

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DA ILHA DO FUNDÃO COM PAVIMENTO
RÍGIDO E PAVIMENTO FLEXÍVEL

CHRISTIE DE VILHENA PRATA MACHADO
MAGNUS CARVALHO DE VILHENA PRATA

2022

**PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DA ILHA DO FUNDÃO COM PAVIMENTO
RÍGIDO E PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Christie de Vilhena Prata Machado
Magnus Carvalho de Vilhena Prata

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Sandra Oda
Orientador: Oscar Aurelio Mendoza Reales

Rio de Janeiro
Março de 2022

**PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DA ILHA DO FUNDÃO COM PAVIMENTO
RÍGIDO E PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Christie de Vilhena Prata Machado

Magnus Carvalho de Vilhena Prata

**PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.**

Examinado por:

Profa. Sandra Oda, D.Sc. - DET/POLI/UFRJ

Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales, D.Sc. - PEC/COPPE/UFRJ

Profa. Mayara Amario, D.Sc. - DCC/POLI/UFRJ

Eng. Leonardo Santana Cavalcanti, D.Sc. - PCRJ

Rio de Janeiro

Março de 2022

Machado, Christie de Vilhena Prata

Prata, Magnus Carvalho de Vilhena

Projeto de Pavimentação da Ilha do Fundão com Pavimento Rígido e Pavimento Flexível / Christie de Vilhena Prata Machado e Magnus Carvalho de Vilhena Prata – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2022.

VII, 88p.: il.; 29,7cm

Orientador: Sandra Oda

Orientador: Oscar Aurelio Mendoza Reales

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Engenharia Civil, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 82 - 88.

1. Pavimentação. 2. Pavimento Rígido. 3. Pavimento Flexível. 4. Ilha do Fundão. I. Oda, Sandra *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DA ILHA DO FUNDÃO COM PAVIMENTO RÍGIDO E PAVIMENTO FLEXÍVEL

Christie de Vilhena Prata Machado

Magnus Carvalho de Vilhena Prata

Março de 2022

Orientador: Sandra Oda

Orientador: Oscar Aurelio Mendoza Reales

Curso: Engenharia Civil

A Ilha do Fundão, localizada no município do Rio de Janeiro, sofre de maneira crônica quanto às condições de pavimentação. Apesar dos constantes reparos no revestimento, os defeitos sempre reaparecem devido ao fato dos pavimentos serem muito antigos e terem sido dimensionados para um fluxo de veículos significativamente menor do que o existente na atualidade. Com o objetivo de melhorar a qualidade dos pavimentos da Ilha do Fundão, o presente trabalho apresenta o projeto de pavimentação das vias principais em pavimento rígido e das vias secundárias em pavimento flexível. O uso do pavimento rígido nas vias principais, caracterizado por possuir maior resistência e durabilidade, é justificado por elas possuírem um maior fluxo de veículos e por ser considerada uma possível circulação dos ônibus do BRT por essas vias. Para as vias secundárias, utiliza-se o pavimento flexível em função do menor fluxo e baixa carga dos veículos. O dimensionamento de ambos os pavimentos consistiu na definição das espessuras de suas respectivas camadas. Neste projeto, foram considerados o fluxo atual de veículos que transitam pela Ilha do Fundão, a geometria das vias, um tempo de projeto de 20 anos, e seguiu-se as recomendações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). A partir deste trabalho, foi desenvolvido um projeto de pavimentação que serve de base para a melhoria como um todo dos pavimentos da Ilha do Fundão, possibilitando múltiplos benefícios quanto à mobilidade dos estudantes, trabalhadores e moradores do local.

Palavras-chave: Pavimentação, Pavimento Rígido, Pavimento Flexível, Ilha do Fundão.

Summary of the Undergraduate Project presented to the Polytechnic School / UFRJ as part of the requirements necessary to obtain the degree of Civil Engineer.

PAVING PROJECT OF THE ISLAND OF THE FUNDÃO WITH RIGID PAVEMENT AND FLEXIBLE PAVEMENT

Christie de Vilhena Prata Machado

Magnus Carvalho de Vilhena Prata

March 2022

Advisor: Sandra Oda

Advisor: Oscar Aurelio Mendoza Reales

Course: Civil Engineering

Fundão Island, located in the city of Rio de Janeiro, suffers chronically from paving conditions. Despite the constant repairs in the coating, the defects always reappear because the pavements are very old and have been sized for a significantly lower flow of vehicles than the existing today. In order to improve the quality of the pavements of The Island of Fundão, the present work presents the paving project of the main roads in rigid pavement and secondary roads in flexible pavement. The use of rigid pavement in the main roads, characterized by having greater strength and durability, is justified by the one they have a greater flow of vehicles and because it is considered a possible circulation of BRT buses by these routes. For secondary roads, the flexible pavement is used according to the lower flow and low load of the vehicles. The sizing of both pavements consisted of defining the thicknesses of their respective layers. In this project, we considered the current flow of vehicles that transit through The Island of Fundão, the geometry of the roads, a project time of 20 years, and followed the recommendations of the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) and the National Department of Highways (DNER). From this work, a paving project was developed that serves as a basis for the improvement as a whole of the pavements of The Island of Fundão, enabling multiple benefits regarding the mobility of students, workers and local residents.

Keywords: Paving, Rigid Pavement, Flexible Pavement, Fundão Island.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA	1
1.2	MOTIVAÇÃO	3
1.3	OBJETIVO	4
1.4	METODOLOGIA	5
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2	PAVIMENTAÇÃO	7
2.1	ESTUDO DE TRÁFEGO	7
2.1.1	VOLUME DIÁRIO MÉDIO (VDM).....	8
2.1.2	NÚMERO N.....	9
2.1.3	PROJEÇÃO DE EIXOS POR CLASSE DE CARGA	11
2.2	DEFINIÇÃO, CONCEITOS E TIPOS DE PAVIMENTOS	12
2.2.1	PAVIMENTO FLEXÍVEL	12
2.2.2	PAVIMENTO RÍGIDO	14
2.3	CAMADAS	16
2.3.1	SUBLEITO.....	17
2.3.2	REFORÇO DO SUBLEITO	18
2.3.3	SUB-BASE.....	19
2.3.4	BASE.....	19
2.3.5	REVESTIMENTO	20
3	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO.....	26
3.1	VIAS PRINCIPAIS - PAVIMENTO RÍGIDO	32
3.1.1	DETERMINAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO (VDM)	34
3.1.2	DETERMINAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO ANUAL (VDMA)	37

