KEYWORDS: Rigid pavement. Optimization. Cost. MATLAB.

1. Introdução

Desde 1995, pesquisas da Confederação Nacional do Transporte vêm oferecendo um criterioso levantamento da qualidade geral das rodovias brasileiras, que revelam a necessidade de se priorizar o setor [1]. Constata-se que a densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é demasiadamente pequena, quando considerada a de outros países de dimensão territorial semelhante, além de sua expansão apresentar um ritmo bem inferior ao da frota de veículos.

Até o início da década de 50, foi grande o uso de pavimentos de concreto no Brasil (vias urbanas, rodovias e aeroportos), sendo substituído pelo pavimento asfáltico, que demonstrou franca expansão em todo o mundo. Esse quadro começou a mudar com

o ressurgimento dos pavimentos de concreto em diversos países desenvolvidos e com economia estável, culminando, no Brasil, com a retomada, em 2003, do pavimento rígido nas duplicações de rodovias federais [2].

O projeto de pavimentos de concreto simples, de acordo com o método PCA de 1984 [3], e adotado no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Rodoviária (DNIT), é um processo iterativo e usualmente manual no qual a análise estrutural deve procurar satisfazer as restrições prescritas para os fenômenos de fadiga e de erosão. Apesar da existência do programa computacional PCAPAV, da própria PCA, para este procedimento [4], esse não mais é uma ferramenta facilmente acessível, frente ao sistema operacional, no caso o DOS (acrônimo para *Disk Operating System*), em desuso, para o qual foi desenvolvido. O próprio Manual de Pavimentos

Rígidos do DNIT [5] faz uso extensivo de ábacos e tabelas, não sendo citado tal programa. Registra-se, ainda, o programa computacional IMEPAV [6], que também automatiza o projeto de pavimentos rígidos pelo método PCA/84, e que dispensa o uso de ábacos e tabelas.

Neste trabalho, desenvolve-se inicialmente um código computacional de verificação dos critérios governantes de fadiga e de erosão. Toma-se como referência o guia da AUSTROADS de 2010 [7], que é baseado no método PCA de 1984 [3], por reunir as equações analíticas envolvidas no processo de verificação dos critérios em pauta. Em seguida, conscientes dos altos custos atrelados a este tipo de empreendimento, associa-se este código a um procedimento de otimização do custo da placa de concreto, assumindo-se como variáveis de projeto a espessura da placa e a resistência característica à tração na flexão do concreto.

Seguindo os preceitos da pesquisa reproduzível, do inglês *Reproducible Research* [8], todos os arquivos do código computacional desenvolvido e dos exemplos analisados são disponibilizados no seguinte repositório RR público: <http://loi.lccv.ufal.br/art-pcs>.

2. Referencial teórico

2.1 Pavimento de concreto simples

Pavimentos de concreto simples são aqueles constituídos de placas de concreto de cimento Portland, separadas por juntas moldadas ou serradas, com possibilidade de uso de dispositivos de transferência de carga [9]. Essas placas são geralmente apoiadas sobre uma camada que representa a sub-base, granular ou tratada, e que está diretamente assentada sobre o subleito.

Para o pavimento de concreto simples, que não é estruturalmente armado, toda a responsabilidade de suportar os esforços de tração na flexão da placa é atribuída ao concreto, sendo a espessura da placa e a resistência característica à tração na flexão parâmetros a serem considerados no projeto.

Ainda para o dimensionamento da placa do

pavimento rígido, deve-se conhecer o coeficiente de recalque do subleito, também denominado de módulo de reação do subleito ou módulo de Westergaard [5]. Admite-se o uso de uma correlação entre os valores do módulo de reação do solo do subleito e os respectivos valores obtidos para o Índice de Suporte Califórnia (do inglês *California Bearing Ratio* – CBR), como apresentada, por exemplo, por Senço [10].

2.2 Dano por fadiga

As tensões de tração na flexão da placa consideradas no cálculo são as produzidas pela carga tangente à borda longitudinal e a meio caminho entre as juntas. A partir da clássica relação de tensões S_r , dada por

$$S_r = \frac{\sigma_t}{f_{cf}} \quad (1)$$

na qual σ_t é a tensão de tração na flexão que se desenvolve na placa em função do carregamento atuante e f_{cf} é a resistência característica à tração na flexão do concreto, haverá um número limite N_f de aplicações de determinada carga acima do qual o concreto romperá por efeito do fenômeno de fadiga.

