

Viabilidade econômica de pavimento rígido em concreto estruturalmente armado

Marcos Roberto Giacomini – marcos@giacominiengenharia.com.br
MBA Infraestrutura de Transportes e Rodovias
Instituto de Pós-Graduação - IPOG
Campinas, SP, 07 de fevereiro de 2022

Resumo

O pavimento rígido vem sendo cada vez mais aplicado nas rodovias de tráfego intenso e em corredores de ônibus, nas grandes cidades, enquanto que o pavimento rígido em concreto estruturalmente armado é muito pouco adotado devido ao alto custo da armadura à flexão. Visando explorar mais este assunto, este trabalho busca encontrar situações em que este tipo de pavimento seja o mais indicado levando-se em consideração algumas condicionantes como: tempo de vida útil, baixo módulo de resistência do subleito e resistência a tráfegos intensos. Os trechos de pavimentos que não tenham disponibilidade de materiais adequados para reforço do subleito ou quando os materiais de revestimentos de asfalto representem alto custo, tornam-se potenciais pontos para viabilizar a adoção do pavimento rígido. Através da bibliografia especializada e utilizando uma tipologia específica, comparou-se os resultados de dimensionamento e especificação dos materiais obtidos pela simulação dos seguintes tipos de pavimento: pavimento flexível, pavimento rígido em concreto e em concreto estruturalmente armado para um tráfego pesado e subleito com CBR de 2%. O trabalho visa comparar os resultados pelo prisma de custo e para isso foi necessário levar em consideração a precificação do custo inicial da construção, da vida útil e da manutenção.

Palavras-chave: *Pavimento Rígido Em Concreto Estruturalmente Armado. Tela Para Pavimento De Concreto Em Rodovia. Pavimento De Concreto Para Subleito Com Cbr Baixo. Pavimento De Concreto Para Tráfego Pesado.*

1. Introdução

Busca-se com este artigo mais do que evidenciar as vantagens inerentes ao pavimento de concreto estruturalmente armado (como redução da espessura de concreto, maior espaçamento entre juntas, menores gastos com preparação de sub-base, grande durabilidade, baixa manutenção, resistência a solventes e menor consumo de combustível) encontrar situações específicas onde seja também mais viável economicamente em relação aos pavimentos flexível e rígido de concreto sem armadura estrutural.

Apesar das variáveis de intervenção do pavimento serem consideradas e somadas ao custo total de um pavimento, na sua vida útil de utilização, outras grandezas que geram custo à sociedade são mais difíceis de serem mensuradas e às vezes impossíveis de serem dimensionadas. O custo à sociedade durante a reparação e manutenção de um pavimento (por atrapalhar o tráfego e retardar o fluxo), assim como a economia de combustível gerada por um tipo de pavimento A ou B não entram diretamente no custeio da obra a ser implantada.

Este trabalho visou explorar uma situação hipotética em que o concreto armado apresente custo inicial (dividido pela sua vida útil) menor ou igual aos outros tipos de pavimento quando por exemplo exista dificuldades de oferta de material de reforço de subleito, sub-base e base a distâncias próximas à obra. Neste caso, a distância dos materiais poderá influenciar de forma que a economia com a preparação destas camadas compense o custo inicial de uma placa de concreto com armadura.

As simulações deste trabalho focaram numa situação de tráfego pesado e intenso, considerando subleito com CBR baixo e com distâncias no âmbito financeiro significativas entre a usina e a obra para o material de reforço.

3. Desenvolvimento

3.1 Pavimento rígido de concreto estruturalmente armado

O trabalho de Rodrigues e Pitta (1997) com o título “Dimensionamento de Pavimento de Concreto Estruturalmente Armado”, através da ABCP e IBTS, apresenta o roteiro para dimensionamento das placas estruturalmente armadas. Como um dos objetivos deste artigo é privilegiar o pavimento rígido de concreto estruturalmente armado, segue breve resumo do procedimento de dimensionamento.

3.2 Pavimento rígido de concreto

Foi utilizado o método do PCA (1984) para dimensionar, nas mesmas condições de solo e de uso, o pavimento considerando placas de concreto sem armadura estrutural com o objetivo de comparação. O roteiro para chegar no conceito de “Consumo de Resistência à Fadiga” e “Consumo do Pavimento devido à Erosão” segue abaixo.

4. Dimensionamento

A seguir serão apresentados os resultados de dimensionamento de uma situação hipotética buscando-se a melhor alternativa para os três tipos de pavimento abordados anteriormente. Como o objetivo é buscar alguma situação em que o pavimento rígido estruturalmente armado seja vantajoso, foi escolhido um caso hipotético que possivelmente direcione para esta solução.