3.1.3	CÁLCULO DA PROJEÇÃO DE EIXOS POR CLASSE DE CARGA	39
3.1.4	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE RECALQUE (K)	41
3.1.5	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO EQUIVALENTE.....	42
3.1.6	ANÁLISE DE EROSÃO	43
3.1.7	ANÁLISE DE FADIGA	47
3.1.8	ESPESSURAS FINAIS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO RÍGIDO	50
3.2	VIAS SECUNDÁRIAS - PAVIMENTO FLEXÍVEL	54
3.2.1	DETERMINAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO (VDM)	54
3.2.2	CÁLCULO DO NÚMERO N	58
3.2.3	ESCOLHA DOS MATERIAIS DAS CAMADAS	60
3.2.4	DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS DAS CAMADAS.....	62
3.3	INTERFACES ENTRE O PAVIMENTO RÍGIDO E O FLEXÍVEL	71
4	CUSTO DE MATERIAIS	72
4.1	PAVIMENTO RÍGIDO	73
4.2	PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	76
4.3	CUSTO TOTAL DE MATERIAIS	79
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

O território brasileiro é caracterizado por possuir uma malha rodoviária bastante extensa, que mesmo tendo apenas 12,4% de suas rodovias pavimentadas, apresenta um papel fundamental para o fluxo de pessoas e mercadorias no país, e por isso, é de suma importância que possua um desempenho satisfatório (CNT, 2021b). Dessa forma, torna-se imprescindível a existência de pavimentos resistentes, duráveis e de baixa manutenção, no intuito de fazer frente às demandas de tráfego intenso, cargas elevadas e variações térmicas. Os tipos de rodovias presentes na malha rodoviária brasileira podem ser vistos a partir da Figura 1.

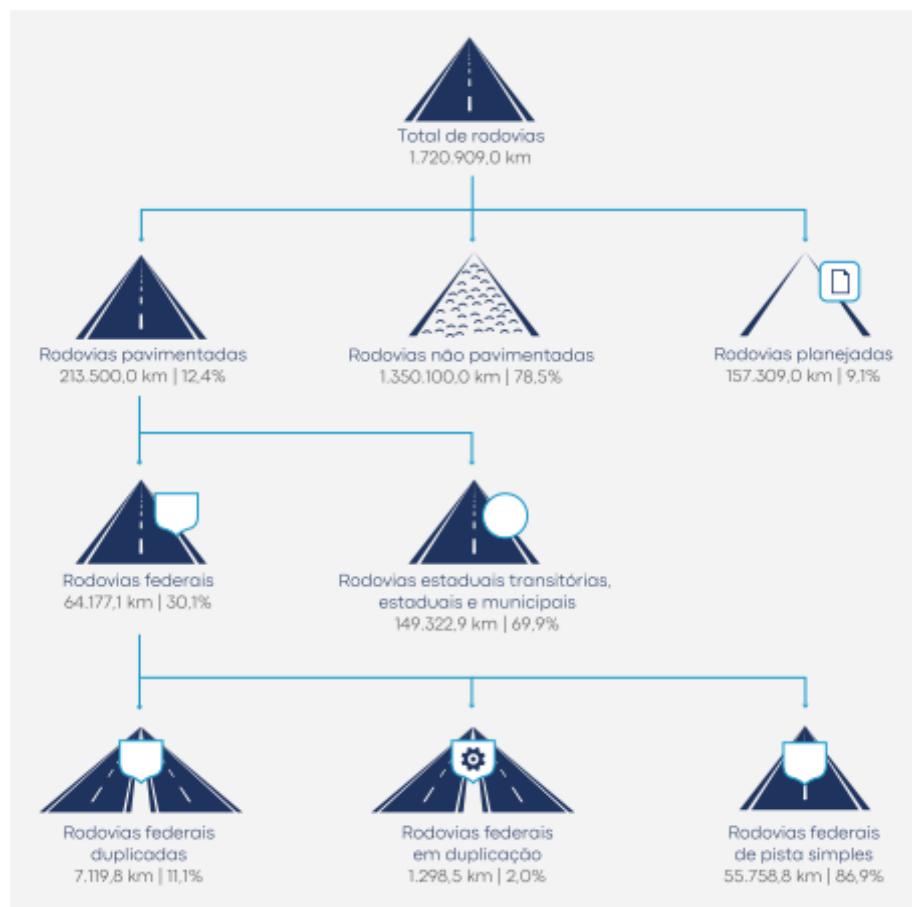


Figura 1 - Malha rodoviária brasileira (CNT, 2021b).

A maioria das rodovias brasileiras encontra-se com mais de 40 anos de idade, superando de maneira considerável o tempo de vida útil para o qual foram projetadas. Além disso, houve incremento no volume de tráfego e na quantidade de carga transportada por

caminhões (SANTOS, ROSA, *et al.*, 2021). Assim, tem-se como consequência direta para as rodovias brasileiras múltiplos problemas quanto às condições de pavimentação, exigindo constantes reparos que de fato não resolvem corretamente os defeitos dos pavimentos.

O tipo de pavimento de uma determinada via relaciona-se diretamente à tipologia predominante de veículo que circula pela via em questão. No Brasil, existe uma predominância de automóveis na malha rodoviária, totalizando 53,3% dos veículos em circulação. Em seguida, tem-se as motocicletas, caminhões e ônibus ocupando, respectivamente, 22,2%, 2,6% e 0,6% da frota rodoviária do país (CNT, 2021a). A Figura 2 ilustra, em porcentagem, parte da composição da frota rodoviária brasileira.

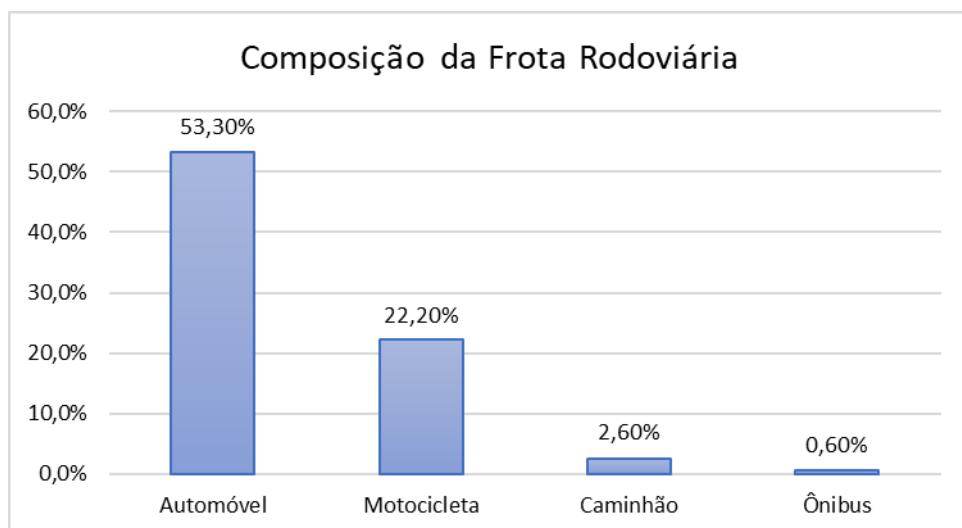


Figura 2 - Composição da frota rodoviária brasileira (adaptado de CNT, 2021a).