De acordo com o guia da AUSTROADS de 2010 [7], calcula-se a relação de tensões como

$$S_r = \frac{S_e}{0,944 f_{cf}} \left(\frac{P FSC}{4,45 FAC_f} \right)^{0,94} \quad (2)$$

na qual S_e é a tensão equivalente do eixo de carga de referência para fadiga [MPa], f_{cf} é a resistência característica à tração na flexão de projeto do concreto, P é a carga do eixo [kN], FSC é o fator de segurança de carga e FAC_f é o fator de ajustamento de carga para a fadiga devido ao grupo de eixo (**tabela 1**).

Tab. 1 – Fatores de ajustamento de carga para a fadiga.

Grupo de eixo	FAC_f
Simple com roda simples (SAST)	9
Simple com roda dupla (SADT)	18
Tandem com roda simples (TAST)	18
Tandem com roda dupla (TADT)	36
Triplo com roda dupla (TRDT)	54
Quad com roda dupla (QADT)	72

Tab. 2 – Coeficientes para previsão da tensão equivalente, com e sem acostamento, em função do tipo de eixo.

Coeficiente	Sem acostamento de concreto				Com acostamento de concreto			
	SAST & TAST	SADT	TADT	TRDT & QADT	SAST & TAST	SADT	TADT	TRDT & QADT
a	0,118	0,560	0,219	0,089	-0,051	0,330	0,088	-0,145
b	125,4	184,4	399,6	336,4	26,0	206,5	301,5	258,6
c	-0,2396	-0,6663	-0,3742	-0,1340	0,0899	-0,4684	-0,1846	0,0080
d	26969	44405	-38	-10007	35774	28661	4418	1408
e	0,0896	0,2254	0,1680	0,0830	-0,0376	0,1650	0,0939	0,0312
f	0,19	19,75	-71,09	-83,14	14,57	2,82	-59,93	-61,25
g	-352174	-942585	681381	1215750	-861548	-686510	280297	488079
h	-0,0104	-0,0248	-0,0218	-0,0120	0,0031	-0,0186	-0,0128	-0,0058
i	-1,2536	-4,6657	3,6501	5,2724	1,3098	-1,9606	4,1791	4,7428
j	-1709	-4082	2003	4400	-4009	-2717	1768	2564

Fonte: adaptada de [7]

A tensão equivalente S_e , por sua vez, é calculada a partir da **equação 3**:

$$S_e = a + \frac{b}{D} + c \ln(E_f) + \frac{d}{D^2} + e [\ln(E_f)]^2 + f \frac{\ln(E_f)}{D} + \frac{g}{D^3} + h [\ln(E_f)]^3 + i \frac{[\ln(E_f)]^2}{D} + j \frac{\ln(E_f)}{D^2} \quad (3)$$

na qual D é a espessura da placa de concreto [mm], E_f é o CBR efetivo (%) de projeto e os coeficientes $a-j$ encontram-se listados na **tabela 2**, que dependem da presença ou não do acostamento de concreto e do grupo de eixo.

Para o método PCA de 1984 [3], assim como no proposto pela AUSTROADS de 2010 [7], usam-se as seguintes expressões [11] para determinação desse número limite de repetições:

$$N_f = \left(\frac{4,2577}{S_r - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (4)$$

quando $0,45 \leq S_r \leq 0,55$, e

$$\log_{10} N_f = \frac{0,9718 - S_r}{0,0828} \quad (5)$$

quando $S_r > 0,55$. No caso de S_r ser menor do que 0,45, o número de repetições é ilimitado, não contribuindo para a fadiga do pavimento.

A regra de Palmgren-Miner do dano acumulado por fadiga é a base do modelo comportamental do pavimento no que se refere ao fenômeno de fadiga. O

consumo de resistência à fadiga do concreto é a relação percentual entre o número previsto de repetições de uma dada carga e o número admissível de repetições da mesma carga. Quando se somam todos os consumos de resistência à fadiga individuais, em todas as categorias de eixo consideradas, obtém-se o consumo total de resistência à fadiga CRF para uma dada espessura tentativa da placa de concreto, ou seja,

$$CRF = 100 \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

na qual n_i é o número de repetições previstas para a i -ésima carga de referência e N_i é o número de repetições admissíveis para essa mesma carga.

O pavimento especificado é considerado adequado em relação à fadiga quando o valor de CRF não ultrapassa o limite de 100% [5].

Ainda que o método da PCA de 1984 tenha força normativa no Brasil, esse não considera o empenamento das placas de concreto gerado pelos diferenciais térmicos, como comentado, por exemplo, em [12] e [13].