4.1 Dimensionamento Pavimento flexível

Método do DNER

a- Como $N = 1,0 \times 10^8$ → espessura do CBUQ mínima é 12,5cm

b- Para do subleito com CBR= 2%, calcula-se a Altura Total do Pavimento H_t

$$H_t = 124,69\text{cm} \sim 125\text{cm}$$

c- Adoção dos coeficientes estruturais das camadas do pavimento

- Revestimento Betuminoso (CBUQ) → $K_R=2$
- Base com Brita Graduada Simples (BGS) CBR=80% → $K_B=1$
- Sub-base com macadame seco (RACHÃO) CBR=40% → $K_{SB}=1$
- Reforço subleito c/ solo cimento (SC=21 a 28kg/cm²) CBR=15% → $K_{SB}=1,2$

H_{20} → espessura do revestimento + base = 31,46~32cm

A espessura da base calculada é igual a 7cm e adotada 12cm

$H_n \rightarrow$ espessura do revestimento + base + sub-base = 37,37 ~40cm

A espessura da sub-base calculada é igual a 3cm e adotada 15cm

$H_m \rightarrow$ espessura total do pavimento = 125cm

A espessura da camada de reforço do subleito calculada é igual a 60,83 ~65cm

Portanto a altura total do pavimento será de 104,50cm

Análise Mecanicista

A análise mecanicista partiu das espessuras determinadas pelo método do DNER e variou em função da busca ao atendimento de todas as verificações nas camadas.

Camada	MR (MPa)	Poisson	Espessura pelo DNER
Revestimento - Concreto Asfáltico-CBUQ-CAP70	4000	0,3	12,5
BGS	350	0,35	12
MACADAME SECO (rachão)	200	0,35	15
Reforço de Subleito - Solo Cimento (SC)	5000	0,2	65
Subleito (2%)	20	0,4	

Tabela 8 – Especificação das camadas projetadas pelo método do DNER ($N=10^8$ -CBRsbleito= 2%)

Após diversas simulações verificou-se a necessidade de alterar a espessura da camada de revestimento asfáltico, conforme segue tabela abaixo.

Camada	MR (MPa)	Poisson	Espessura pelo DNER
Revestimento - Concreto Asfáltico-CBUQ-CAP70	4000	0,3	23
BGS	350	0,35	12
MACADAME SECO (rachão)	200	0,35	15
Reforço de Subleito - Solo Cimento (SC)	5000	0,2	65
Subleito (2%)	20	0,4	

Tabela 9 – Espessuras das camadas após análise Mecanicista) ($N=10^8$ -CBRsbleito= 2%)
Resultado das simulações considerando a tabela acima com o programa MnLayer:

Parâmetro	Atuante	Admissível	situação
$D_o (0,01 \text{ mm})$	4,37E-01	4,40E-01	ok
$e_{t,h}$	7,27E-05	7,84E-05	ok
σ_t	9,84E-02	3,70E-01	ok
$e_{c,v}$	5,27E-05	2,42E-04	ok

Tabela 10 – Resultados da avaliação mecanicista

4.2 Dimensionamento Pavimento Rígido (PCA)

Método do PCA (1984)

- a- Subleito com CBR=2% e correspondente $k=16$ MPa/m;
b- Foram simuladas duas possibilidades para o pavimento em PCA, sendo uma com sub-base em BGS e outra em SMC.
c- Dados do projeto:

DADOS DO PROJETO			
k subl	16	MPa/m	
Eixos por dia	8.444,44		
total 20 anos	60.800.000,00		
eixo simples	120 kN	0%	0,00
eixo simples	100 kN	100%	60.800.000,00
eixo simples	60 kN	0%	0,00
tandem duplo	190 kN	0%	0,00
tandem duplo	180 kN	0%	0,00
tandem duplo	170 kN	0%	0,00
Considerações para dimensionamento:			
Acostamento de concreto		não	
Barras de transferência		sim	

Tabela 11 – Dados de projeto para dimensionamento do pavimento em PCA

- Pavimento com juntas transversais e sem acostamento de concreto

d- Resultado da simulação com sub-base em BGS

$k=20$ MPa/m com Sub-base = 12cm e espessura da placa = 24 cm

$$\sigma_{eq} = 1,58 \text{ MPa} ; F_{ct,M,k} = 4,5 \text{ MPa} \rightarrow F_{Fad} = \frac{\sigma_{eq}}{F_{ctM,k}} = \frac{1,58}{4,5} = 0,35$$

$F_e = 2,62$ (fator de erosão tabela)

Nº admissível de repetições à fadiga → ilimitado → consumo de fadiga = 0%

Nº admissível de repetições à erosão → 70.000.000 → consumo de erosão = 86,9%

e- Resultado da simulação com sub-base em SMC

$k=40$ MPa/m com Sub-base = 12cm e espessura da placa = 24 cm

$$\sigma_{eq} = 1,39 \text{ MPa} ; F_{ct,M,k} = 4,5 \text{ MPa} \rightarrow F_{Fad} = \frac{\sigma_{eq}}{F_{ctM,k}} = \frac{1,39}{4,5} = 0,31$$

$F_e = 2,60$ (fator de erosão tabela)