Os pavimentos rodoviários tradicionalmente são classificados como flexíveis e rígidos. Diversos autores têm considerado uma terceira terminologia, o pavimento semirrígido, para caracterizar o pavimento que possui revestimento asfáltico e camada de base ou sub-base composta de material estabilizado com cimento. Os pavimentos flexíveis são aqueles em que o material de seu revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Esse pavimento é constituído tipicamente pelas seguintes camadas: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento flexível. No Brasil, estima-se que cerca de 99% das rodovias são construídas em pavimento flexível (CNT, 2021b). Apesar do pavimento flexível ser o mais utilizado no Brasil, o pavimento rígido vem se mostrando uma solução bastante competitiva para vias de tráfego pesado,

uma vez que confere maior resistência e durabilidade ao pavimento. No pavimento rígido o revestimento é uma placa de concreto feita com cimento Portland, sendo a espessura fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes ao revestimento, representadas, em geral, apenas pela camada de sub-base apoiada sobre o subleito. A Figura 3 ilustra as diferenças entre os pavimentos rígidos e flexíveis.

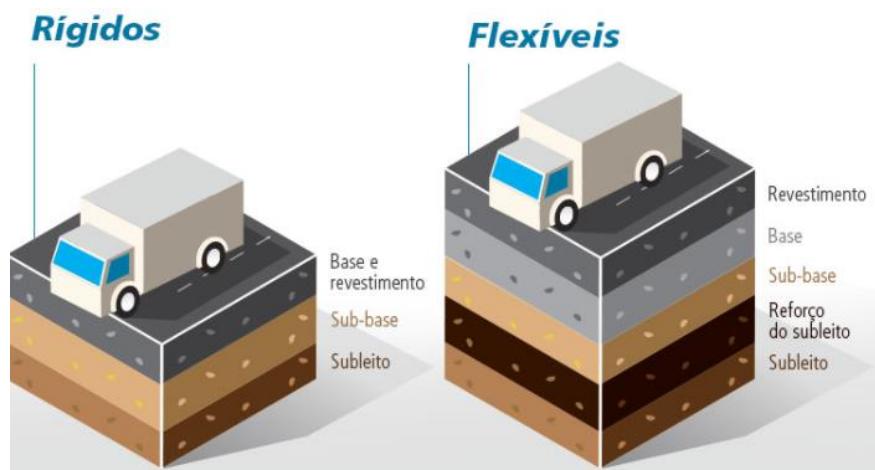


Figura 3 - Diferenças entre os pavimentos rígidos e flexíveis (ALÉM DA INÉRCIA, 2022).

1.2 MOTIVAÇÃO

Localizada no município do Rio de Janeiro, a Ilha do Fundão foi formada a partir da integração, por meio de aterro, de um arquipélago formado por oito ilhas nos anos de 1949 a 1952. A Figura 4 ilustra como era a disposição original das ilhas que foram unificadas.

A Ilha do Fundão é um dos principais locais responsáveis pela pesquisa no Brasil. Nela está localizado o principal campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), da mesma forma que importantes empresas, como a Petrobrás. Além disso, estima-se que cerca de 90 mil pessoas circulam diariamente pelas vias da Ilha do Fundão (VIVA A ILHA DO FUNDÃO, 2022a).

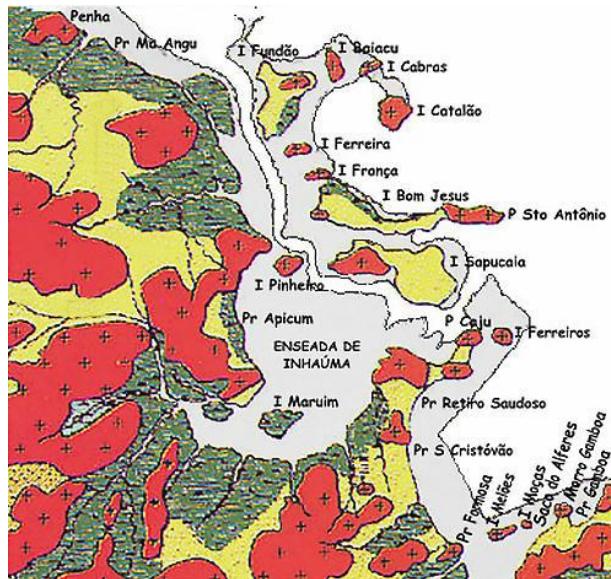


Figura 4 - Ilhas originais antes do aterro (IF, 2022).

A importância da Ilha do Fundão é indiscutível, sobretudo no que diz respeito à geração de conhecimento e pesquisa, à funcionalidade de grandes empresas e às próprias pessoas que precisam se locomover pela ilha. Apesar de toda essa relevância, o local sofre de maneira severa e crônica com a precariedade dos seus pavimentos. A recorrência dos problemas deve-se ao fato dos pavimentos serem muito antigos, já tendo ultrapassado a vida útil de projeto, mas também por terem sido dimensionados para um tráfego muito menos intenso do que o existente na atualidade no interior da ilha. O incremento no volume de veículos em circulação foi bastante significativo após a construção da Ponte do Saber, pois muitos ônibus oriundos da Ilha do Governador passaram a usar a Ilha do Fundão como parte de suas rotas de percurso, bem como muitos outros veículos passaram a utilizar a ilha como forma de cortar caminho e escapar do trânsito de um trecho considerável da Linha Vermelha.

1.3 OBJETIVO

Diante do estado de degradação em que os pavimentos da Ilha do Fundão se encontram, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o projeto de pavimentação das suas vias principais, em pavimento rígido, e das suas vias secundárias, em pavimento flexível. Nesse sentido, pretende-se refazer os pavimentos da Ilha do Fundão de forma a torná-los compatíveis com a demanda atual do fluxo de veículos, buscando promover melhores condições de rolamento e evitar o problema da recorrência de defeitos nos pavimentos.

Concomitantemente, o projeto também busca viabilizar a circulação dos ônibus do BRT (Bus Rapid Transit) pelas vias principais da Ilha do Fundão, através de um dimensionamento adequado do pavimento rígido em concreto dessas vias.

1.4 METODOLOGIA

Todo o projeto de pavimentação, englobando tanto as vias principais quanto as secundárias, baseou-se em definir as dimensões, em termos de espessuras, das camadas dos pavimentos projetados. Para o referido projeto foi considerando o fluxo de veículos previsto para os próximos 20 anos, levando-se em conta o crescimento exponencial do número de veículos no decorrer desse tempo, seguindo-se taxas de crescimento específicas. No caso das vias principais, considerou-se também o fluxo dos ônibus do BRT que poderão passar a circular por essas vias, com base no fluxo existente atualmente no Terminal Aroldo Melodia. Ademais, dados referentes à geometria das pistas e informações a respeito da capacidade de suporte do solo de fundação serviram de base também para todo o dimensionamento dos pavimentos.

