

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL. ESTUDO DE CASO: ESTRADA MUNICIPAL BOA ESPERANÇA EM CAMPINAS-SP

Comparative analysis between flexible pavement sizing methods. Case study: boa esperança municipal road in Campinas-SP

Análisis comparativo entre métodos de dimensión de pavimentos flexibles. Estudio de caso: carretera municipal boa esperança en Campinas-SP

PAIXÃO, R. R.¹; MARTINS, D. O.²; KAKUDA, F. M.³

Resumo

O presente estudo tem o objetivo de realizar análises comparativas entre três métodos de dimensionamento de pavimento flexível, mostrando propostas econômica e ambientalmente mais viáveis, para implantação do pavimento da Estrada Municipal Boa Esperança, localizada no município de Campinas-SP. Serão consideradas as Normas Técnicas vigentes para os diferentes tipos de dimensionamento, na seleção dos materiais que irão compor as camadas das estruturas propostas e, além disso, na avaliação do potencial de uso de materiais naturais, misturas in situ e misturas usinadas. Foram realizados levantamentos de sondagens, coletas de amostras de solo, ensaios laboratoriais, análise geotécnica e estatística dos resultados dos ensaios, determinação do número N previsto para a via, dimensionamento das estruturas dos pavimentos, análise mecanicista, estimativa de custos para cada uma das estruturas e comparativo.

Palavras-chave: Pavimentos flexíveis, Métodos de dimensionamento, Planejamento e gestão urbana.

¹ PAIXÃO, R. R. - Rodrigo Ramos Paixão: Engenheiro Especialista, Projepav Engenharia, rodrigo.ramos@projepav.com.br

² MARTINS, D. O. - Diego de Oliveira Martins: Professor Doutor da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4462-3675>, diegomartins@ufscar.br.

³ KAKUDA, F. M. - Francis Massashi Kakuda: Professor Doutor da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1443-5703>, francis@ufscar.br.

Data da Submissão:
24 de maio de 2024
Data da Aprovação:
24 de junho de 2024
Data da Publicação:
23 de julho de 2024

COMO CITAR:

Ramos Paixão, R. ., de Oliveira Martins, D., & Massashi Kakuda, F. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL. ESTUDO DE CASO: ESTRADA MUNICIPAL BOA ESPERANÇA EM CAMPINAS-SP. Engenharia Urbana Em Debate, v.5, n.1, 2024. Recuperado de <https://www.engurbdebate.ufscar.br/index.php/engurbdebate/article/view/123>. DOI: <https://doi.org/10.14244/engurbdebate.v5i1.123>



Abstract

The present study aims to carry out comparative analyzes between three flexible pavement sizing methods, showing more economically and environmentally viable proposals for implementing the pavement of Municipal Road Boa Esperança, located in the municipality of Campinas-SP. The current Technical Standards will be considered for the different types of design, in the selection of materials that will compose the layers of the proposed structures and, in addition, in the evaluation of the potential use of natural materials, in situ mixtures and machined mixtures. Surveys were carried out, soil samples were collected, laboratory tests, geotechnical and statistical analysis of test results, determination of the N number predicted for the road, dimensioning of pavement structures, mechanistic analysis, cost estimation for each of the structures and comparative.

Keywords: Flexible pavements, Dimensioning methods, Urban planning and management.

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo realizar análisis comparativos entre tres métodos de dimensionamiento de pavimentos flexibles, mostrando propuestas más viables económica y ambientalmente para la implementación del pavimento de la Carretera Municipal Boa Esperança, ubicada en el municipio de Campinas-SP. Se considerarán las Normas Técnicas vigentes para los diferentes tipos de diseño, en la selección de materiales que compondrán las capas de las estructuras propuestas y, además, en la evaluación del uso potencial de materiales naturales, mezclas in situ y mezclas maquinadas. Se realizaron levantamientos, toma de muestras de suelo, pruebas de laboratorio, análisis geotécnico y estadístico de resultados de pruebas, determinación del número de N previsto para la vía, dimensionamiento de estructuras de pavimento, análisis mecanísticos, estimación de costos para cada una de las estructuras y comparativos.

Palabras-clave: Pavimentos flexibles, Métodos de dimensionamiento, Planificación y gestión urbana.

1. Introdução

Pavimento é uma estrutura composta por camadas com espessuras finitas, implantado sobre um terreno de fundação, conhecido como subleito, e que deve ser capaz de dar suporte às cargas impostas pela ação do tráfego de veículos e às condições climáticas típicas da região. De forma geral, os pavimentos podem ser classificados como flexíveis, semirrígidos e rígidos, possuindo a finalidade de proporcionar aos seus usuários as melhores condições do ponto de vista da segurança, trafegabilidade, economia e conforto. Quanto aos tipos de revestimentos, basicamente, existem dois tipos básicos: rígidos, concreto-cimento ou flexíveis, pavimentos asfálticos (BERNUCCI et al, 2006). Por décadas, escolheu-se os materiais componentes das estruturas dos pavimentos, considerando, somente, informações oriundas de ensaios empíricos. Atualmente, tem se desenvolvido novos métodos laboratoriais, que proporcionam a revisão do entendimento do comportamento das estruturas de pavimento dimensionadas, cujo conceito é

conhecido como “Mecânica dos Pavimentos” (MOTTA, 2003). Levantamentos realizados pela Confederação Nacional de Transportes (CNT) (2019) demonstraram que do total de 108.863 km de Rodovias pesquisadas, 59,0% da malha rodoviária pavimentada apresenta algum tipo de problema, sendo considerada regular, ruim ou péssima. 41,0% da malha é considerada ótima ou boa e somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada, indicando a relevância deste estudo de caso, que visa falar sobre a necessidade de implantarmos vias estruturalmente duráveis e em boas condições de trafegabilidade aos seus usuários.