2.3 Dano por erosão

No que se refere ao critério de projeto associado à erosão do pavimento, motivada pelo fenômeno de bombeamento de finos do subleito, determina-se o número de repetições de carga admissível para uma certa carga de eixo a partir de

$$\log(C_a N_e) = 14,524 - 6,777 \left[\max \left(0, \left(\frac{P FSC}{4,45 FAC_e} \right)^2 \frac{10^{F_e}}{41,35} - 9 \right) \right]^{0,103} \quad (7)$$

na qual P e FSC são similares às definições apresentadas anteriormente, C_a é um coeficiente adimensional que vale 0,06 para pavimentos sem acostamento e 0,94 para pavimentos com acostamento de concreto, FAC_e é o fator de ajustamento de carga para a erosão devido ao grupo de eixo (**tabela 3**) e F_e é o fator de erosão, calculado de forma equivalente ao cálculo da tensão equivalente S_e , **equação 3**, porém com os coeficientes a – j listados nas **tabelas 4 e 5**, que dependem da presença ou não do acostamento de concreto e do grupo de eixo.

Tab. 3 – Fatores de ajustamento de carga para a erosão.

Grupo de eixo	FAC_e
Simple com roda simples (SAST)	9
Simple com roda dupla (SADT)	18
Tandem com roda simples (TAST)	18
Tandem com roda dupla (TADT)	36
Triplo com roda dupla (TRDT)	54
Quad com roda dupla (QADT)	54

Tab. 4 – Coeficientes para previsão do fator de erosão para bases sem barras de transferência de carga, sem e com acostamento, em função do tipo de eixo.

Coeficiente	Sem acostamento de concreto				Com acostamento de concreto			
	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT
a	0,745	1,330	1,907	2,034	0,345	0,914	1,564	2,104
b	533,8	537,5	448,3	440,3	534,6	539,8	404,1	245,4
c	-0,2071	-0,1929	-0,1749	-0,2776	-0,1711	-0,1416	-0,1226	-0,2473
d	-42419	-43035	-35827	-36194	-44908	-44900	-32024	-15007
e	0,0405	0,0365	0,0382	0,0673	0,0347	0,0275	0,0256	0,0469
f	27,27	26,44	0,64	15,77	20,49	16,37	-9,79	8,86
g	1547570	1586100	1291870	1315330	1676710	1654590	1150280	518916
h	-0,0044	-0,0039	-0,0060	-0,0084	-0,0038	-0,0032	-0,0052	-0,0075
i	-1,4656	-1,4547	1,0741	-1,2068	-1,3829	-0,9584	2,1997	1,5517
j	-1384	-1344	50	-625	-913	-765	469	-599

Fonte: adaptada de [7]

Tab. 5 – Coeficientes para previsão do fator de erosão para bases com barras de transferência de carga, sem e com acostamento, em função do tipo de eixo.

Coeficiente	Sem acostamento de concreto				Com acostamento de concreto			
	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT
a	0,072	0,643	1,410	2,089	-0,184	0,440	0,952	1,650
b	679,9	684,5	498,9	351,3	602,3	609,8	544,9	359,4
c	-0,0789	-0,0576	-0,1680	-0,3343	-0,0085	-0,0484	-0,0404	-0,1765
d	-58342	-58371	-39430	-25576	-50996	-52519	-47500	-28901
e	0,0179	0,0128	0,0322	0,0723	-0,0122	0,0017	0,0179	0,0435
f	6,70	4,61	13,80	29,58	8,99	9,62	-31,54	-15,97
g	2139330	2131390	1437580	923081	1874370	1949350	1719950	1085800
h	-0,0021	-0,0017	-0,0044	-0,0086	0,0008	-0,0007	-0,0051	-0,0084
i	-0,5199	-0,2056	-0,0380	-1,6301	-0,4759	-0,6314	3,3789	3,2908
j	-187	-185	-697	-1327	-374	-326	1675	758

Fonte: adaptada de [7]

O consumo do dano por erosão é a relação percentual entre o número previsto de repetições de uma dada carga e o número admissível de repetições da mesma carga. Quando se somam todos os consumos do dano por erosão individuais, em todas as categorias de eixo consideradas, obtém-se o consumo total do dano por erosão CDE para uma dada espessura tentativa da placa de concreto, ou seja,

$$CDE = 100 \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (8)$$

na qual n_i e N_i são os números de repetições previstas e admissíveis para a carga i de referência. O pavimento especificado é considerado adequado em relação à erosão quando o valor de CDE não ultrapassa o limite de 100%.

3. Modelo de otimização

Nesta seção, apresenta-se o modelo de otimização proposto e implementado em MATLAB®. Este modelo de otimização manipula duas variáveis de projeto associadas à placa do pavimento (espessura da placa e resistência característica à tração na flexão do concreto) e visa encontrar o conjunto correspondente ao menor custo da placa, satisfazendo os dois critérios de projeto (fadiga e erosão).