Como as vias principais possuem um tráfego mais pesado de veículos e poderão contar com a passagem dos ônibus do BRT, optou-se pela utilização do pavimento rígido nessas vias, justamente por esse tipo de pavimento ser o mais recomendado a fluxos mais intensos e cargas maiores. Já para as vias secundárias, foi escolhido o uso do pavimento flexível, uma vez que essas vias são caracterizadas por um menor fluxo e baixa carga dos veículos, não justificando a utilização do pavimento rígido nelas.

Toda a análise de tráfego foi baseada no Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006b). Para o dimensionamento do pavimento rígido foi utilizado o Método PCA – 1984, contido no Manual de Pavimentos Rígidos (DNIT, 2005) e para o dimensionamento do pavimento flexível foi usado o “Método do CBR”, presente no Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho se encontra organizado em capítulos, conforme as descrições que se seguem:

- Capítulo 1: é composto da contextualização do tema e nele são expostas as motivações, objetivos e metodologia do trabalho, assim como a sua estrutura geral.
- Capítulo 2: é feita uma revisão bibliográfica do estudo de tráfego e da pavimentação, discutindo-se a respeito da sua definição, dos seus conceitos, dos tipos de pavimentos e das características de cada uma das camadas constituintes do pavimento.
- Capítulo 3: é elaborado o dimensionamento do pavimento das vias principais em pavimento rígido e das vias secundárias em pavimento flexível, calculando-se as espessuras e definindo os materiais de cada uma das camadas que compõem os dois tipos de pavimentos projetados.
- Capítulo 4: são calculados os custos referentes aos materiais necessários para a construção de cada um dos pavimentos projetados.
- Capítulo 5: são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 PAVIMENTAÇÃO

2.1 ESTUDO DE TRÁFEGO

Para o correto dimensionamento do pavimento, é primordial se conhecer a solicitação que o tráfego exerce sobre o pavimento durante a sua vida útil, e para isso, são necessárias informações relativas à composição do tráfego como o volume de veículos, em função do tipo e da carga por eixo desses veículos. É importante esse tipo de classificação pois trata-se de um tráfego misto, e por esse motivo, não basta saber apenas o volume total, mas também é preciso que sejam conhecidas as informações referentes a cada categoria de veículo, as cargas transportadas e a distribuição delas nos diversos tipos de eixos.

Outra informação de grande importância para o dimensionamento do pavimento é a taxa de crescimento anual que incidirá sobre o volume de veículos. A taxa de crescimento depende do local de estudo, uma vez que é influenciada por variáveis como: população, emprego, renda, frota de veículos etc. Usualmente, utiliza-se o histórico de crescimento do tráfego do local para se definir essa taxa e na falta dessa informação, o Dnit (2006b) recomenda usar a taxa de crescimento anual de 3%, que é próxima da taxa de crescimento econômico do país como um todo, o que resulta em uma função exponencial. A projeção geométrica ou exponencial, é representada pela equação (1).

$$V_n = V_0(1 + a)^n \quad (1)$$

sendo,

V_n = volume de tráfego no ano “ n ”;

V_0 = volume de tráfego no ano base;

a = taxa de crescimento anual;

n = número de anos decorridos após o ano base.

Para que seja realizado um estudo de tráfego é necessário que seja usada a classificação dos veículos de acordo com a categoria a qual cada um pertence, presente no Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006b). Além disso, existe uma subdivisão dessa classificação pelos tipos de eixo existentes em cada classe de veículo. O DNIT (2006b) classifica os eixos existentes da seguinte forma:

- Eixo simples com rodagem simples (2 pneus);
- Eixo simples com rodagem dupla (4 pneus);
- Eixo duplo com rodagem simples (4 pneus);
- Eixo duplo com rodagem simples/dupla (6 pneus tandem);
- Eixo duplo com rodagem dupla (8 pneus tandem);
- Eixo triplo c/1 rodagem simples e 2 duplas (10 pneus tandem);
- Eixo triplo com 3 rodagens duplas (12 pneus tandem).

2.1.1 VOLUME DIÁRIO MÉDIO (VDM)

O Volume Diário Médio (VDM) é a quantidade média de veículos que passa por uma via, durante 24h. Para a sua determinação é necessário realizar a contagem e classificação dos veículos que transitam pela via em um determinado intervalo de tempo, e para isso, existem diversas formas de se fazer essa contagem.

A determinação do VDM pode ser feita tomando-se o volume anual e dividindo-se por 365 (número de dias do ano). Outra forma de se obter o VDM é através do Volume de Hora Pico (VHP). Para a definição do VHP é preciso que a contagem seja realizada durante 1h no horário de pico, subdividindo essa contagem em quatro intervalos de tempo de 15 minutos. Assim, para se calcular o VDM, escolhe-se o maior volume de veículos contados em 15 minutos e multiplica-se por quatro, dividindo-se o resultado obtido pelo fator k . As equações (2) e (3) resumem o que foi descrito anteriormente.

$$VHP = 4 \times V_{15} \quad (2)$$

$$VDM = \frac{VHP}{k} \quad (3)$$

sendo,

VHP = volume de hora pico;

V_{15} = volume do período de 15 minutos com maior fluxo de tráfego dentro da hora de pico;

VDM = volume diário médio;

k = fator k .

Para um projeto de pavimentação utiliza-se o VDM expandido para um determinado tempo de projeto. Nesse período, é considerado um crescimento exponencial para o VDM, levando-se em conta o efeito da taxa de crescimento anual, e para isso, faz-se o uso da equação (4).

$$VDM_{final} = VDM_{inicial}(1 + Taxa\ de\ crescimento)^n \quad (4)$$

O VDM pode ser utilizado para avaliar distribuições de tráfego, média da demanda atual e futura, programação de melhorias e organização de cronogramas de obras a serem executadas. Ademais, o cálculo do VDM é necessário para que se possa, através dele, ser calculado o número N, imprescindível para o dimensionamento do pavimento flexível, e para que se possa determinar o valor do Volume Diário Médio Anual (VDMA). Por sua vez, o VDMA é fundamental para a definição da projeção de eixos por classe de carga utilizada no dimensionamento do pavimento rígido.

2.1.2 NÚMERO N

O número N representa a quantidade de repetições do eixo padrão rodoviário, equivalente às solicitações do tráfego total previsto sobre a estrutura do pavimento durante o período de projeto (p). O eixo padrão é um eixo simples de rodas duplas carregado com 8,2 t .

Para a determinação do N é necessário saber o seguinte: as cargas por eixo de cada tipo de veículo que irão transitar pela via; o tempo de vida útil desejado para o pavimento e a quantidade média de veículos que deverão transitar pela via, considerando-se uma taxa de crescimento específica. A equação (5) mostra a equação geral para se obter o número N.

$$N = Vt \times FV \times FR \quad (5)$$

sendo,

N = número de repetições do eixo padrão rodoviário;

Vt = volume de tráfego que irá solicitar o pavimento durante o período de projeto, considerando-se, geralmente, o da faixa de maior solicitação;

FV = fator de veículo;

FR = fator climático regional, variando com a altura média anual de chuva. No Brasil, adota-se $FR = 1,0$.