2. Localização e caracterização

A metodologia baseou-se em estudos para construção da Estrada Municipal Boa Esperança em Campinas-SP, junto à Rodovia Dom Pedro I (SP-

065), km 132, Pista Norte. Na Figura 1, temos a imagem de satélite com a localização da estrada.

Figura 1 - Localização da Estrada Municipal Boa Esperança



Fonte: Elaborado pelo autor, Google Earth Pro (2021).

As etapas de caracterização do estudo para a construção da estrada estão descritas na Figura 2.

Figura 2 – Caracterização e Fluxograma de atividades



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3. Metodologia

3.1. Sondagens a trado manual e ensaios geotécnicos

Para os estudos geotécnicos foram executados 06 (seis) furos de sondagens a trado manual, conforme a norma ABNT NBR 9603, localizados topograficamente no Sistema de Coordenadas

Universal Transversa de Mercator (UTM) e no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000), como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Localização das sondagens a trado ao longo do trecho em estudo

Furo	N (m)	E (m)	H (m)
ST-101	7.471.094,905	293.396,296	636,045
ST-102	7.470.937,187	293.693,969	664,305
ST-106	7.470.791,376	293.073,610	642,363
ST-108	7.470.648,685	293.608,481	659,019
ST-110	7.470.607,499	292.745,818	667,933
ST-113	7.470.419,507	293.541,992	648,017

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As coletas das amostras de solos na cota do futuro subleito foram submetidas aos seguintes ensaios: (i) Umidade natural (h) – ABNT NBR 6457; (ii) Limite de liquidez (LL) – ABNT NBR 6459; (iii) Limite de plasticidade (LP) – ABNT NBR 7180; (iv) Análise granulométrica – ANBT NBR 7181; (v) Índice de Suporte Califórnia (ISC), do inglês, California Bearing Ratio (CBR) – ABNT NBR 7182 e ABNT NBR 9895.

3.2. Estimativa de tráfego

Com base na classificação de vias da Instrução de Projeto IP-02 – SIURB/PMSP (2004), determinou-se o número N, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das vias, quanto ao tráfego e número N

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto (anos)	Volume inicial diário na faixa mais carregada		N
			Veículo leve	Caminhão / ônibus	
Via local residencial	Leve (L)	10	100 a 400	4 a 20	$1,0 \times 10^5$
Via coletora secundária	Médio (M)	10	401 a 1.500	21 a 100	$5,0 \times 10^5$
Via coletora principal	Meio Pesado (ME-P)	10	1.501 a 5.000	101 a 300	$2,0 \times 10^6$
Via arterial	Pesado (P)	12	5.001 a 10.000	301 a 1.000	$2,0 \times 10^7$
Via arterial principal/expressa	Muito Pesado (MP)	12	> 10.000	1.001 a 2.000	$5,0 \times 10^7$
Faixa exclusiva de ônibus	Médio	12	-	< 500	$1,0 \times 10^7$
Faixa exclusiva de ônibus	Pesado	12	-	> 500	$5,0 \times 10^7$

Fonte: IP-02 – SIURB/PMSP (2004).

3.3. Análise mecanicista

Os esforços solicitantes nas estruturas dos pavimentos foram determinados por meio do programa computacional ELSYM 5, programa criado na Universidade de Berkeley, nos Estados Unidos, com a função de realizar análise elástica linear em estruturas de pavimentos rodoviários flexíveis com até 5 camadas, incluindo o subleito,

considerando a aderência perfeita entre essas. Além da estrutura e da quantidade de camadas, considera as suas espessuras, módulo elástico/resiliência (E) e coeficientes de Poisson (ν). São consideradas 03 (três) posições, coordenadas X, Y, e a profundidade, coordenada Z.