Assim, o problema de otimização mono-objetivo que se propõe resolver consiste em

$$\text{achar arg min } \text{custo}(D, f_{cf}) \quad (9)$$

no qual a função objetivo é o custo por unidade de área da placa de concreto do pavimento, dado por

$$\text{custo}(D, f_{cf}) = D \text{cuc}(f_{cf}) \quad (10)$$

em que $\text{cuc}(f_{cf})$ é a função custo unitário do concreto que retorna o custo por unidade de volume (R\$/m³) do concreto para um f_{cf} específico, em MPa, que pode ser definida pelo usuário a depender, por exemplo, dos valores praticados pelas indústrias de concreto.

Como restrições não lineares para a otimização têm-se

os limites superiores de 100% para os consumos totais de resistência à fadiga CRF e do dano por erosão CDE , além das restrições de fronteira das variáveis de projeto

$$0 \leq D \leq \infty \quad (11)$$

e

$$f_{cf_{min}} \leq f_{cf} \leq f_{cf_{max}} \quad (12)$$

em que os limites da restrição de fronteira de f_{cf} são os limites dos valores do levantamento de preço realizado nesta pesquisa.

O algoritmo foi concebido em três módulos fundamentais: $pcs_v.m$, $pcs_o.m$ e $pcs_c.m$, que serão descritos a seguir.

3.1 Módulo $pcs_v.m$

O módulo $pcs_v.m$ (acrônimo para Pavimento de Concreto Simples – Verificação) é uma *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB® que verifica os critérios de fadiga e de erosão para um dado par de valores da espessura da placa, D , de concreto do pavimento e da resistência característica à tração na flexão do concreto, f_{cf} , conhecendo-se ainda o CBR efetivo do subleito, o fator de segurança de carga, a indicação da presença ou não de acostamento, a indicação da presença ou não das barras de transferência de carga, as cargas de referência para os diversos tipos de eixo e os números de repetições previstas de cargas de referência para os diversos tipos de eixo, para a vida útil definida para o pavimento.

Para se adequar à chamada da função $fmincon$ de otimização não linear com restrições do MATLAB®, esta função retorna as diferenças entre os consumos totais de resistência à fadiga CRF e do dano por erosão CDE e o limite de segurança de 100%.

Esta função contida no módulo $pcs_v.m$ pode ser utilizada para verificação dos critérios de projeto para um conjunto qualquer de parâmetros do pavimento rígido, de forma independente da estratégia de otimização. O vetor de saída desta função, quando somado a 100, contém os consumos totais CRF e CDE do projeto de interesse.

3.2 Módulo *pcs_o.m*

O módulo *pcs_o.m* (acrônimo para Pavimento de Concreto Simples – Otimização) contém a *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB® que controla o processo de otimização através da chamada da função de otimização mono-objetivo não linear com restrição *fmincon* do *Optimization Toolbox™* do MATLAB®, configurado para uso do algoritmo *interior-point* [14], e dos módulos *pcs_v.m* e *pcs_c.m*.

Uma vez que esta função determina os parâmetros ótimos de projeto (espessura da placa, resistência característica à tração na flexão do concreto, custo e consumos totais de resistência à fadiga e do dano à erosão), os parâmetros de entrada são o CBR efetivo do subleito, o fator de segurança de carga, a indicação da presença ou não de acostamento, a indicação da presença ou não das barras de transferência de carga, as cargas de referência para os diversos tipos de eixo, bem como os respectivos números de repetições previstas de cargas de referência para os diversos tipos de eixo.

3.3 Módulo *pcs_c.m*

O módulo *pcs_c.m* (acrônimo para Pavimento de Concreto Simples – Custo) contém a *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB® que calcula o custo unitário do volume [R\$/m³] do concreto para uma dada resistência característica à tração na flexão [MPa]. Este módulo pode ser reescrito pelo usuário do sistema de acordo com a realidade de preço praticada, devendo retornar, além do custo unitário, os valores limites mínimo e máximo da resistência característica à tração na flexão do concreto para os quais esta função é válida.

4. Exemplo de aplicação

Nesta seção, exploram-se os dados do exemplo de projeto apresentado pela AUSTROADS de 2010 [7], APPENDIX L - EXAMPLES OF USE OF DESIGN PROCEDURE FOR RIGID PAVEMENTS – p. 242–246 – GUIDE TO PAVEMENT TECHNOLOGY – PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010).