Além disso, sabe-se que:

$$VDMA_{acumulado,p} = 365 \times \sum_{i=1}^p VDM_i \quad (6)$$

$$Vt_p = VDMA_{acumulado,p} \quad (7)$$

$$FV = \sum_{j=1}^m FC_j \quad (8)$$

sendo,

$VDMA_{acumulado,p}$ = volume diário médio anual acumulado para p anos de projeto;

p = tempo de projeto;

VDM_i = volume diário médio de cada um dos anos de projeto;

Vt_p = volume de tráfego que irá solicitar o pavimento durante p anos de projeto;

FV = fator de veículo de cada classe de veículo;

m = número de eixos de determinada classe de veículo;

FC_j = fator de carga de cada eixo, considerando uma dada classe de veículo.

Os Fatores de Equivalência de Cargas (FC) são responsáveis por fazerem a conversão do tráfego misto em um número equivalente de operações de um eixo considerado padrão. Esse fator permite converter uma aplicação de um eixo solicitado por uma determinada carga em um número de aplicações do eixo-padrão que deverá produzir um efeito equivalente (DNIT, 2006b).

Através das equações presentes na Tabela 1 são calculados os Fatores de Equivalência de Cargas (FC) do USACE em função do tipo de eixo de cada veículo. Para isso, utiliza-se o valor P, que é o peso bruto total sobre cada eixo do veículo, sendo obtido por meio das pesagens dos eixos dos veículos do trecho da estrada em análise ou em um trecho com comportamento de tráfego similar. Todavia, quando não existir esse tipo de informação, considera-se a carga máxima permitida por eixo para cada tipo de veículo, sendo encontrada no Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006b).

Tabela 1 - Fatores de equivalência de cargas do USACE (DNIT, 2006b).

Tipos de eixo	Faixas de cargas (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 - 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0 - 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

2.1.3 PROJEÇÃO DE EIXOS POR CLASSE DE CARGA

Para o dimensionamento dos pavimentos rígidos é necessário se conhecer, para o período de projeto de p anos, o número de repetições dos diferentes tipos de eixos, agrupados em classes de carga. Para isso, necessita-se das seguintes informações: o volume de tráfego associado a cada tipo de veículo, acumulado durante o período de projeto; o percentual de cada tipo de veículo que trafega na faixa de maior solicitação (faixa de projeto); a carga por tipo de eixo dos veículos pesados, por intervalo de carga (DNIT, 2006b).

A determinação das cargas por tipo de eixo e por intervalo de carga é feita seguindo o passo a passo recomendado pelo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006b), exposto a seguir:

1. Faz-se uma pesquisa de cargas por eixo dos veículos comerciais que trafegam na rodovia em questão.
2. Para cada eixo de cada veículo considerado, determinam-se os números de eixos por intervalo de carga de 1 tonelada.
3. Com base nas contagens feitas, determinam-se os volumes médios diários dos veículos comerciais na faixa de projeto, devidamente classificados por tipo, para o ano inicial do período de projeto.
4. Utilizando os resultados dos itens 2 e 3 determinam-se os números de eixos de cada tipo, por tipo de veículo, por intervalo de uma tonelada, para o ano inicial do projeto.
5. Determinam-se as taxas de crescimento dos veículos comerciais, a partir dos estudos econômicos efetuados. Normalmente, são calculadas separadamente as taxas dos veículos de transporte coletivo e dos veículos de carga.
6. Projeta-se os valores obtidos no item 4 (ano inicial) para cada ano do período de projeto.
7. Efetua-se o processo de acumulação ano a ano, a partir do primeiro ano do projeto, para todo o período de estudo.

2.2 DEFINIÇÃO, CONCEITOS E TIPOS DE PAVIMENTOS

A escolha entre se usar o pavimento flexível ou o rígido depende das características particulares do local e da obra. Alguns dos fatores que influenciam na escolha do tipo mais adequado de pavimento são: volume de tráfego do local; técnica a ser adotada na construção; viabilidade econômica e propriedades geotécnicas do local.

2.2.1 PAVIMENTO FLEXÍVEL

O pavimento flexível, também conhecido como pavimento asfáltico, é aquele em que o revestimento é composto por uma mistura de ligante asfáltico e agregados. Esse revestimento asfáltico é sobreposto às camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

Por sua vez, as camadas constituintes do pavimento se apoiam sobre o subleito, que é caracterizado como sendo o solo local devidamente compactado e nivelado. Pode-se ter a ausência de algumas camadas dependendo do tráfego, dos materiais disponíveis para as camadas e da qualidade do material do subleito. A Figura 5 ilustra as camadas típicas presentes em um pavimento flexível.

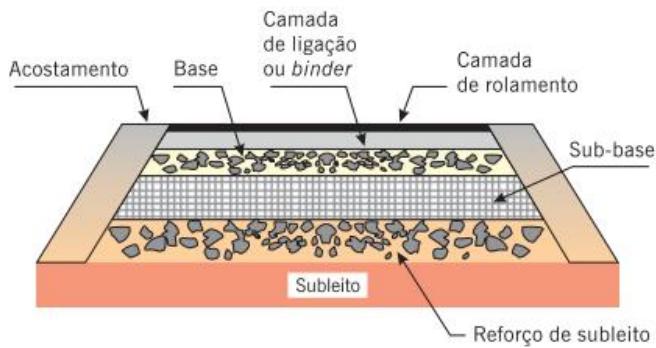


Figura 5 - Representação em corte transversal das camadas típicas do pavimento asfáltico (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

Algumas das principais vantagens do uso do pavimento flexível, em relação ao pavimento rígido, são representadas pelo custo inicial menor e pelo fato de já possuir uma tecnologia bastante consolidada no meio técnico, culminando em uma maior quantidade de mão de obra qualificada, o que facilita na hora da construção e manutenção do pavimento. Esse tipo de pavimento possui também uma melhor adaptação a pequenos recalques devido a sua maior flexibilidade (JOVER, 2017).

Em relação às principais desvantagens, quando comparado ao pavimento rígido, pode-se citar o fato de: possuir uma vida útil menor; requerer um maior número de manutenções ao longo da sua vida útil; promover aquaplanagem, dependendo do tipo de mistura do revestimento; apresentar um menor índice de reflexão de luz, o que leva à necessidade de uma iluminação pública mais eficiente; e devido à cor escura, absorve mais calor, contribuindo para o aquecimento do meio urbano. O pavimento flexível também sofre com deformações causadas por cargas repetitivas e pesadas, uma vez que, diferentemente do pavimento rígido, as cargas não são distribuídas uniformemente na área de contato. Isso é responsável pela existência de trechos que recebem cargas muito concentradas e elevadas, levando ao aparecimento de deformações no pavimento. Problemas como esse são comumente vistos em pontos de ônibus de grande circulação (ARAÚJO, SANTOS, *et al.*, 2016).