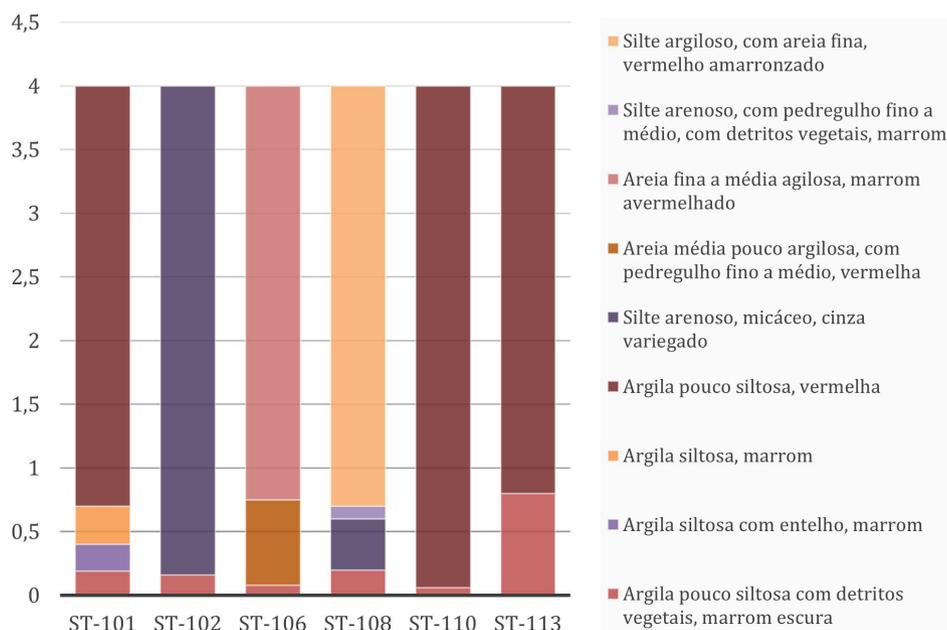
4. Resultado e análise de dados

4.1. Sondagens a trado manual e ensaios geotécnicos

A Figura 3 apresenta um resumo das sondagens a trado realizadas, com a caracterização tátil-visual do subsolo do terreno e os prováveis solos que irão compor o subleito. As sondagens a trado

permitem ainda a coleta de amostras deformadas de solo, a separação das camadas horizontais do terreno e a verificação da profundidade do lençol freático.

Figura 3 – Sondagens a Trado

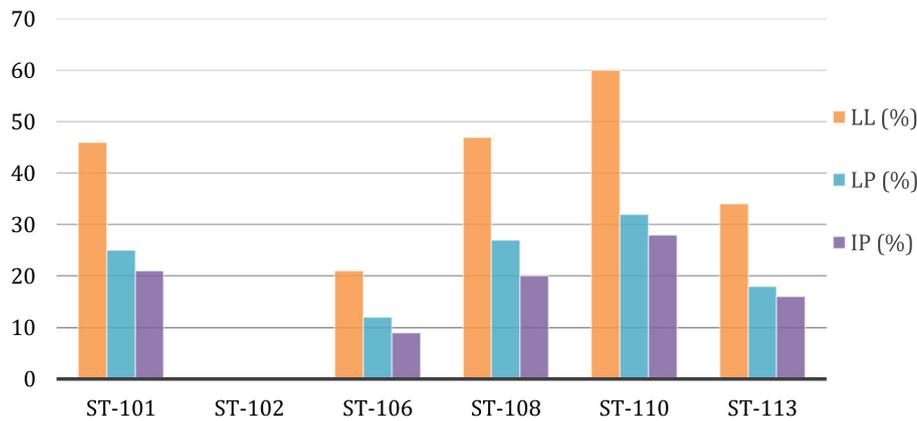


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O terreno é formado predominantemente por solos silto-argilosos, marrom avermelhado. As amostras foram ensaiadas de modo a se obter os principais parâmetros de desempenho do subleito para o dimensionamento dos pavimentos, no caso, os limites de Atterberg, análise granulométrica,

além do CBR e expansão. Os limites de Atterberg permitem conhecer a consistência do solo, ou seja, o estado físico que o solo se encontrará em função da presença de umidade incorporada e seu comportamento. Na Figura 4 temos um resumo gráfico dos ensaios de limites de Atterberg.

Figura 4 – Ensaio de Limites de Atterberg

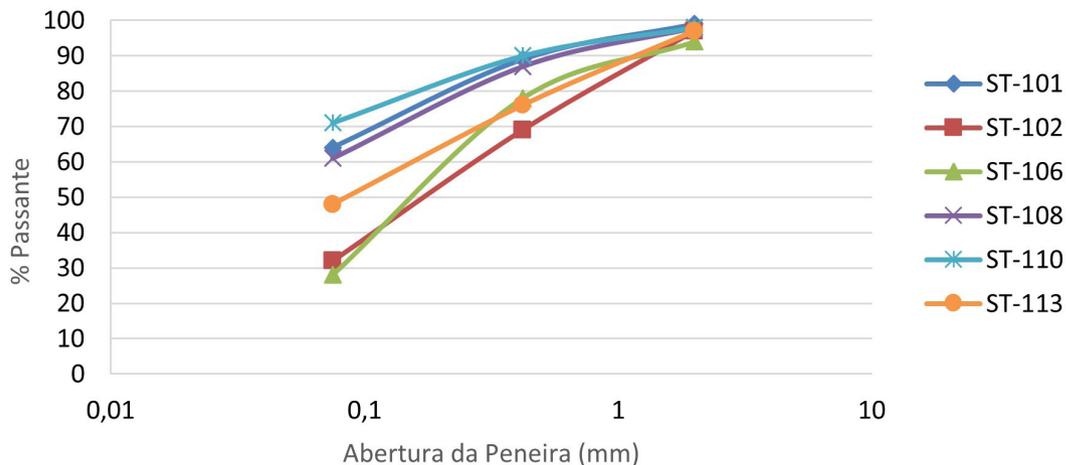


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A análise granulométrica do solo é realizada através do peneiramento em jogo sequencial de peneiras padronizadas e com malha de abertura sempre superior a adjacente, esse processo possibilita a pesagem do solo retido em cada peneira e cálculo

da porcentagem. Na sequência, é traçado a curva granulométrica e feita a classificação em função do diâmetro dos grãos. Na Figura 5 temos as curvas granulométricas das amostras ensaiadas.