O tráfego previsto em um período de 40 anos contempla os grupos de eixos SAST, SADT, TAST, TADT e TRDT, cujas cargas base e números de repetições estão indicados nas **tabelas 6 a 10**. Assume-se o fator de segurança de carga de 1,3.

Tab. 6 – Cargas base e números de repetições (SAST).

Carga base [kN]	Número de repetições
130	2735
120	2735
110	2735
100	5565
90	17088
80	124864
70	1022114
60	3661188
50	4706568
40	2469612
30	2430312
20	1230404
10	44079

Tab. 7 – Cargas base e números de repetições (SADT).

Carga base [kN]	Número de repetições
130	1864
120	8847
110	31309
100	106425
90	226832
80	353197
70	496600
60	733898
50	1283520
40	1675452
30	1792344
20	664374
10	265337

Tab. 8 – Cargas base e números de repetições (TAST).

Carga base [kN]	Número de repetições
200	200
190	260
180	492
170	831
160	1540
150	3038
140	5540
130	10595
120	21251
110	35186
100	51912
90	57420
80	59796
70	60516
60	36972

Tab. 9 – Cargas base e números de repetições (TADT).

Carga base [kN]	Número de repetições
230	1658
220	3336
210	8298
200	34509
190	88423
180	193007
170	368194
160	592281
150	831908
140	676922
130	608961
120	616627
110	649261
100	750271
90	788500
80	1012068
70	1133384
60	985340

Tab. 10 – Cargas base e números de repetições (TRDT).

Carga base [kN]	Número de repetições
260	474
250	5358
240	14818
230	45963
220	138469
210	304051
200	499234
190	457794
180	360942
170	285285
160	243608
150	237274
140	198971
130	186302
120	195242
110	219099

Considera-se inicialmente a presença de acostamento de concreto e a ausência de barras de transferência de carga.

Admite-se o subleito com CBR de 5%, que combinado com uma sub-base de concreto compactado a rolo, com 150 mm de espessura, resulta no CBR efetivo do subleito de 75% (vide *figure 9.1*, p. 127 – AUSTROADS de 2010) [7].

Antes da apresentação do processo de otimização, verifica-se inicialmente a acurácia do módulo computacional desenvolvido em cálculos correntes destinados ao projeto de pavimentos de concreto simples. A segunda parte do exemplo presta-se à averiguação do processo de otimização.

4.1 Verificação

No repositório RR público associado a este trabalho, o exemplo em pauta é reproduzido pelo arquivo *pcs_exv.m*, cujo único parâmetro de entrada é a espessura da placa de concreto (em mm) do pavimento de concreto simples, e os dois parâmetros de saída são os correspondentes consumos totais de resistência à fadiga (*CRF*) e do dano por erosão (*CDE*).

Inicialmente, define-se uma espessura da placa de 210 mm, que ao ser processada pela função implementada resulta no consumo total de resistência à fadiga de 125,3350% e de dano à erosão de 119,3405%. Para uma precisão numérica com uma casa decimal, esses valores igualam-se aos valores registrados no memorial de cálculo do guia (p. 249 – AUSTROADS de 2010) [7].

Quanto ao exemplo original da AUSTROADS de 2010 [7], anteriormente reproduzido, a viabilidade estrutural não está garantida, como o próprio guia e a PCA recomendam, já que os consumos totais ultrapassaram o limite de segurança de 100%, sendo sugerido no memorial de cálculo o aumento da espessura da placa para 215 mm. Com este novo valor da espessura, o módulo computacional leva aos consumos totais de 66,3385% e 93,3104% para a resistência à fadiga e do dano por erosão, respectivamente. Mais uma vez esses valores coincidem com os registrados no guia da AUSTROADS de 2010 [7].

Como um exercício especulativo, não mais registrado no guia da AUSTROADS de 2010 [7], uma vez que há uma folga dos consumos totais em relação ao valor limite de 100%, reduz-se a espessura da placa para 214 mm, e chega-se agora aos consumos totais de 75,1559% e 98,0029% para a resistência à fadiga e do dano por erosão, respectivamente. Registra-se ainda que a redução da espessura da placa para 213 mm inviabiliza o projeto, posto que se atingem os consumos totais de 85,2488% e 102,9278% para a resistência à fadiga e do dano por erosão, respectivamente, sendo esse último superior ao limite de segurança de 100%.

4.2 Otimização

Nesta segunda parte do exemplo, acoplam-se os

dados do projeto em pauta à ferramenta de otimização desenvolvida e disponibilizada neste trabalho, que agora permite a busca combinada pela espessura da placa de concreto do pavimento [mm] e pela respectiva resistência característica à tração na flexão [MPa] que levam ao menor custo do metro quadrado da placa [R\$/m²].

