



**DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO DISTRITO FEDERAL
SUPERINTENDÊNCIA TÉCNICA – SUTEC
DIRETORIA DE TECNOLOGIA – DITEC
GERÊNCIA DE GEOTECNIA – GETEC
GERÊNCIA DE PAVIMENTO – GEPAV**

**Projeto de Pavimentação da Rua São Bartolomeu
(Núcleo Rural Capão Comprido – São Sebastião – DF)**

**Brasília
Outubro de 2019**

Sumário

1.0	Objetivo	4
2.0	Introdução	4
3.0	Atividades desenvolvidas	4
3.1	Estudos Preliminares	5
3.1.1	Levantamento Histórico da Região Onde Está Inserida a Rodovia	5
3.2	Levantamentos de campo	5
3.2.1	Caracterização do Tráfego	5
3.2.2	Estudo do Subleito	7
3.2.3	Estudo de Ocorrências (Caixas de Empréstimos)	8
3.2.4	Definição do Índice de Suporte do Subleito (Método DNER)	8
4.0	Dimensionamento do Pavimento Pelo Método Murilo Lopes de Souza	10
4.1	Coefficiente de Equivalência Estrutural e Espessuras das Camadas	11
4.2	Determinação das Espessuras das Camadas	13
4.3	Definição das Espessuras	15
4.3.1	Espessura Total do Pavimento (Hm)	15
4.3.2	Espessura Necessária de Pavimento acima do Reforço do Subleito ou Seja, Sub-base, Base e Revestimento	15
4.3.3	Espessura Necessária de Pavimento acima da Sub-base, ou Seja, Base e Revestimento	15
4.3.4	Espessura do Revestimento	16
4.3.5	Espessuras das Camadas que Compõem o Pavimento Utilizando o Sistema de Inequações	16
4.3.5.1	Espessura da Camada de Base	16
4.3.5.2	Espessura da Camada de Sub-Base ($k=0,981$)	16
4.3.5.3	Espessura da Camada de Reforço do Subleito ($K= 0,725$)	16
5.0	Verificação Mecanicista – Empírica	16
5.1	Parâmetros de Resistência dos Materiais	20
6.0	Resultados da Análise Mecanística	23
6.1.0	Solução de Dimensionamento 01 – Base em BGS	24
6.1.1	Solução de Dimensionamento 02 – Base em Cascalho	27
6.1.2	Solução de Dimensionamento 03 – Base em Cascalho com 2% de Cimento (Solo Cimento Com Baixo Teor de Cimento)	30
7.0	Serviços De Terraplenagem	32
7.1	Caixas de Empréstimo	32
7.2	Cortes	33
7.3	Aterro	33
7.4	Sub-Base	33
7.5	Base em Material Granular (Cascalho/BGS)	33

7.6	Serviços De Pavimentação	34
7.7	Imprimação	34
7.8	Revestimento (CAUQ)	34
8.0	Considerações Finais	35

ANEXOS

A – Estudos de Caixas de Empréstimo (Jazida DF-465)

1.0 Objetivo

O presente relatório tem como objetivo indicar os parâmetros a serem utilizados na pavimentação asfáltica da Rua São Bartolomeu, no trecho compreendido entre a rua 22 e Escola Classe São Bartolomeu situada no Núcleo Rural Capão Comprido (São Sebastião – DF), tendo sido motivado por meio do despacho Nº 26550238. - Processo SEI 00144-00001108/2019-30.

2.0 Introdução

A característica do trecho, as condições para elaboração do Projeto, as metodologias utilizadas na execução dos estudos e projetos e as Normas utilizadas para elaboração deste projeto de implantação foram:

- NORMA DNIT 172/2016 – ME – Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas;
- DNIT-ME 164/13 – Compactação Utilizando Amostras não Trabalhadas;
- IPR – 719/2006 – Manual de Pavimentação;
- IPR – 742/2010 – Manual de Implantação Básica de Rodovia;
- IP – DE-P00/001 Instrução de Projeto de Pavimentos do DER-SP;
- IP – 02/2004 Classificação das Vias PMSP,
- IP – 04/2004 Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis para Tráfego Leve e Médio PMSP;
- Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis Pelo Método DNER 1976/1981;
- IP – 08/2004 – Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento (SP);

3.0 Atividades Desenvolvidas

As atividades foram divididas de acordo com os seguintes estudos preliminares e de campo:

- a) Levantamento Histórico da Região onde está inserida esta Via de Acesso Local;
- b) Levantamentos de Campo:
 - Caracterização do Tráfego
 - Estudo do Subleito;
 - Estudo de Ocorrências (Caixas de Empréstimos).
- c) Análise dos Dados Coletados

d) Solução Adotada.