Figura 5 – Ensaio de Análise Granulométrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os resultados indicam que os solos são heterogêneos, pois o LL variou de 21% a 60%, LP entre 12% e 32% e o Índice de Plasticidade de 9% a 28%. A granulometria dos solos apresenta variação significativa nas peneiras de (i) 0,42 mm (ponto no meio do gráfico, tanto vertical quanto horizontal), passando entre 89% e 69%; e (ii) na peneira de 0,075 mm (ponto mais baixo e a

esquerda no gráfico), passando entre 28% a 71%, quanto menor a porcentagem passante na peneira de 0,075 mm, menor a presença de silte e argila.

O CBR é realizado através da confecção de 5 (cinco) corpos de prova em teores de umidades diferentes, moldados na energia normal de compactação. Na sequência, os corpos de prova

são imersos em água por 4 (quatro) dias, medindo sua expansão. Após, é feita a ruptura dos corpos de prova através de penetração numa prensa, a uma velocidade constante conhecida, medida a resistência a penetração, esse valor é calculado em porcentagem, sendo o valor de 100% correspondente à penetração de uma amostra de material britado padrão. Os valores de CBR são fundamentais no dimensionamento e obtenção da espessura total do pavimento (DNIT, 2006). Os resultados se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo dos ensaios de umidade natural e CBR

Furo	Coleta (m)	h (%)	ISC (EN)			
			γ_s , máx (g/cm ³)	hót (%)	CBR (%)	Exp. (%)
ST-101	0,70 - 4,00	22,1	1,60	20,5	10	0,30
ST-102	0,16 - 4,00	6,2	1,67	13,8	8	2,00
ST-106	0,75 - 4,00	6,9	1,93	9,1	23	0,30
ST-108	0,30 - 3,60	19,0	1,60	19,5	4	2,30
ST-110	0,06 - 4,00	21,8	1,56	21,3	18	0,10
ST-113	0,80 - 4,00	9,9	1,82	13,0	9	0,70

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O ensaio de CBR e expansão do furo ST-108 foi desconsiderado, devido a elevada expansão, pois conforme o manual de pavimentação do DNIT, publicado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) nº 719 (2006, pág.142), a expansão deve ser inferior a 2%. Os demais valores de CBR ficaram entre 8% e 23%, com expansão de 0,10% a 2,00%.

4.2. Valores do CBR de projeto

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para o cálculo estatístico do CBR de projeto (CBRp) para os métodos de dimensionamentos estudados.

Tabela 4 – CBR de projeto (CBRp)

CBRp	n	(%)	$\sigma/s/S$ (%)	$t_{0,90}$	CBRp (%)
DER/SP	5	13,6	6,6	1,53	8,6
DNIT	5	13,6	6,6	-	5,3
SIURB/PMSP	5	13,6	6,6	1,53	9,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Apesar do valor estatístico indicar 5%, será adotado valor mínimo obtido nos ensaios, portanto, teremos um CBRp igual a 8 % para o método do DNIT.

4.3. Estimativa de tráfego

4.3.1. Análise do entorno e definição do tipo de tráfego

Para a estimativa do tráfego, foi realizada uma análise do entorno e definição do tipo de tráfego para a Estrada Municipal Boa Esperança que é rodeada de loteamentos, com potencial de expansão e implantação de outros novos, assim, a pavimentação deverá comportar grande tráfego de veículos de obra, como betoneiras e de materiais de construção diversos. Portanto, definiu-se que o tráfego mais adequado deve considerar vida útil de 12 anos e o tipo pesado, cujo número N é igual a $2,0 \times 10^7$, solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 80 kN.

4.4. Definição das camadas componentes do pavimento

4.4.1. Revestimento asfáltico

Dessa forma, faz-se necessário definir as camadas componentes do pavimento, assim como, para o revestimento asfáltico considerando o $N = 2,0 \times 10^7$ teremos o concreto asfáltico com 10 cm de espessura, visando reduzir o consumo de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), empregando-se uma camada de ligação, conhecida como ligação Binder. Portanto, teremos a divisão do concreto asfáltico em duas camadas de 5,0 cm.

4.4.2. Base do pavimento

Para compor a camada de base do pavimento será considerada a Brita Graduada Simples (BGS), obtida por processo de britagem. A espessura mínima será de 15,0 cm.

4.4.3. Sub-base do pavimento

Para a camada de sub-base, estudaremos a utilização de 3 (três) opções:

a) Opção Flexível 1 – Solo estabilizado com cal,

estudo com solo do subleito e adição de 2%, 3% e 4%, em peso. Admitiu-se que o menor teor que atenda um CBR $\geq 30\%$ e expansão $\leq 1,0\%$ como o adequado, no caso 2% de cal, conforme a Tabela 5. A espessura mínima será de 15,0 cm.

Tabela 5 – Dosagem de solo melhorado com cal

Mistura	Descrição	γ_s , máx (g/cm ³)	hót (%)	CBR (%)	Exp. (%)
1	Solo melhorado com 2% de cal calcítica	1,64	19,2	44	0,30
2	Solo melhorado com 3% de cal calcítica	1,63	19,6	73	0,10
3	Solo melhorado com 4% de cal calcítica	1,63	19,4	100	0,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

b) Opção Flexível 2 – Bica Corrida (BC):

Assim como a BGS, a BC, também é uma mistura obtida exclusivamente por processo de britagem. Considerou-se a espessura mínima com 15,0 cm no dimensionamento.

c) Opção Semirrígida – Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC):

O uso da BGTC será apenas para o método da SIURB/PMSP, visando evitar à fadiga nas camadas asfálticas para número $N \geq 107$ (SIURB/PMSP, 2004, Quadro 5.3, nota 1). Quando a BGTC é utilizada como sub-base, juntamente com uma base granular, dá-se o nome de “base invertida” (IP-05 – SIURB/PMSP, 2004, Quadro 5.3, nota 2). A posição invertida poderá mitigar a reflexão de trincas oriundas da BGTC. A espessura mínima é de 12,0 cm de acordo com a Tabela 1 da especificação técnica ET-DE-P00/009 do DER/SP (2005, pág. 5).