Nº admissível de repetições à fadiga → ilimitado → consumo de fadiga = 0%

Nº admissível de repetições à erosão → 100.000.000 → consumo de erosão = 60,8%

4.3 Dimensionamento Pavimento Rígido Estruturalmente Armado

Método do ABCP/IBTS – Cartas de Influência Pickett e Ray (1950)

a- Subleito com CBR=2% e correspondente $k=16$ MPa/m;

b- Foram simuladas duas possibilidades para o pavimento em PCEA, sendo uma com sub-base em BGTC e outra em SMC.

c- Dados do projeto:

hipótese	descrição						Carga máxima no eixo			pressão pneu MPa
	subleito	subbase					ES	ETD-tandem	ETT-tandem	
	CBR %	material	espessura cm	k MPa/m	PS adimensional	kr MPa/m	simples tf	duplo tf	triplo tf	
7	2,0%	BGTC	15	22	0	22	10	17	25,5	0,56
8	2,0%	SMC	20	69	1	27,5	10	17	25,5	0,56

Tabela 12 – Parâmetros para dimensionamento

Utilizando o Método de Meyerhof para carga móvel, verificou-se que os resultados são praticamente os mesmos. Também foi observado que as simulações com sub-base com 15cm de espessura de BGTC ou 20cm com SMC geraram a mesma espessura da placa de concreto e as mesmas seções de aço.

Resultado:

Armadura inferior no centro da placa: 1,94cm²/m

Armadura inferior borda longitudinal (lado acostamento sem concreto: 3,85cm²/m)

Armadura inferior borda longitudinal (junta central c/ barra transferência: 2,99cm²/m)

Armadura inferior junta transversal (junta c/ barra transferência: 2,31cm²/m)

Barras de transferência → fi 25mm cada 30cm

6. Conclusões

No estudo de um caso hipotético, envolvendo os três principais tipos de pavimento no dimensionamento e levantamento de custos comparativos, foi concluído com sucesso e atendendo o principal objetivo deste trabalho, que foi utilizar os conhecimentos expostos em pelo menos duas disciplinas do curso, além de consulta na bibliografia especializada. O pavimento rígido em concreto estruturalmente armado é pouco utilizado no Brasil e a situação hipotética adotada visou favorecer economicamente este tipo de pavimento, acreditando-se que para tráfegos intensos e com CBR de subleito baixo sua vantagem prevaleceria, fato confirmado conforme apresentado nos itens anteriores.

Conforme revisão bibliográfica apresentada, normalmente a vantagem dos pavimentos rígidos acontecem quando comparados a vida útil e somados os custos de manutenção e restauro. Neste caso hipotético o custo inicial dos pavimentos rígidos já foi melhor, destacando-se o pavimento rígido de concreto estruturalmente armado. Vale destacar que os pavimentos rígidos de concreto estruturalmente armados sem e com armadura superior contra variações térmicas e retração tiveram menor custo inicial, destacando a clara vantagem do pavimento com armadura superior quando se inclui o quesito manutenção, justificado por conter em torno de 17% do comprimento de juntas que o pavimento sem armadura superior contém.

Considerando a projeção do pavimento flexível em torno de 10 anos de vida útil e a projeção dos pavimentos rígidos em torno de 20 anos de vida útil, o custo por ano do pavimento rígido é de praticamente 40% do valor do pavimento flexível, para esta situação hipotética. Se acompanhar a simulação hipotética utilizada por Rodrigues Filho (2006) para mensurar o custo adicional de manutenção para manter a vida útil dos pavimentos num caso específico (custo adicional de 20% de manutenção e recuperação para o pavimento flexível e 1,4% de manutenção e recuperação para o pavimento rígido) resulta ao longo de 20 anos de uso de ambos os tipos de pavimento numa relação de custo onde o pavimento rígido representa 65% do custo do pavimento flexível. É importante mencionar que os 1,4% considerados refere-se a pavimentos rígidos sem armadura superior, que por conceito necessita de uma

quantidade de juntas muito maior, neste trabalho por exemplo, representou 5,5 vezes a mais. Portanto, o custo de manutenção poderá ser ainda menor.

Os pavimentos rígidos com a sub-base em solo melhorado com cimento mostraram-se vantajosos tanto na questão mecânica como na financeira, quando comparados às bases granulares tratadas com cimento ou não.

O reforço de subleito, necessário ao pavimento flexível, gerou muito consumo de serviço e material com consequência onerosa. Novas simulações poderão ser feitas em torno da divisão do reforço de subleito com parte em solo melhorado com cimento e parte com solo cimento, porém ainda assim representaria um custo maior em relação aos pavimentos rígidos, neste caso específico, em torno de 18,5%.

É importante salientar e ficar muito esclarecido que os resultados e conclusões deste trabalho não indicam uma tendência, mas somente resultados de uma situação específica com o objetivo de comprovar a necessidade de estudos de viabilidades em função da variação da qualidade do subleito e nível de tráfego, conforme já mencionado na citação de ZEMINIAN apud Rodrigues Filho (2006:24) onde foi apresentado a indicação do tipo de pavimento em função do número “N” de tráfego e do valor do “VMD”.