3.1 Estudos Preliminares

3.1.1 Levantamento Histórico da Região

A região onde está inserida a Rua São Bartolomeu é considerada uma Zona Urbana de Uso Controlado II.

Essa zona reúne áreas de significativa sensibilidade ambiental, que exigem ocupação e uso urbano disciplinado no sentido de proteger os atributos naturais, especialmente os solos e os recursos hídricos, superficiais e subterrâneos.

A Zona Urbana de Uso Controlado II, no ordenamento territorial, visa compatibilizar o uso urbano com a conservação dos recursos naturais, promover a recuperação ambiental e a proteção dos recursos hídricos. Tal objetivo se traduz em diretrizes específicas de planejamento territorial, tais como:

- Reforçar o uso habitacional de baixa e média densidade populacional;
- Proteger os atributos naturais;
- Estabelecer medidas de controle ambiental para proteção das unidades de conservação, e, especialmente, do entorno das unidades de proteção integral;
- Regularizar os assentamentos informais com recuperação de danos ambientais causados pelo processo de urbanização;
- Planejar a infraestrutura de saneamento ambiental previamente à ocupação urbana, respeitando a capacidade de suporte dos corpos hídricos receptores dos efluentes.

3.2 Levantamentos de Campo

3.2.1 Caracterização do Tráfego

O trecho apresentado, desta via de acesso à Escola Classe São Bartolomeu situada Núcleo Capão Comprido, possui características de tráfego local que se enquadra em volume de **tráfego médio bidirecional** com $700 \leq VDM \leq 1400$. Rodovia Classe II de pista simples, projetada para o 10º ano, para um limite inferior de tráfego médio diário bidirecional de 700 veículos mistos e para um limite superior de tráfego médio diário bidirecional de 1400 veículos mistos, conforme Manual de Implantação Básica de Rodovia (Publicação – IPR/DNIT 742).

A Instrução de Projeto IP – 02/2004 Classificação das Vias PMSP – orienta para que as vias urbanas a serem pavimentadas serão classificadas, para fins de dimensionamento de pavimento, de acordo com tráfego previsto para as mesmas, nos seguintes tipos:

Quadro 01 – Resumo dos Principais Parâmetros Para classificação das Vias Urbanas – PMSP.

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto	Volume inicial faixa mais carregada		Equivalente / Veículo	N	N característico
			Veículo Leve	Caminhão/Ônibus			
Via local	LEVE	10	100 a 400	4 a 20	1,50	$2,70 \times 10^4$ a $1,40 \times 10^5$	10^5
Via Local e Coletora	MÉDIO	10	401 a 1500	21 a 100	1,50	$1,40 \times 10^5$ a $6,80 \times 10^5$	5×10^5
Vias Coletoras e Estruturais	MEIO PESADO	10	1501 a 5000	101 a 300	2,30	$1,4 \times 10^6$ a $3,1 \times 10^6$	2×10^6
	PESADO	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,90	$1,0 \times 10^7$ a $3,3 \times 10^7$	2×10^7
	MUITO PESADO	12	> 10000	1001 a 2000	5,90	$3,3 \times 10^7$ a $6,7 \times 10^7$	5×10^7
Faixa Exclusiva de Ônibus	VOLUME MÉDIO	12		< 500		$3 \times 10^{6(1)}$	10^7
	VOLUME PESADO	12		> 500		5×10^7	5×10^7

Para efeito de dimensionamento da estrutura do pavimento, o volume de tráfego foi caracterizado conforme indicado no quadro 01 da Instrução de Projeto IP – 02/2004 Classificação das Vias PMSP ou seja:

Via local e coletora Tráfego Médio: “N” característico = 5×10^5 de solicitações com um fator de equivalência de veículos de 1,5, considerando o trânsito somente de caminhão categoria 2C e Ônibus (Vias Urbanas Típicas – IP – 02/2004 Classificação Das Vias), chegou-se ao seguinte número N para o ano de 2019:

$N_{USACE} = 3,91 \times 10^5$ de Solicitações;

$N_{AASHTO} = 2,98 \times 10^5$ de Solicitações.