4.4.4. Reforço do subleito do pavimento

O Reforço do Subleito (RSL) será de solo selecionado com CBR maior que o obtido no

subleito, conforme item 4.2.3, subitem f do manual de pavimentação do DNIT (2006, p.106). A espessura mínima adotada será de 15,0 cm.

4.5. Dimensionamento inicial das estruturas de pavimento

4.5.1. CBR e tráfego adotado

Os tráfegos nas vias com o respectivo número N e os valores de CBR de projeto, definido anteriormente, são indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – CBR de projeto e número N nas vias

Método	CBR _p (%)	Tráfego – Número N
DER/SP	8	2,0 x 10 ⁷
DNIT	8	
SIURB/ PMSP	9	

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conseqüentemente, foram determinados os parâmetros para dimensionamentos dos métodos do DER/SP e do DNIT, os quais são, $N = 2,0 \times 10^7$; CBRSL = 8% e HSL = 51,0 cm; CBRREF = 10% e hREF = 45,0 cm; e CBRSB = 20% e hSB = 30,0 cm. Da mesma forma, foram determinados os parâmetros para dimensionamento do método SIURB/PMSP, os quais são $N = 2,0 \times 10^7$; CBRSL = 9% e HSL = 51,0 cm; CBRREF = 10% e hREF = 45,0 cm; e CBRSB = 20% e hSB = 30,0 cm.

4.6. Verificação mecanicista das estruturas dimensionadas

4.6.1. Parâmetros adicionais para a verificação mecanicista

A verificação mecanicista das estruturas de pavimento dimensionadas será realizada comparando-se os esforços solicitantes com os esforços atuantes, para o carregamento de um Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD), com base na IP-DE-P00/001 do DER/SP (2006) e na IP-08 da SIURB/PMSP (2004). A análise das estruturas dimensionadas será realizada comparando-se os esforços solicitantes com os esforços atuantes, para o carregamento de um Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD), com base na IP-DE-P00/001 do DER/SP (2006) e na IP-08 da SIURB/PMSP (2004).

Para a determinação dos esforços solicitantes nos pavimentos obtidos no dimensionamento inicial foram utilizados os valores de Módulo de

Resiliência (MR) e coeficientes de Poisson para o DER/SP e DNIT estão especificados na Tabela 7.

Tabela 7 – Módulos de resiliência e coeficientes de Poisson adotados (DER/SP e DNIT)

Camada	Material	MR (Mpa)	Poisson
Revestimento	Concreto Asfáltico Usinado a Quente	3.500	0,30
Ligação Binder	Concreto Asfáltico Usinado a Quente	2.500	0,30
Base	Brita Graduada	400	0,35
Sub-base	Solo melhorado com cal, CBR = 30%	200	0,40
	Bica Corrida, CBR = 30%	150	0,40
Reforço do subleito	Solo selecionado, CBR = 10%	100	0,40
Subleito	Solo existente, CBR = 8 %	75	0,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Já a Tabela 8 especifica os valores de MR e coeficientes de Poisson para o SIURB/PMSP.

Tabela 8 – Módulos de resiliência e coeficientes de Poisson adotados (SIURB/PMSP)

Camada	Material	MR (MPa)	Poisson
Revestimento	Concreto asfáltico convencional	3.500	0,30
Ligação Binder	Concreto asfáltico convencional	1.600	0,30
Base	Brita Graduada	400	0,40
Sub-base	Brita Graduada Tratada com Cimento	7.000	0,20
	Bica Corrida, CBR = 30%	158,9	0,40
Reforço do subleito	Solo selecionado, CBR = 10%	155,5	0,45
Subleito	Solo existente, CBR = 9%	68,1	0,45

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na sequência, temos a aferição das estruturas iniciais, considerando o parâmetro DO (0,01mm), através dos esforços solicitantes obtidos com a utilização do programa computacional ELSYM 5 frente aos valores obtidos com as equações dos modelos de ruptura por fadiga para as camadas

asfálticas, cimentada e do subleito dos métodos estudados (BALBO, 2007). Primeiramente, são apresentados os resultados obtidos pelo Método da DER/SP. Na Tabela 9 pode ser vista a verificação mecanicista inicial com Sub-base Solo Cal.

Tabela 9 – Verificação mecanicista inicial com Sub-base Solo Cal (DER/SP)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis		Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado	N	
DER-1	Asfáltica	Do	14,4	0	0,01	54	$3,38 \times 10^7$	59	$2,0 \times 10^7$	NÃO ATENDE
	Subleito	et	14,4	0	9,99	$2,022 \times 10^{-4}$	$4,43 \times 10^7$	$2,652 \times 10^{-4}$		
		ev	14,4	0	55,01	$3,516 \times 10^{-4}$	$1,70 \times 10^7$	$3,400 \times 10^{-4}$		

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 10 – Verificação mecanicista inicial com Sub-base Bica Corrida (DER/SP)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis		Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado	N	
DER-1	Asfáltica	D _o	14,4	0	0,01	55	3,07 x 10 ⁷	59	2,0 x 10 ⁷	NÃO ATENDE
	Subleito	ε _t	14,4	0	9,99	2,084 x 10 ⁻⁴	4,05 x 10 ⁷	2,652 x 10 ⁻⁴		
		ε _v	14,4	0	55,01	3,603 x 10 ⁻⁴	1,51 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴		

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observamos que o valor da deformação vertical no topo subleito é superior ao admissível nas duas estruturas acima, indicando um número N inferior ao proposto. Considerando 18,0 cm de espessura no RSL, obteve-se resultados satisfatórios com a

verificação mecanicista complementar com a Sub-base Solo Cal pelo DER/SP, conforme as Tabela 11.