O pavimento flexível possui uma vida útil, com manutenção periódica, de 8 a 12 anos, no entanto é comum a existência de vias deterioradas antes mesmo do término de suas vidas úteis. Existem diversos motivos para o surgimento precoce dos defeitos, podendo incluir erros de dimensionamento, falhas no processo construtivo, a falta de manutenção preventiva e a ausência de fiscalização (tanto construtiva quanto em relação ao excesso de peso dos veículos) (CNT, 2021b).

2.2.2 PAVIMENTO RÍGIDO

O pavimento rígido ainda é muito pouco usado no Brasil, tendo sua utilização reservada para situações em que o tráfego é intenso, pesado e repetitivo. Esse pavimento é composto por placas de concreto de cimento Portland que possuem alta rigidez e resistência, e por isso, nesse tipo de pavimento não há a necessidade da camada base. Usualmente, também é dispensado o uso da camada de reforço do subleito dependendo da qualidade do material do subleito. A Figura 6 representa a configuração típica de um pavimento rígido.

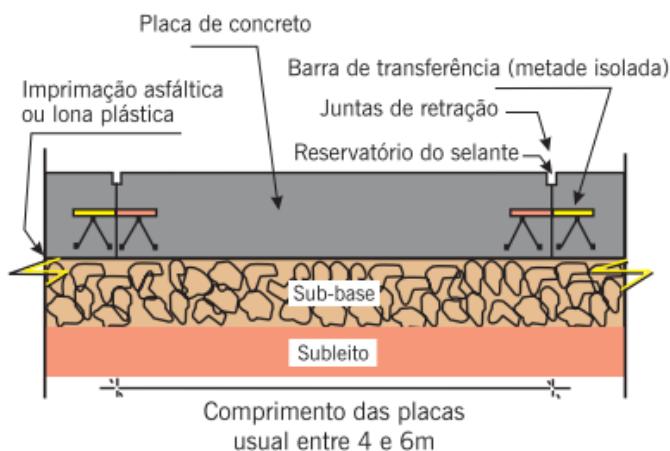


Figura 6 - Representação em corte transversal das camadas típicas do pavimento rígido (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

Uma das características desse pavimento é que ele possui uma vida útil significativamente maior que a do pavimento flexível, implicando em uma menor geração de resíduos, e que por sua vez, podem ter a parcela do concreto reciclada, tornando esse tipo de pavimento ambientalmente mais adequado. Outra particularidade do pavimento rígido é que, devido a sua maior resistência, ele não sofre deformações plásticas, nem buracos ou trilhas de rodas, o que acaba por exigir um menor número de intervenções para manutenção, diminuindo os transtornos gerados pelos reparos no pavimento (MASCHIO, 2021).

Apesar de possuir um custo inicial um pouco mais alto, se comparado ao pavimento flexível, no longo prazo esse tipo de pavimento acaba sendo mais econômico, como pode ser visto na Figura 7.

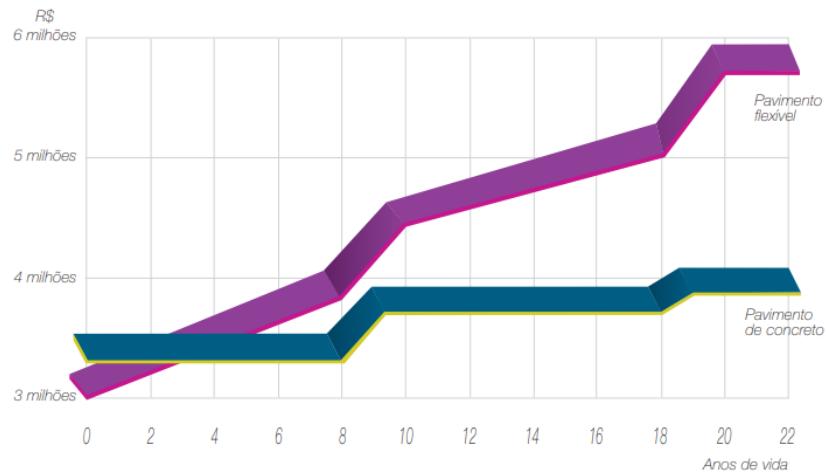


Figura 7 - Comparação entre os custos do pavimento rígido e flexível (ABCP, 2012).

Outra vantagem associada a esse tipo de pavimento é que ele melhora a visibilidade por reflexão devido à cor mais clara do concreto, proporcionando mais segurança aos condutores de veículos e uma maior economia de energia elétrica na iluminação pública. Além disso, no pavimento em concreto os veículos necessitam de uma menor distância de frenagem devido ao maior atrito da placa de concreto, fornecendo uma maior segurança aos motoristas. Esse tipo de pavimento também absorve menos energia solar, mantendo as pistas com temperaturas consideravelmente menores que as do pavimento asfáltico, contribuindo para um menor aquecimento do meio urbano (MASCHIO, 2021).

No caso de pavimentos em concreto, devido à elevada rigidez do revestimento em relação às demais camadas, as cargas de superfície são distribuídas por uma grande área em relação à área de contato pneu-pavimento, aliviando as tensões transmitidas às camadas subjacentes. Já nos pavimentos asfálticos as cargas de superfície são distribuídas em uma área mais restrita, em razão da maior flexibilidade do revestimento, fazendo com que as tensões sejam compartilhadas entre as diversas camadas (BATISTA, 2021). A Figura 8 ilustra a diferença entre a distribuição das cargas nos pavimentos flexível e rígido.

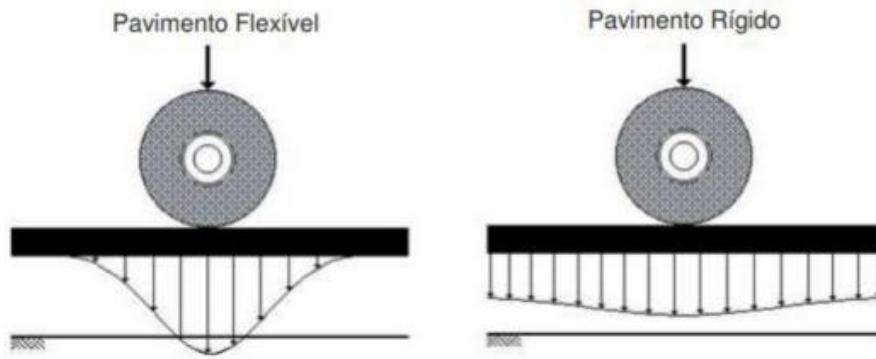


Figura 8 - Diferença entre os pavimentos flexível e rígido quanto à absorção das cargas (BALBO, 1993, *apud* BATISTA, 2021).

A partir disso, percebe-se que a placa de concreto do pavimento rígido suporta majoritariamente as cargas geradas pelo tráfego. Já no caso do pavimento flexível, o revestimento atua no sentido de impermeabilizar a superfície e de distribuir as cargas incidentes para as camadas subjacentes (DNIT, 2006a).