A experiência mostra que o tráfego costuma crescer a taxas de crescimento anuais de variação relativamente lenta. Ultimamente tem sido comum adotar, à falta de informações de variáveis socioeconômicas, uma taxa de crescimento anual de 3%, próxima da taxa de crescimento

econômico do país como um todo, o que resulta em uma função exponencial – MANUAL DE ESTUDOS DE TRÁFEGO – Publicação IPR – 723/2006.

Somente devem ser adotadas taxas de crescimento acima de 3% em casos de fronteiras agrícolas comprovadas pelos estudos econômicos.

Aplicando a taxa de crescimento anual geométrico de 3,00%, chegou-se ao seguinte número N acumulado ao final de 10 anos (2029):

$N_{USACE} = 4,61 \times 10^6$ de Solicitações;

$N_{AASHTO} = 3,52 \times 10^6$ de Solicitações.

Vale ressaltar que os volumes de tráfego que delimitam algumas das Classes de Projeto são apenas indicativos de ordem de grandeza, não se justificando precisões absolutas, especialmente tratando-se de projeções de tráfego.

3.2.2 Estudo do Subleito (Sondagens)

Objetivando a determinação da resistência do material constituinte da camada de subleito, realizaram-se estudos de campo e de laboratório, onde foi possível obter as características físicas e mecânicas do material em duas situações distintas: nas condições reais que prevalecem no campo (In situ) e nas condições ideais de trabalho (em laboratório).

Nesta etapa dos Estudos Geotécnicos foram realizadas prospecções do subleito em 16 (dezesesseis) pontos, de acordo com o Manual de Pavimentação (Publ. DNIT – IPR 719).

Os boletins de sondagem, nos quais constam os locais de prospecção (estacas), posição em relação ao eixo, profundidades sondadas e classificação expedita dos materiais das camadas encontra-se no despacho (28919223) – Relatório Técnico Estudo do Subleito. Processo SEI 00144-00001108/2019-30.

Os ensaios realizados para camada de Subleito estão descritos na sequência:

- a) Determinação da Umidade Higroscópica de acordo com o método de ensaio DNER-ME 088/94;
- b) Ensaios de Caracterização (Granulometria por Peneiramento, Limite de Liquidez e Plasticidade) pelos métodos DNER-ME 083/98, 122/94 e 082/94 respectivamente;
- c) Compactação, de acordo com o método de ensaio DNER-ME 164/13, sendo 5 (cinco) pontos com energia do Proctor Normal para Subleito.

- d) Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão, de acordo com a metodologia de ensaio DNER-ME 172/16, com energia do Proctor Normal para Subleito.

O quadro a seguir apresenta os valores limites e algumas recomendações relativas às principais características geotécnicas dos materiais a serem utilizados no pavimento.

Tabela 01 – Principais Características Geotécnicas

CAMADA	ISC	EXPANSÃO	IG	LL	IP	FAIXA GRAN.
BASE	> 60% (1)	< 0,5%	-	≤ 25% OU	≤ 6,0% OU	A, B, C OU D (2)
	> 80% (2)			EA > 30%	EA > 30%	E OU F (1)
SUB-BASE	> 20%	≤ 1,0%	p	-	-	-
SUBLEITO	ISC _{SL}	< 1,0%	≤ IG _{SL}	-	-	-
OBSERVAÇÕES						
(1) Para N < 5x10 ⁶						
(2) Para N > 5x10 ⁶						
Subleito: ISC > 2% e Expansão < 2%						
Os materiais deverão ser objeto de especificações particulares						

3.2.3 Estudo de Ocorrências (Caixas de Empréstimos).

Foram verificadas as possibilidades de aproveitamento de uma área de empréstimo localizada no Complexo Penitenciário da Papuda, próximo à DF-465, baseado nos resultados dos ensaios laboratoriais realizados nas amostras de solos, bem como da viabilidade de exploração da área. Dentro dos limites da ocorrência selecionada, foram executados furos de sondagens, coletando amostras suficientes para a realização de todos os ensaios geotécnicos de caracterização, para serem usadas como camada de base e camada de sub-base.

3.2.4 Definição do Índice de Suporte do Subleito (Método DNER).

Para a avaliação da capacidade de suporte do subleito e dos materiais que irão compor as camadas do pavimento é utilizado o ensaio *CBR* em amostras deformadas ou moldadas em laboratório, nas condições de serviço e submetidas à imersão em tanque apropriado por quatro dias.