Tabela 11 – Verificação mecanicista complementar com Sub-base Solo Cal (DER/SP)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis		Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado	N	
DER-1	Subleito	ε _v	14,4	0,0	58,01	3,278 x 10 ⁻⁴	2,38 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴	2,00 x 10 ⁷	ATENDE

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Tabela 12 mostra-se a verificação mecanicista complementar com a Sub-base Bica Corrida.

Tabela 12 – Verificação mecanicista complementar com Sub-base Bica Corrida (DER/SP)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis		Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado	N	
DER-2	Subleito	ε _v	14,4	0,0	55,01	3,363 x 10 ⁻⁴	2,10 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴	2,00 x 10 ⁷	ATENDE

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em seguida, considera-se os resultados obtidos pelo Método do DNIT. A Tabela 13 apresenta a

verificação mecanicista inicial com Sub-base Solo Cal.

Tabela 13 – Verificação mecanicista inicial com Sub-base Solo Cal (DNIT)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis		Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado	N	
DNIT-1	Asfáltica	D _o	14,4	0	0,01	54	3,38 x 10 ⁷	59	2,0 x 10 ⁷	NÃO ATENDE
		ε _t	14,4	0	9,99	2,022 x 10 ⁻⁴	4,43 x 10 ⁷	2,652 x 10 ⁻⁴		
	Subleito	ε _v	14,4	0	55,01	3,516 x 10 ⁻⁴	1,70 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴		

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Já a Tabela 14 apresenta verificação mecanicista inicial com a Sub-base Bica Corrida.

Tabela 14 – Verificação mecanicista inicial com Sub-base Bica Corrida (DNIT)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis	N	Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado		
DNIT-1	Asfáltica	D _o	14,4	0	0,01	55	3,07 x 10 ⁷	59	2,0 x 10 ⁷	NÃO ATENDE
		ε _t	14,4	0	9,99	2,084 x 10 ⁻⁴	4,05 x 10 ⁷	2,652 x 10 ⁻⁴		
	Subleito	ε _v	14,4	0	55,01	3,603 x 10 ⁻⁴	1,51 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴		

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Tabela 15 mostra a verificação mecanicista complementar com a Sub-base Bica Corrida.

Tabela 15 – Verificação mecanicista complementar com Sub-base Solo Cal (DNIT)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis	N	Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado		
DNIT-1	Subleito	ε _v	14,4	0	58,01	3,278 x 10 ⁻⁴	2,38 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴	2,00 x 10 ⁷	ATENDE

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Tabela 16 se apresenta a verificação mecanicista complementar

Tabela 16 – Verificação mecanicista complementar com Sub-base Bica Corrida (DNIT)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis	N	Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado		
DNIT-1	Subleito	ε _v	14,4	0	58,01	3,278 x 10 ⁻⁴	2,38 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴	2,00 x 10 ⁷	ATENDE

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, são apresentados os resultados obtidos pelo Método da SIURB/PMSP. A Tabela 17 mostra a verificação mecanicista inicial com Sub-base Bica Corrida.

Tabela 17 – Verificação mecanicista inicial com Sub-base Bica Corrida (SIURB/PMSP)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis	N	Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado		
SIURB/PMSP-1	Asfáltica	D _o	14,4	0	0,01	58	2,31 x 10 ⁷	59	2,0 x 10 ⁷	NÃO ATENDE
		ε _t	14,4	0	9,99	2,201 x 10 ⁻⁴	3,45 x 10 ⁷	2,652 x 10 ⁻⁴		
	Subleito	ε _v	14,4	0	55,01	3,635 x 10 ⁻⁴	1,45 x 10 ⁷	3,400 x 10 ⁻⁴		

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Tabela 17 também aponta o valor da deformação vertical no topo subleito fora do aceitável, novamente, corrigido ao se adotar 18,0 cm de RSL, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Verificação mecanicista complementar com Sub-base Bica Corrida (SIURB/PMSP)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis	N	Análise
			Camada	y	z	ELSYM 5	N	Calculado		
SIURB/PMSP-1	Subleito	ϵ_v	14,4	0	58,01	$3,388 \times 10^{-4}$	$2,03 \times 10^7$	$3,400 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^7$	ATENDE

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao considerar um número N igual a $2,0 \times 10^7$: (i) Relação da tração atuante pela de ruptura - $RT = 0,783$; e (ii) Tração de Ruptura BGTC - $\sigma_{RUPT} = 1,0 \text{ MPa} = 10,0 \text{ kgf/cm}^2$. A Tabela 19 apresenta a verificação mecanicista inicial com Sub-base BGTC pelo Método SIURB/PMSP.