Para que a otimização possa ser realizada, deve-se construir a função do custo unitário do volume de concreto [R\$/m³] a depender da resistência característica à tração na flexão do concreto [MPa]. Normalmente o custo unitário do volume de concreto é estabelecido a partir da resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (f_{ck}). Como o algoritmo de otimização trabalha com a resistência característica à tração na flexão do concreto, usa-se na conversão dessas resistências a expressão

$$f_{cf} = 0,75 \sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

recomendada na *Section 6.6.3* do guia da AUSTROADS de 2010 [7]. Neste trabalho, computa-se o custo unitário em pauta para um determinado valor de a a partir do ajuste polinomial do 3º grau de uma pesquisa de preço realizada junto à empresa CONCRETO REDIMIX DO BRASIL S/A, cujos dados encontram-se apresentados na **tabela 11**.

Tab. 11 – Custo unitário do concreto usinado em função da resistência característica à compressão.

Resistência [MPa]	Custo unitário [R\$/m ³]
20	290,00
25	300,00
30	320,00
35	340,00
40	360,00
45	380,00
50	410,00
55	430,00
60	450,00

O ajuste polinomial desses dados leva à seguinte função de custo unitário do concreto:

$$cuc(f_{ck}) = 302,21 - 3,8054 f_{ck} + 0,1854 f_{ck}^2 - 0,0013 f_{ck}^3 \quad (14)$$

que apresenta coeficiente de determinação de 0,9988. Para o desenvolvimento do módulo *pcs_c.m*, que calcula o custo unitário do volume [R\$/m³], que se encontra disponível no repositório RR deste trabalho, utiliza-se a expressão descrita na **equação 14**.

O módulo *pcs_exo1.m* contém a *function* desenvolvida na linguagem do MATLAB®, que define os dados gerais do projeto, chama o módulo de otimização *pcs_o.m* e apresenta os parâmetros otimizados com saídas numéricas e gráficas.

Os projetos estruturalmente viáveis com espessuras de 215 mm e 214 mm, avaliados na primeira parte deste exemplo, cuja resistência característica à tração na flexão do concreto é de 4,5 MPa, apresentam custos da placa do pavimento de R\$ 74,14 e R\$ 73,80 por metro quadrado, respectivamente.

Com o processamento do módulo *pcs_exo1.m*, o projeto otimizado converge para uma espessura da placa de 227,9 mm, para uma resistência característica à tração na flexão do concreto de 4,0 MPa, que leva a um custo da placa do pavimento de R\$ 72,02 por metro quadrado, tendo consumos totais da resistência à fadiga de 100% e do dano por erosão de aproximadamente 49,99. Constatam-se reduções no preço por metro quadrado da placa do pavimento de, respectivamente, 2,9% e 2,4%, obtidos com um aumento da espessura da placa e uma redução da resistência característica à tração na flexão do concreto.

Na **figura 1**, representam-se as curvas de nível do custo por metro quadrado da placa do pavimento com acostamento e sem barras de transferência, com destaque para a curva de nível do custo ótimo, as curvas de nível dos consumos totais de 100% para os dois critérios de projeto (fadiga e erosão), bem como o ponto com as variáveis ótimas de projeto.

Da **figura 1** observa-se que o projeto ótimo foi controlado pelo critério de resistência à fadiga, tendo sido atingido o consumo total de 100%, havendo uma folga em relação ao dano por erosão, sendo desnecessário o uso de barras de transferência de carga.

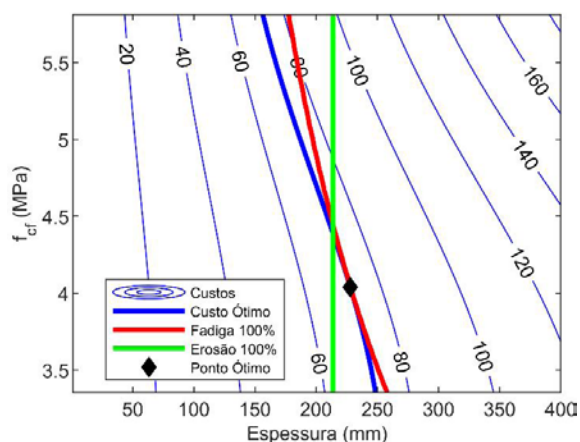


Fig. 1 – Curvas de nível e ponto ótimo do projeto com acostamento e sem barras de transferência.