A fim de uma maior segurança, a norma recomenda utilizar o Índice de Suporte (*IS*), que é um *CBR* corrigido em função do Índice de Grupo (*IG*), conforme expressão a seguir:

$$IS = \frac{IS_{CBR} + IS_{IG}}{2} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

IS_{CBR} = índice de suporte numericamente igual ao Índice de Suporte Califórnia (CBR – obtido em ensaio e dado em %)

IS_{IG} = índice de suporte derivado do índice de grupo, correspondendo, praticamente, a uma inversão de escala, fazendo com que solos de boa qualidade tenham os maiores valores de IS_{IG} .

Impõe-se a condição de que o Índice de Suporte seja, no máximo, igual ao CBR , ou seja, quando o cálculo do IS resultar num índice maior que o CBR , adota-se o valor do CBR , como Índice de Suporte, ou seja:

$$IS \leq CBR$$

Tabela 02 – Valores de IS em Função do Índice de Grupo.

Valores do CBR_{IG} em função do IG.	
Índice de grupo (I.G.)	Índice de suporte (C.B.R. _{IG})
0	20
1	18
2	15
3	13
4	12
5	10
6	9
7	8
8	7
9 a 10	6
11 a 12	5
13 a 14	4
15 a 17	3
18 a 20	2

Diante do que o método impõe e com intuito de um melhor suporte ao pavimento, foram feitas análises estatísticas, dos resultados das sondagens feitas no subleito da via em questão, chegando-se aos seguintes valores de Índice de Suporte do subleito:

Planilha 01 – Índice de Suporte do Subleito

Rua São Bartolomeu													
Trecho = Rua 22 / Escola Classe São Bartolomeu													
ORDEM	Estaca Atual	IG	LL	IP	EXP (%)	ISC (IG)	ISC (Laboratório)	IS=[S(IG)+S(LAB)]/2 OU ISC LAB	Situação	ICS MÉDIO < ICS LAB	ICS MÉDIO - DESVIO PADRÃO < ICS LAB	LL > 25% e/ou IP > 5 - NÃO SERVE PARA BASE	
1°	FURO 01	8	-	-	5,21%	7	5,50	5,50	SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL OBRIGATORIO			0	
2°	FURO 02	8	-	-	6,01%	7	-	-	SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL OBRIGATORIO			0	
3°	FURO 03	8	-	-	5,11%	7	6,00	6,00				0	
4°	FURO 04	5	-	-	2,39%	10	10,00	10,00				0	
5°	FURO 05	8	-	-	5,75%	7	5,00	5,00	SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL OBRIGATORIO			0	
6°	FURO 06	8	-	-	6,71%	7	0,40	0,40	SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL OBRIGATORIO			0	
7°	FURO 07	7	-	-	4,63%	8	6,20	6,20				0	
8°	FURO 08	8	-	-	60,00%	7	7,20	7,10				0	
9°	FURO 09	8	-	-	2,80%	7	0,80	0,80	SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL OBRIGATORIO			0	
10°	FURO 10	8	-	-	2,80%	7	1,40	1,40	SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL OBRIGATORIO			0	
11°	FURO 11	7	-	-	4,14%	8	3,40	3,40	SUBSTITUIÇÃO DE MATERIAL OBRIGATORIO			0	
12°	FURO 12	8	-	-	0,24%	7	6,00	6,00				0	
13°	FURO 13	8	47,0	12,0	0,00%	7	14,00	10,50				NÃO PODE SER BASE	
14°	FURO 14	8	51,0	13,0	0,01%	7	28,10	17,55				NÃO PODE SER BASE	
15°	FURO 15	10	50,0	10,0	0,07%	6	16,10	11,05				NÃO PODE SER BASE	
16°	FURO 16	8	-	-	0,50%	7	11,00	9,00				0	
MÉDIA		7,81	9,25	-	6,65%			16					
		ISC - MÉDIO						6,24					
		ISC - DESVIO PADRÃO						4,68	0				
		Xmáx						10,93					
		Xmin						1,56					
		ISC - SUGERIDO						6,00	0				

A partir do resultado da análise estatística do subleito, chegou-se ao valor 6% de Índice de Suporte que será usado no dimensionamento do pavimento para o trecho em questão.

4.0 Dimensionamento do Pavimento Pelo Método Murilo Lopes de Souza

Neste item será estudado o dimensionamento do pavimento flexível, abordando o método de

dimensionamento adotado pelo DNIT – denominado método do Engenheiro Murilo Lopes de Souza.

O método tem como base o trabalho “Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume”, da autoria de W.J. Turnbull, C.R Foster e R.G Ahlvin, do Corpo de Engenheiros do Exército dos E.E.U.U. e conclusões obtidas na Pista Experimental da AASHTO.