Tabela 19 – Verificação mecanicista inicial com Sub-base BGTC (SIURB/PMSP)

Pavimento	Camada	Parâmetro	Posição (cm)			Esforços solicitantes		Valores admissíveis	N	Análise
			x	y	z	ELSYM 5	N	Calculado		
SIURB/PMSP-2	Asfáltica	D_o	14,4	0	0,01	45	$8,93 \times 10^7$	59	$2,0 \times 10^7$	ATENDE
		ϵ_t	14,4	0	9,99	$1,899 \times 10^{-4}$	$5,32 \times 10^7$	$2,652 \times 10^{-4}$		
	BGTC	RT	14,4	0	37,99	0,577	$1,70 \times 10^{15}$	0,783		
	Subleito	ϵ_v	14,4	0	38,01	$1,928 \times 10^{-4}$	$2,97 \times 10^8$	$3,40 \times 10^{-4}$		

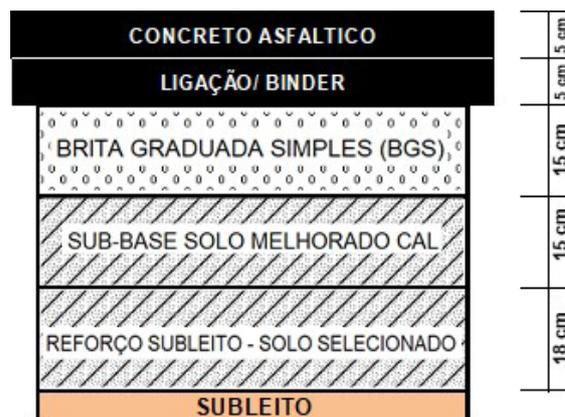
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A estrutura com base-invertida atendeu os parâmetros sem necessidade de aumento das espessuras, inclusive, quando se comparam as duas colunas “Número N” da Tabela 19, nota-se que, os esforços solicitantes para as deformações e/ou rupturas nas camadas analisadas através do ELSYM 5 apresentam desempenho muito superior ao exigido.

4.7. Estruturas finais dos pavimentos

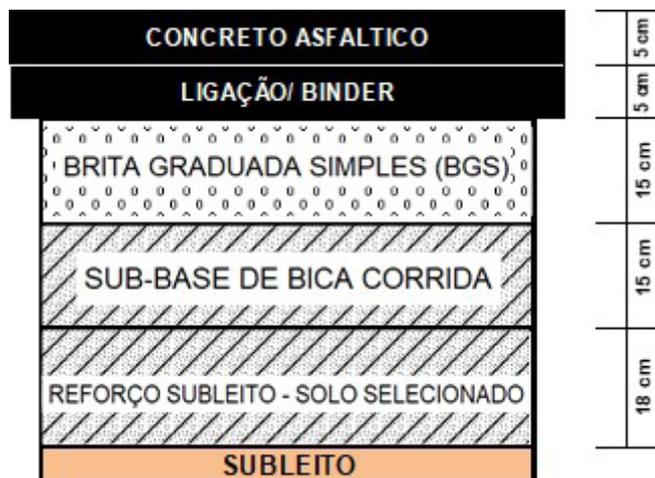
A estruturas finais para os tipos de sub-base propostas são descritas e ilustradas, sendo: (i) A Figura 6 apresenta o Pavimento-tipo elaborado pelos Métodos DER/SP e DNIT – Opção 1 em Sub-base com Solo Cal; (ii) A Figura 7 apresenta o Pavimento-tipo elaborado pelos Métodos DER/SP, DNIT e SIURB/PMSP – Opção 2 em Sub-base com Bica Corrida (BC); e (iii) A Figura 8 apresenta o Pavimento-tipo elaborado pelos Método SIURB/PMSP – Opção 3 em Base-invertida com o BGTC na sub-base e a base em BGS.

Figura 6: Pavimento-tipo DER/SP e DNIT – Opção 1 em Sub-base com Solo Cal



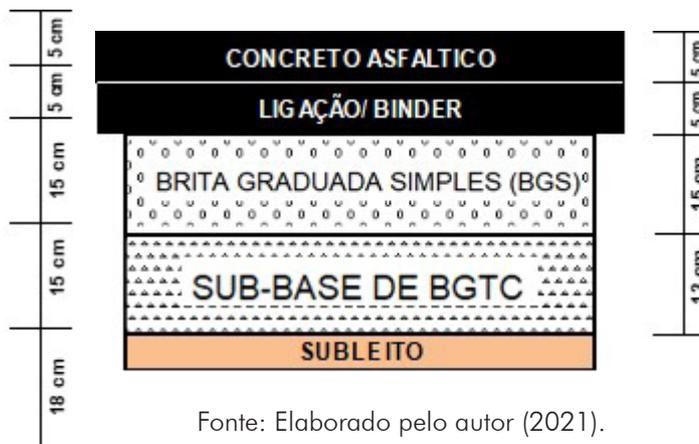
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 7: Pavimento-tipo DER/SP; DNIT e SIURB/PMSP – Opção 2 em Sub-base com BC



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 8: Pavimento-tipo SIURB/ PMSP – Opção 3 em Sub-base com BGTC



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.8. Comparativo de quantidades e custos

Por fim, na Tabela 20 se apresentam os cálculos para os serviços de pavimentação por m², com base nos itens das Tabelas de Preços Unitários Não Desonerados do SIURB/PMSP e do DER/SP com datas de referência de 07/2020 e de 12/2020 respectivamente.