Ao considerar um novo cenário de projeto sem a presença do acostamento em concreto (*pcs_exo2.m*), o novo projeto otimizado converge para uma espessura da placa de 254,6 mm, para uma resistência característica à tração na flexão do concreto de 3,7 MPa, que leva a um custo da placa do pavimento de R\$ 76,18 por metro quadrado, tendo consumos totais de 100% tanto da resistência à fadiga quanto do dano por erosão.

Na **figura 2**, representam-se as curvas de nível do custo por metro quadrado da placa do pavimento sem acostamento e sem barras de transferência, com destaque para a curva de nível do custo ótimo, as curvas de nível dos consumos totais de 100% para os dois critérios de projeto (fadiga e erosão), bem como o ponto com as variáveis ótimas deste novo cenário de projeto.

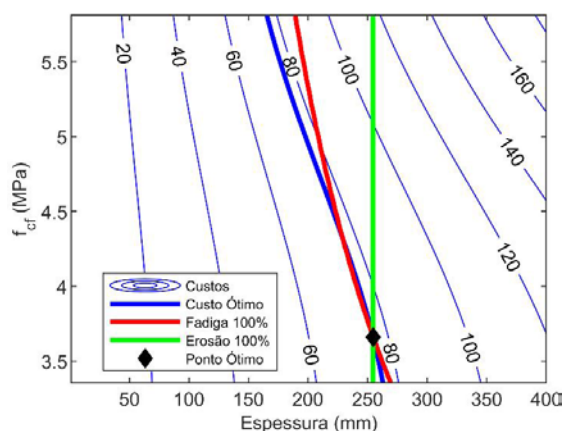


Fig. 2 – Curvas de nível e ponto ótimo do projeto sem acostamento e sem barras de transferência.

Em relação ao cenário do projeto anterior, houve um aumento da espessura da placa do pavimento, com redução da respectiva resistência característica à tração na flexão do concreto, porém com um aumento no custo por metro quadrado da placa.

Por fim, cria-se um cenário sem a presença do acostamento, porém com a presença de barras de transferência de carga (*pcs_exo3.m*), cujo projeto otimizado converge para uma espessura da placa de 241,0 mm, para uma resistência característica à tração na flexão do concreto de 4,0 MPa, que leva a um custo da placa do pavimento de R\$ 75,53 por metro quadrado, que apresenta consumo total de 100% para a resistência à fadiga, retornando a folga em relação ao dano por erosão, cujo consumo foi de 31,4913%.

Na **figura 3**, representam-se as curvas de nível do custo por metro quadrado da placa do pavimento sem acostamento e com barras de transferência, com destaque para a curva de nível do custo ótimo, as curvas de nível dos consumos totais de 100% para os dois critérios de projeto (fadiga e erosão), bem como o ponto com as variáveis ótimas deste último cenário de projeto.

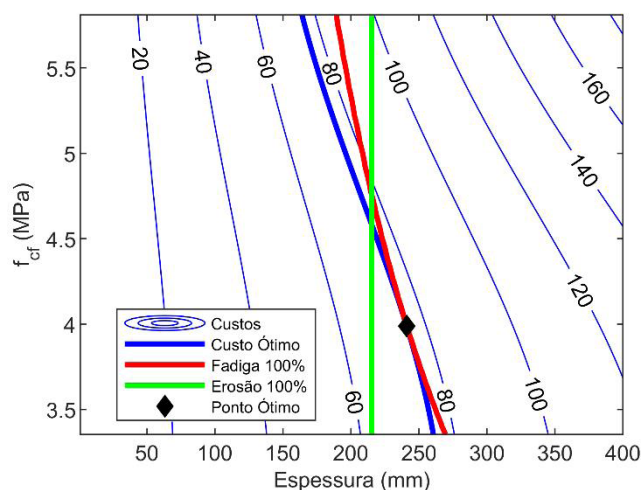


Fig. 3 – Curvas de nível e ponto ótimo do projeto sem acostamento e com barras de transferência.

Este último cenário apresentou valores intermediários da espessura da placa, e do custo por metro quadrado da placa em relação aos dois cenários anteriores, porém com resistência característica à tração na flexão do concreto equivalente à do primeiro

cenário. Todos os valores ótimos para os três cenários estudados encontram-se resumidos na **tabela 12**.

Tab. 12 – Variáveis de projeto e custo unitário por metro quadrado da placa para os três cenários de projeto.

Cenário	AC	BT	D [mm]	f_c [MPa]	Custo da Placa [R\$/m ²]
1	Sim	Não	227,9	4,0	72,02
2	Não	Não	254,6	3,7	76,18
3	Não	Sim	241,0	4,0	75,53

AC: acostamento / BT: barras de transferência de carga

Como já apontavam as equações governantes do critério de dano por erosão, **equações 7 e 8**, nas **figuras 1, 2 e 3** observa-se que a curva de nível associada ao consumo total relacionada com esse critério é governada apenas pela espessura da placa do pavimento, não havendo contribuição da resistência característica à tração na flexão do concreto.