Relativamente aos materiais integrantes do pavimento, são adotados coeficientes de equivalência estrutural tomando por base os resultados obtidos na pista experimental da AASHTO, com modificações julgadas oportunas.

4.1 Coeficiente de Equivalência Estrutural e Espessuras das Camadas

Os valores dos coeficientes de equivalência estrutural dependem do tipo de material construtivo utilizado no pavimento.

Cada camada possui um coeficiente de equivalência estrutural (k), que relaciona a espessura que a camada deve possuir de material padrão (base granular), com a espessura equivalente do material que realmente irá compor a camada.

São os seguintes os coeficientes de equivalência estrutural para os diferentes materiais constitutivos do pavimento:

Figura 01 – Coeficiente de Equivalência Estrutural

Camada do Pavimento	Coefficiente estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto asfáltico	2,0
Base ou revestimento de concreto magro/CCR	2,0
Base ou revestimento de Pré-Misturado a Quente, de graduação Densa / Binder	1,8
Base ou revestimento de Pré-Misturado a Frio, de Graduação Densa	1,4
Base ou revestimento asfáltico por penetração	1,2
Paralelepípedos	1,0
Base de brita graduada simples (BGS) Macadame hidráulico (MH) e estabilizadas granulometricamente	1,0
Sub-bases granulares ou estabilizadas com aditivos	≤ 1,0
Reforço do subleito	≤ 1,0
Base de solo cimento (SC) ou BGTC, com resistência à compressão aos 7 dias, superior a 4,5 MPa	1,7
Base de BGTC com resistência à compressão aos 7 dias entre 2,8 e 4,5 MPa	1,4
Base de solo cimento (SC), com resistência aos 7 dias, menor que 2,8 e maior ou igual a 2,1 MPa	1,2
Base de solo melhorado com cimento, com resistência à compressão aos 7 dias, menor que 2,1 Mpa	1,0

Obs.: Pesquisas futuras podem justificar mudanças nestes coeficientes.

Os coeficientes estruturais são designados, genericamente por:

Revestimento: K_R

Base: K_B

Sub-base: K_S

Reforço: K_{Ref}

Os coeficientes estruturais da sub-base granular e do reforço do subleito serão obtidos pelas equações abaixo. Na adoção de base mista a camada de *MH*, denominada de sub-base, adota-se coeficiente estrutural = 1,0.

$$K_{SB} = \sqrt[3]{\frac{CBR_{SB}}{3 * CBR_{REF}}} < 1 \quad (\text{Equação 02})$$

$$K_{REF} = \sqrt[3]{\frac{CBR_{REF}}{3 * CBR_{SL}}} < 1 \quad (\text{Equação 03})$$

Mesmo que o *CBR* do reforço ou da sub-base seja superior a 20% deverá ser considerado com se fosse igual a 20% para efeito de cálculo das relações acima.

Obs: O coeficiente de equivalência estrutural da sub-base granular ou do reforço do subleito deverá ser 1,0 toda vez que o CBR desses materiais for igual ou superior a três vezes o CBR do subleito.

Tabela 03 – Alguns valores de Coeficiente de Equivalência Estrutural para sub-base granular e reforço do subleito

CBR_1/CBR_2	K_{Ref} OU K_S
1,1	0,72
1,2	0,75
1,3	0,76
1,4	0,78
1,5	0,80
1,6	0,82
1,7	0,83
1,8	0,85
1,9	0,86
2,0	0,88
2,1	0,90
2,2	0,91
2,3	0,92
2,4	0,94
2,5	0,95
2,6	0,96
2,7	0,97
2,8	0,98
2,9	0,99
3,0	1,00

A espessura da camada de revestimento asfáltico é por sua vez um dos pontos ainda em aberto na engenharia rodoviária, quer se trate de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, quer se trate de evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. As espessuras apresentadas na tabela a seguir recomendadas, visam especialmente as bases de comportamento puramente granular e são ditadas pelo que se tem podido observar.