Tabela 20 – Memória de cálculo de pavimentação por m²

Referência	Código	Item	Descrição	Unidade	Custo Unitário (R\$)	Memor. por m ²	Custo R\$/m ²		
							Opção 1	Opção 2	Opção 3
		1	Limpeza						
DER/SP	22.01.06	1.1.	Raspagem do terreno	m ²	0,58	1	0,58	0,58	0,58
		2	Abertura de caixa para pavimentação (*)						
SIURB/PMSP	05/10/00	2.1	Abertura de caixa até 40 cm, inclui escavação, compactação, transporte e preparo do subleito	m ²	16,37	1	16,37	16,37	16,37
SIURB/PMSP	05/11/00	2.2	Abertura de caixa até 25 cm, inclui escavação, compactação, transporte e preparo do subleito	m ²	12,68	1	12,68	12,68	-
		3	Subleito						

DER/SP	23.02.01	3.1	Melhoria/ Preparo do Subleito - 100% E.N.	m ²	2,02	1	2,02	2,02	2,02	
		4	Reforço do subleito							
DER/SP	23.03.01	4.1	Reforço do subleito escav. solo escolhido	m ³	7,4	1 x 0,18	1,33	1,33	-	
DER/SP	23.03.03	4.2	Reforço do subleito compact. 100% E.N.	m ³	5,58	1 x 0,18	1	1	-	
		5	Sub-base							
SIURB/ PMSP	05-50-00	5.1	Sub-base de solo melhorado com aditivo químico - 2%	m ³	50,38	1 x 0,15	7,56	-	-	
DER/SP	23.04.03.03	5.2	Sub-base de bica corrida	m ³	165,29	1 x 0,15	-	24,79	-	
DER/SP	23.04.04.02	5.3	Sub-base de brita graduada com 2% de cimento em volume	m ³	214,37	1 x 0,13	-	-	27,87	
		6	Base							
DER/SP	23.04.03.01	6.1	Base de Brita Graduada Simples (BGS)	m ³	197,54	1 x 0,15	29,63	29,63	29,63	
		7	Concreto asfáltico e imprimações							
DER/SP	23.05.01	7.1	Imprimadura betuminosa impermeabilizante	m ²	9	1	9	9	9	
DER/SP	23.05.02	7.2	Imprimadura betuminosa ligante	m ²	3,17	1	3,17	3,17	3,17	
DER/SP	23.08.02	7.3	Concreto asfáltico usinado a quente- Binder graduação B com dope	m ³	1099,81	1 x 0,05	54,99	54,99	54,99	
DER/SP	23.05.02	7.4	Imprimadura betuminosa ligante	m ²	3,17	1	3,17	3,17	3,17	
DER/SP	23.08.03.03	7.5	Camada de rolamento - CBUQ graduação C com dope	m ³	1187,13	1 x 0,05	59,36	59,36	59,36	
Total (R\$/m ²)								200,86	218,1	206,16
(*) Soma das alturas de caixa em função da espessura total do pavimento										

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5. Conclusões

A opção com solo melhorado com 2% de cal resultou na estrutura mais viável economicamente e, provavelmente, terá o menor impacto ambiental, pois utilizado o próprio solo local, o que reduzirá: (i) circulação de veículos a combustão, que alteram a qualidade do ar por lançamento de materiais poluentes na atmosfera, (ii) emissão de ruídos pela menor frequência de operação desses

veículos e (iii) volume de material removido para bota-fora. Já, a opção em Bica Corrida é a menos viável, pois apresentou o custo mais elevado. A opção com BGTC tem a menor estrutura e, conseqüentemente, será executada em menor tempo, podendo ser considerada o melhor custo-benefício, pois concilia o segundo menor preço/m² e o melhor desempenho estrutural, suportando

mais de 5,0 x 10⁷ solicitações equivalentes de ESRD, compatível com tráfego muito pesado e passagem de 1.001 a 2.000 caminhões/ônibus por dia.

6. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9603: Sondagem a trado – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457: Amostra de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: Materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Ja-

neiro: ABEDA, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa: 10 fatos revelados pela Pesquisa CNT de rodovias 2019 no Brasil. Brasília: CNT, 2019.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. IP-DE-P00/001 A: Projeto de Pavimentação. Instrução de Projeto. São Paulo: DER/SP, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. ET-DE-P00/009 A: Sub-base ou base de Brita Graduada Tratada com Cimento. Especificação Técnica. São Paulo: DER/SP, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Tabela de preços unitários desonerados. São Paulo: DER/SP, 2020. Disponível em: <http://200.144.30.103/tpu-internet/>. Acesso em: 19 jan. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Publicação IPR-719: Manual de Pavimentação. 3^a ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

MOTTA, L. M. G. Noções de Mecânica dos Pavimentos. Laboratório de Geotecnia - Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS DA PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. IP-02: Classificação de Vias: Instrução de Projetos. São Paulo: SIURB/PMS, 2004.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS DA PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. IP-05: Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Meio Pesado, Pesado, Muito Pesado e Faixa

Exclusiva de Ônibus: Instrução de Projetos. São Paulo: SIURB/PMSP, 2004.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS DA PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. IP-08: Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento: Instrução de Projetos. São Paulo: SIURB/PMSP, 2004.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS DA PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. Tabelas de Custos Data-Base Julho de 2020. São Paulo: SIURB/PMSP, 2020. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas_de_custos/index.php?p=345823. Acesso em: 14 ago. 2020.