2.3 CAMADAS

A estrutura dos pavimentos é composta por camadas sobrepostas sobre o subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma dessas camadas, da rigidez delas e do subleito, bem como da interação entre as diferentes camadas do pavimento. Conceitualmente, os pavimentos podem ser constituídos de pelo menos duas camadas, a base e o revestimento. Entretanto, na maioria das vezes é necessário que existam camadas complementares à base, representadas pela sub-base e pelo reforço do subleito. A Figura 9 ilustra, de forma esquemática, a disposição das camadas de um típico pavimento flexível.

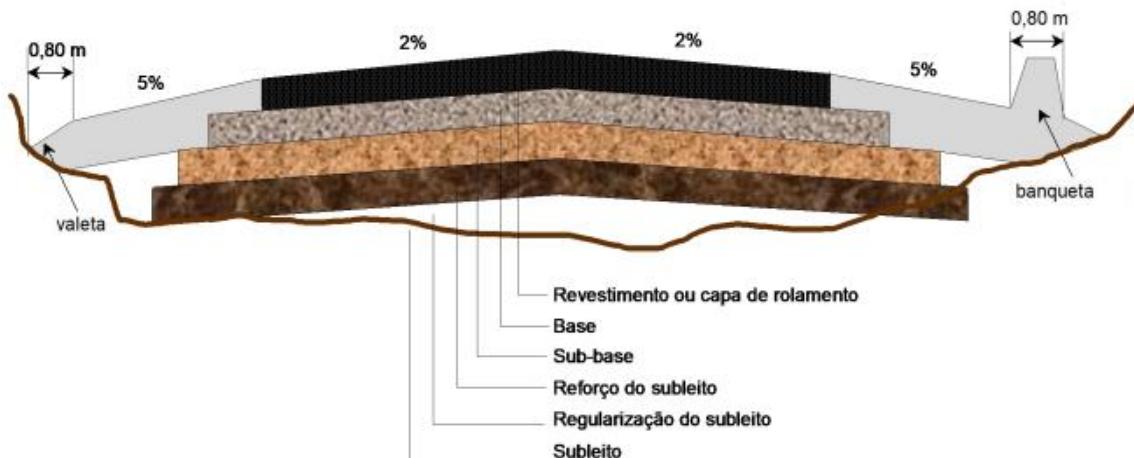


Figura 9 - Disposição das camadas típicas de um pavimento flexível (ODA, 2021).

No caso do pavimento rígido, a placa de concreto assume o lugar do revestimento e da base, e geralmente não se faz necessária a utilização da camada de reforço do subleito.

O pavimento deve ser dimensionado para o tráfego previsto no período de projeto e para as condições climáticas características do local de implementação. É importante que cada uma das camadas resista aos esforços solicitantes que chegam até ela, os transferindo às camadas subjacentes. A espessura das camadas e as propriedades físicas dos seus materiais influenciam diretamente nas tensões e deformações que a estrutura é capaz de suportar. Assim, cada camada precisa resistir a um número de repetições de solicitação de carga prevista para o tempo de projeto do pavimento, apresentando um comportamento pouco deformável e atendendo a permeabilidade necessária que cada camada deve possuir.

Desse modo, para o dimensionamento das camadas e escolha dos materiais a serem empregados no pavimento, as tensões e deslocamentos solicitantes devem estar compatibilizados com as propriedades dos materiais e espessuras de cada uma das camadas.

2.3.1 SUBLEITO

O subleito é o solo natural do local devidamente nivelado e compactado, atuando com a função de apoiar as camadas do pavimento e, normalmente, é caracterizado por possuir uma baixa capacidade de suporte.

Para que o material seja adequado para atuar como subleito ele deve possuir CBR (California Bearing Ratio) maior ou igual a 2%, e expansão menor ou igual a 2%. Caso esses requisitos não sejam atendidos, pode-se mudar o traçado da pista de forma a fazer com que ela passe sobre um terreno que atenda a essas exigências. Uma outra possibilidade é a substituição do material do subleito por outro de maior capacidade de suporte em pelo menos 1m de espessura.

Durante o serviço da terraplenagem é importante que se tomem os devidos cuidados para se obter um bom acabamento da superfície e uma satisfatória compactação do subleito (SENÇO, 2001). O preparo do subleito, se não for executado corretamente, pode comprometer todo o trabalho de pavimentação, uma vez que o subleito é o suporte sobre o qual as camadas do pavimento vão se apoiar.

2.3.2 REFORÇO DO SUBLEITO

O reforço do subleito é a camada situada imediatamente acima do subleito, sendo executada, na maioria das vezes, nas seguintes situações: quando o subleito é caracterizado por uma baixa resistência; quando o tráfego é intenso e/ou composto de muitos veículos pesados.

Geralmente a camada de reforço do subleito é dispensada em pavimentos rígidos pelo fato da placa de concreto transmitir de forma amortecida as pressões para as camadas subjacentes. Vale ressaltar que, quando o material do subleito possui baixa capacidade de suporte, pode ser economicamente interessante a utilização dessa camada com o objetivo de reduzir a espessura da placa de concreto.

Para que o material seja adequado ao uso no reforço do subleito ele deve possuir CBR maior que o do subleito e expansão menor ou igual a 2%. Dessa forma, é conferido a essa camada uma capacidade de suporte superior à do subleito.

Os solos ou outros materiais escolhidos para o reforço do subleito devem atender às condições de resistir às pressões aplicadas na interface entre a sub-base e o reforço, que são menores do que as pressões aplicadas na interface entre a base e a sub-base, mas que são maiores do que as pressões aplicadas na interface entre o reforço do subleito e o subleito (SENÇO, 2001).

2.3.3 SUB-BASE

É a camada complementar à base, e mesmo não sendo obrigatória, recomenda-se a sua utilização quando a camada da base é muito espessa, pois pode-se dividir a camada da base em duas camadas, criando-se a sub-base. Essa camada, por exigir um material de CBR inferior ao da base, acaba por proporcionar redução no custo de materiais. Ela tem o importante papel de evitar o bombeamento do solo da camada inferior para a camada da base, assim como atuar na drenagem contendo infiltrações e ascensões capilares.

No pavimento flexível a sub-base situa-se entre o reforço do subleito e a base, e no pavimento rígido se encontra imediatamente abaixo da placa de concreto de cimento Portland.

Para que o material seja adequado ao uso na sub-base ele deve possuir CBR maior ou igual a 20% e expansão menor ou igual a 1%. O material constituinte dessa camada deve apresentar características tecnológicas superiores às do material do reforço do subleito, ao passo que, o material da base deve ser de melhor qualidade do que o material da sub-base. Em geral, os materiais utilizados na sub-base são os seguintes: solos; solo-brita; solo-areia; brita graduada simples (BGS); brita graduada reciclada (BGR); solo melhorado com cimento; solo-cal.