Figura 02 – Espessuras de revestimento

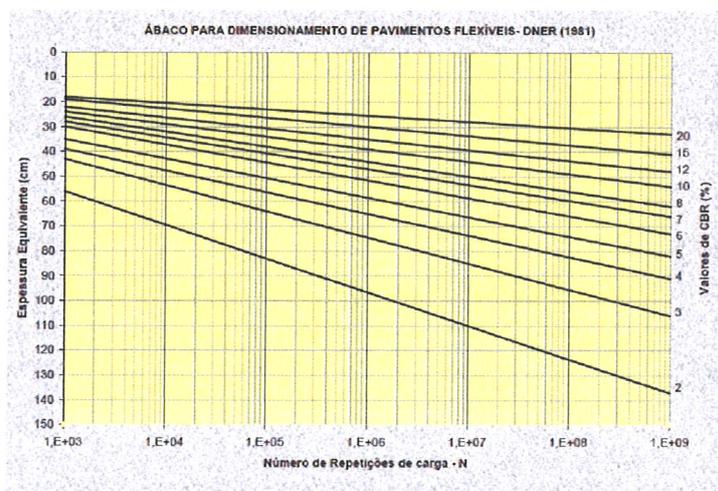
Espessuras Mínimas de Revestimentos Asfálticos		
N (repetições) do ESRD de 80 kN	Tipo de Revestimento	Espessura (mm)
$\leq 10^6$	Tratamentos superficiais	15 a 30
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	CA, PMQ, PMF	50
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico	75
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico	100
$N \geq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico	125

No caso da adoção de tratamentos superficiais, as bases granulares devem possuir coesão, pelo menos aparente, seja devido à capilaridade ou a entrosamento de partículas.

4.2 Determinação das Espessuras das Camadas

O ábaco abaixo, nós dá a espessura total do pavimento, em função de N e do CBR; a espessura fornecida por esse gráfico é em termos de material com $K = 1,00$, isto é, em termos de camada granular. Entrando-se em abscissas, com o valor de N, procede-se verticalmente até cruzar com a reta representativa da capacidade de suporte – CBR e, procedendo-se horizontalmente, encontra-se, em ordenadas a espessura total do pavimento.

Figura 03 – Ábaco para Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – DNER (1981).

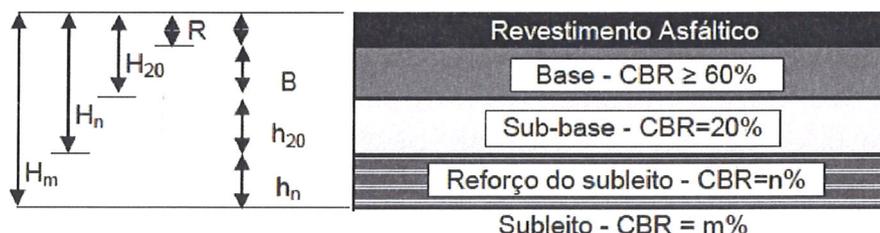


Outro procedimento de obtenção da espessura total do pavimento (H_t), em termos de material granular é através da aplicação da equação abaixo:

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{0,598} \quad (\text{Equação 04})$$

Supõe-se, sempre, que há uma drenagem superficial adequada e que o lençol freático foi rebaixado a, pelo menos 1,50 m em relação ao greide de regularização. É apresentada na Figura 04 a simbologia utilizada no dimensionamento do pavimento.

Figura 04 – Estrutura do Pavimento



Ressalta-se na Figura acima, que as letras H (maiúsculo) refere-se as espessuras de várias camadas e o h (minúsculo) refere-se a espessura de uma única camada.

H_m = espessura total do pavimento necessária para proteger um material com $CBR = m\%$, observe-se que a espessura H_m é função do CBR do subleito ($m\%$).

H_n = espessura necessária acima do reforço, ou seja, a espessura da sub-base + base + revestimento, para materiais com coeficiente estrutural $(K) = 1,00$.

Os símbolos B e R são respectivamente as espessuras da base e do revestimento. Mesmo que o CBR da sub-base seja superior a 20%, a espessura de pavimento necessário para protegê-la é determinada como se este valor fosse 20% e, por essa razão, usamos sempre, os símbolos H_{20} e h_{20} (Figura 04) para designar as espessuras de pavimento sobre a sub-base e da sub-base respectivamente. Assim, para se determinar espessura de H_{20} utiliza-se o CBR (sub-base) = 20% - sempre será essa condição.

Uma vez determinadas as espessuras H_m , H_n e H_{20} e a espessura do revestimento, as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes Inequações:

$$R_{KR} + B_{KB} \geq H_{20}$$

$$R_{KR} + B_{KB} + h_{20\ KS} \geq H_n$$

$$R_{KR} + B_{KB} + h_{20\ KS} + h_n K_{Ref} \geq H_m$$

Importante:

- a) Quando o CBR da sub-base for maior ou igual a 40% e para $N \leq 10^6$, admite-se substituir na inequação (1), H_{20} , por $0,8 \times H_{20}$.
- b) Para $N > 10^7$, recomenda-se substituir, na inequação (1), H_{20} por $1,2 \times H_{20}$.
- c) Nem toda estrutura de pavimento dispõe de material para reforço de subleito.
- d) Quando não forem fornecidas as características dos materiais da base, sub-base e reforço, deve-se utilizar o coeficiente estrutural $K = 1,0$ caso contrário determiná-lo com a partir da figura 01.