As combinações de acostamento e barras de transferência de carga apontaram que o projeto de menor custo da placa de concreto do pavimento não necessariamente mobiliza integralmente os consumos totais da resistência à fadiga e ao dano por erosão.

5. Conclusões

Os clássicos métodos de projeto de pavimentos rígidos produzem pavimentos seguros, mas a otimização proposta neste trabalho incluiu no dimensionamento da placa um critério de economicidade que conduz à solução otimizada.

Foram revisados os critérios de projeto de pavimento de concreto simples associados aos consumos totais da resistência à fadiga e do dano por erosão, adotado no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Rodoviária (DNIT), baseado no método da PCA de

1984 [3], com o apoio das equações analíticas do guia da AUSTROADS de 2010 [7].

Foram desenvolvidos códigos computacionais em MATLAB®, tanto para verificação de um cenário de projeto quanto para otimização da placa do pavimento, com referências às variáveis de projeto da espessura da placa e da correspondente resistência característica à tração na flexão do concreto, em que foram experimentados cenários combinados de projeto frente a presença ou não de acostamento de concreto e de barras de transferência de carga.

O código computacional de verificação foi testado frente a resultados de exemplo desenvolvido no guia da AUSTROADS de 2010, sendo posteriormente aplicado junto ao módulo de otimização, sendo disponibilizado em repositório RR público (<http://loi.lccv.ufal.br/art-pcs>) juntamente com os arquivos dos exemplos analisados neste trabalho. Ferramentas computacionais como essas contribuem sobremaneira para a agilidade do trabalho de projetistas, possibilitando, inclusive, a otimização de recursos.

Ainda que o processo de otimização se volte exclusivamente ao custo da placa de concreto simples do pavimento, a ideia proposta neste trabalho pode ser estendida, incluindo o custo de novos elementos do pavimento e outras variáveis de projeto. De forma semelhante, é possível também avaliar a influência de outros modelos de fadiga [9] e erosão, bem como de outras relações entre as resistências características do concreto à compressão e à tração em flexão.

Agradecimentos

O último autor agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de Produtividade em Pesquisa.

Referências Bibliográficas

- [1] Confederação Nacional do Transporte (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2017: relatório gerencial, Brasília, 2017.
- [2] Maschio, A. A Evolução do Pavimento de Concreto no Brasil. Vias Concretas – Pavimentação com Sustentabilidade – 16º Encontro Técnico – DER/PR, 2012.
- [3] Packard, R. G. Thickness design for concrete highway and street pavements. Portland Cement Association: Skokie, IL, 1984. 46 p.
- [4] Rufino, D. M. S. Estudo dos Procedimentos de Dimensionamento e dos Novos Programas de Análise de Tensões em Pavimentos de Concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- [5] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de Pavimentos Rígidos. 2ª edição. Publicação IPR – 714: Rio de Janeiro, RJ, 2005. 234 p.
- [6] Vieira, A.; Silva, P. A. L.; Moreira Júnior, G. S. D.; Ramos, K. O. Dimensionamento de Pavimentos de Concreto: Programa IMEPAV de Automatização do Método PCA/84. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, Goiânia/GO, 2006.
- [7] AUSTRROADS. Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, 2010.
- [8] Vandewalle, P.; Kovacevic, J.; Vetterli, M. Reproducible research in signal processing. IEEE Signal Processing Magazine, v. 26, n. 3, p. 37–47, 2009.
- [9] Silva, J. E. M.; Carneiro, L. A. V. Pavimentos de concreto: histórico, tipos e modelos de fadiga. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, v. XXXI, 3º trimestre, p. 14-33, 2014.
- [10] Senço, W. Manual de Técnicas de Pavimentação: volume 1, 2ª edição, São Paulo: PINI, 2007.
- [11] Packard, R. G.; Tayabji, S. D. New PCA design procedure for concrete highway and street pavements. Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University; 1985, p. 225–236.
- [12] Balbo, J. T.; Severi, A. A. Thermal Gradients in Concrete Pavements in Tropical Environment: Experimental Appraisal. Transportation Research Record, v. 1809, p. 12–22, 2002.
- [13] Balbo, J. T. Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2003.
- [14] Waltz, R. A.; Morales, J. L.; Nocedal, J.; Orban, D. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. Mathematical Programming, v. 107, n. 3, p. 391–408, 2006.