4.3 Definição das Espessuras

Foi definido considerando-se o período de projeto de 10 anos, sendo o número N de projeto igual a $N_{USACE} = 4,61 \times 10^6$ de Solicitações;

Dispondo dos Índices de Suporte, do subleito, do reforço do subleito e da sub-base, podem-se obter no ábaco da Figura 03, em primeira aproximação, as espessuras necessárias, respectivamente, acima dessas camadas.

4.3.1 Espessura Total do Pavimento (Hm)

Com os dados obtidos (fator de equivalência e ISC do subleito) chegou-se a espessura total necessária do pavimento (Hm).

Hm → Para N_{10} e ISC_{sl} (6,0%), consultando o ábaco de dimensionamento, tem-se 55,0 cm de espessura total do pavimento.

4.3.2 Espessura Necessária de Pavimento acima do Reforço do Subleito ou Seja, Sub-base, Base e Revestimento.

Hn → Espessura do topo do revestimento até o início da camada de reforço do subleito; Adotando um Índice de Suporte (ISC) de 7,0% para o reforço do subleito e utilizando o ábaco da figura 03 em função do número N , tem-se a espessura de 50 cm.

4.3.3 Espessura Necessária de Pavimento acima da Sub-base, ou Seja, Base e Revestimento.

H₂₀ → Para N_{10} e $ISC_{sb} = 20\%$ (20 mínimos) e de acordo com o ábaco da figura 03, tem-se 27,0 cm de espessura necessária de pavimento acima da sub-base.



4.3.4 Espessura do Revestimento.

Revestimento (R) → Para $N_{10\text{ USACE}} = 4,61 \times 10^6$, utilizando-se a figura 02, é indicado uma espessura de 5,0 cm podendo ser Concreto Asfáltico Usinado a Quente.

4.3.5 Espessuras das Camadas que Compõem o Pavimento Utilizando o Sistema de Inequações

4.3.5.1 Espessura da Camada de Base

$$R.K_R + B.K_B \geq H_{20}$$

$$5,0 \times 2,0 + B \times 1,0 \geq 27,0$$

$$B \geq 17,0 \text{ cm}$$

4.3.5.2 Espessura da Camada de Sub-Base (k=0,981)

$$R.K_R + B.K_B + h_{20}.K_s \geq H_n$$

$$5,0 \times 2,0 + 17,0 \times 1,0 + h_{20}.0,981 \geq 50,0$$

$$h_{20} \geq 24,0 \text{ cm}$$

4.3.5.3 Espessura da Camada de Reforço do Subleito (K= 0,725)

$$R.K_R + B.K_B + h_{20}.K_s + h_n.K_{\text{Ref}} \geq H_m$$

$$10,0 + 17,0 + 24,0 + h_n.0,725 \geq 55,0$$

$$h_n \geq 6,0 \text{ cm}$$

Portanto, a estrutura para este trecho da rodovia de acordo com o Método DNER (Eng^o Murilo Lopes De Souza) deverá ser:

- Revestimento em Concreto Asfáltico Usinado a Quente com 5,0 cm de espessura;
- Base em solo granular compactada a 100% do Proctor Modificado e espessura de 17,0 cm;
- Sub-base em solo granular compactada a 100% do Proctor Intermediário e espessura de 24,0 cm;
- Reforço do Subleito a 100% do Proctor intermediário com espessura de 6,0 cm.

Com o intuito de melhor distribuir as tensões e deformações atuantes no pavimento, procurando promover uma melhor coerência entre as espessuras das camadas e visando maior eficácia e economia, foi adotado a espessura de 30,0 cm de sub-base, suprimindo por conseguinte o reforço do subleito.

5.0 Verificação Mecanicista – Empírica

Para a realização da análise mecanística das soluções de implantação do pavimento da Rua



São Bartolomeu, foram consideradas as diretrizes constantes da Instrução de Projeto de Pavimentos do DER-SP (IP-DE-P00/001). A análise mecânica de pavimentos consiste na avaliação das tensões e deformações em pontos específicos da estrutura, provocadas pelo carregamento do tráfego, e na aplicação de modelos de previsão de desempenho.

De acordo com Medina e Motta (2005), no dimensionamento mecânico, parte-se de espessuras admitidas para as camadas do pavimento e calcula-se o estado de tensões e deformações com o objetivo de comparar com valores limites estabelecidos.

Para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos na estrutura de pavimento admitida são utilizados programas computacionais. Os valores obtidos são então comparados com valores admissíveis calculados por meio dos modelos de fadiga e deformação permanentes disponíveis na literatura, até se chegar a uma estrutura compatível com o tráfego previsto para o período de projeto.

De forma geral, adota-se um modelo estrutural para as camadas do pavimento e para o carregamento do tráfego e, com o auxílio do software específico *ELSYM5*, são calculadas as tensões e deformações em determinados pontos da estrutura. Os valores calculados são então comparados com valores admissíveis obtidos mediante a aplicação de modelos de previsão de desempenho.

Para pavimentos flexíveis normalmente são verificados os seguintes critérios:

- Deflexão: verifica-se o deslocamento vertical recuperável na superfície do revestimento;
- Fadiga do revestimento asfáltico: verifica-se a deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico;
- Subleito: verifica-se a deformação específica vertical no topo do solo de fundação

No caso de pavimentos semirrígidos, além dos critérios listados anteriormente, verifica-se também o problema do trincamento por fadiga na camada de base cimentada, que costuma ser o problema mais crítico neste tipo de pavimento.

De acordo com a instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP (IP-DE-P00/001), as cargas a serem inseridas na análise mecanicista devem simular o eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN (8,2 toneladas), utilizando quatro pontos de aplicação de carga de 20 kN (2,05 toneladas) cada e pressão de contato pneu pavimento de 0,560 MPa (5,60 kgf/cm²).

Para verificação das tensões e deformações na estrutura do pavimento foram tomados quatro pontos de análise.

- No centro de cada pneumático (X=0 cm; Y=0 cm) e (X=31,5 cm; Y=0 cm);
- No eixo central da simetria do semi-eixo (X=15,75 cm; Y=0 cm);

– Na borda do pneumático (X=10,0 cm; Y=0 cm).

Na tabela abaixo é apresentada a relação entre o ponto analisado e o tipo de defeito que se quer avaliar na estrutura do pavimento.

Tabela 04 – Pontos Analisados/Defeitos

Localização do Ponto	Resultado de Interesse	Defeito Avaliado
Topo da superfície da camada de revestimento	Deslocamento/Deflexão (D)	Trincamento do revestimento por fadiga
Fibra inferior da camada de revestimento	Tensão ou deformação de tração (σ_t e ϵ_t)	Trincamento do revestimento por fadiga
Fibra inferior da camada de base cimentada	Tensão de deformação de tração (Base cimentada.) - (σ_t e ϵ_t)	Trincamento da camada de base cimentada por fadiga
Topo da superfície da camada de subleito	Tensão ou deformação de compressão (σ_v e ϵ_v)	Deformação permanente

Nesta análise, utilizando o programa *ELSYM5* para o cálculo das tensões e deformações solicitantes na estrutura do pavimento. A rotina de análise original do *ELSYM5* foi desenvolvida pela Universidade da Califórnia, em Berkeley, e posteriormente revisada com a supervisão da FHWA (Federal Highways Administration). Trata-se de um programa desenvolvido com base teoria das camadas elásticas e no método das diferenças finitas, considerando modelagem do tipo elástico linear. Neste tipo de modelagem os valores dos módulos de resiliência dos materiais são constantes, isto é, não variam com o estado de tensões aplicado.

Para a seleção dos modelos de avaliação de desempenho considerados nas análises, recorreu-se às orientações da instrução de Projeto de Pavimentação do DER/SP (IPDE-P00/001). Assim, foram selecionados os seguintes modelos:

a) Deslocamento vertical recuperável (Deflexão).

O deslocamento vertical recuperável máximo da superfície do pavimento que também é denominado deflexão. Para a verificação deste critério foram consideradas as equações dos métodos DNER-PRO 011/79 e DNER-PRO 269/94:

– DNER-PRO 011/79

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \cdot \log N^{(USACE)} \text{ (Equação 05)}$$

– DNER-PRO 269/94

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \cdot \log N^{(USACE)} \text{ (Equação 06)}$$

Sendo:

N = número equivalente de operações de eixo simples padrão de rodas duplas de 80 kN acumulado