2.3.4 BASE

É a camada situada acima da sub-base e imediatamente abaixo do revestimento, sendo a principal responsável por resistir aos esforços verticais, e por essa razão deve possuir uma boa capacidade de suporte. No pavimento flexível, fornece suporte estrutural ao revestimento, e no pavimento rígido, a placa de concreto já desempenha o papel da camada da base.

Assim como as demais camadas, a função da base é resistir às cargas oriundas do fluxo de veículos característicos da superfície de rolamento, e por estar mais próxima à capa de rolamento ela recebe as maiores tensões, necessitando de materiais de maior capacidade de suporte.

O material utilizado na camada da base deve possuir CBR maior ou igual a 80%, para o caso de tráfego pesado ($N > 10^6$), e CBR maior ou igual a 60%, quando o tráfego for médio ($N \leq 10^6$). Ademais, o material deve possuir: expansão menor ou igual a 0,5%,

limite de liquidez (LL) menor ou igual a 25% e índice de plasticidade (IP) menor ou igual a 6%. Os principais materiais usados na base do tipo granular são: brita graduada simples (BGS); solo estabilizado granulometricamente; solo-betume; laterita; solo-brita; solo-areia; resíduo de construção e demolição (RCD). Já os materiais usados em uma base rígida, estabilizada granulometricamente, são: brita graduada tratada com cimento (BGTC); concreto compactado ao rolo (CCR); solo-cimento; solo-cal.

Na Figura 10 é apresentada a classificação que o DNIT propõe para as camadas da base e sub-base, de acordo com as tipologias que se deseja projetar.

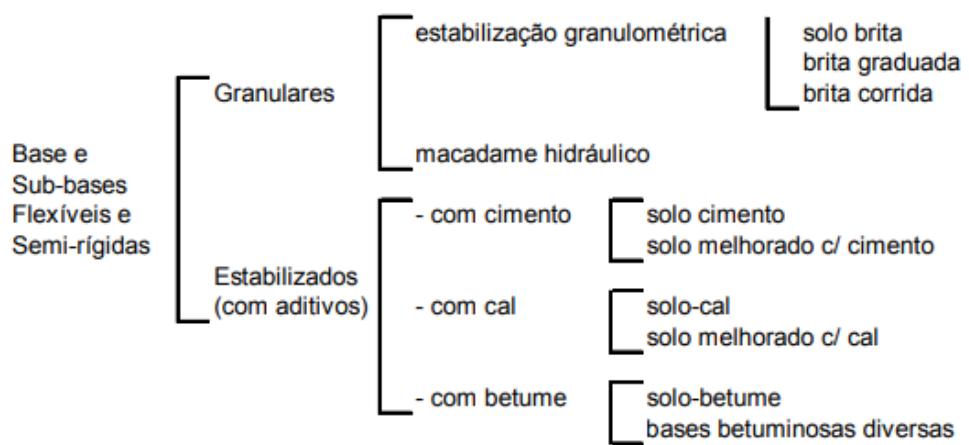


Figura 10 - Classificação da base e sub-base (DNIT, 2006a).

2.3.5 REVESTIMENTO

A camada de revestimento dos pavimentos é submetida a esforços de compressão e de tração devido à flexão, e as demais camadas ficam submetidas principalmente à compressão. Essa camada recebe diretamente as ações provocadas pelo tráfego e as intempéries do clima, atuando como protetora das camadas existentes abaixo dela. O revestimento deve resistir e transferir os esforços para as camadas subjacentes. Além disso, essa camada é essencial para promover a segurança e conforto aos condutores de veículos que trafegam pela via.

2.3.5.1 Revestimento Flexível

O revestimento flexível é responsável por receber e suportar a ação das cargas estáticas ou dinâmicas oriundas do tráfego. Apesar de possuir maior flexibilidade que o pavimento rígido, é importante que não haja grandes deformações elásticas ou plásticas. Em geral, é formado pela combinação de ligante asfáltico (asfalto) e agregado mineral, podendo ainda conter material de preenchimento (fíler mineral) e/ou aditivos para melhorar seu desempenho, como fibras, polímeros, borracha etc. O ligante asfáltico, que representa apenas 5% em peso da mistura, atua como um agente impermeabilizante e como elemento de ligação entre as partículas minerais, representando os 95% restantes em peso da mistura (ODA, 2021).

O asfalto utilizado na pavimentação flexível é um ligante impermeável à água e pouco reativo, sendo caracterizado como uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo cujo principal componente é o betume. Apesar da baixa reatividade química a muitos agentes, o asfalto sofre um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

É fundamental que a composição da mistura asfáltica seja determinada a partir de uma dosagem adequada, de forma que atenda às condições de tráfego, ao clima e aos critérios tecnológicos de execução.

Dependendo do projeto, a camada de revestimento flexível pode ser composta por duas camadas, existindo nesses casos a “camada de rolamento” e a “camada de ligação”. A camada de rolamento é a mais superficial do pavimento, sofrendo diretamente com as ações geradas pela passagem dos veículos e com as intempéries da natureza. Já a camada de ligação (binder) situa-se em uma posição intermediária entre a base e a camada de rolamento.

Os materiais mais usados para a confecção das misturas típicas do revestimento flexível são: cimento asfáltico de petróleo (CAP); brita; pó de pedra; areia natural, dependendo da disponibilidade dos outros agregados.

O revestimento flexível pode ser constituído de diferentes tipos de misturas, e as mais usuais são: concreto asfáltico (CA) ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ); concreto asfáltico modificado com polímeros; concreto asfáltico modificado com borracha; pré-misturado a frio (PMF); pré-misturado a quente (PMQ); tratamento

superficial simples (TSS); tratamento superficial duplo (TSD); tratamento superficial tripla (TST); camada porosa de atrito (CPA); stone matrix asphalt (SMA); areia-asfalto; gap-graded; microrrevestimento; dentre outras.

O concreto asfáltico é uma mistura asfáltica usinada a quente e é a mais utilizada como revestimento de pavimentos flexíveis no Brasil. Suas propriedades são muito sensíveis à variação do teor de asfalto. No caso do excesso de ligante asfáltico, mesmo estando dentro do admissível em usinas, pode gerar problemas de deformação permanente e/ou exsudação, com o fechamento da macrotextura superficial. Por sua vez, a falta de ligante gera um enfraquecimento da mistura e de sua resistência à formação de trincas, já que a resistência à tração é bastante afetada e sua vida de fadiga fica muito reduzida (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

2.3.5.2 Revestimento Rígido

O revestimento rígido é constituído de placas de concreto de cimento Portland de elevada rigidez, desempenhando simultaneamente a função de revestimento e base. Assim como qualquer outro revestimento, a placa de concreto é responsável por receber cargas estáticas ou dinâmicas, sem que sofra com a desagregação de componentes.

A placa de concreto, por possuir uma elevada rigidez em relação às demais camadas e uma espessura fixa em função da resistência à flexão da placa, absorve grande parte das tensões oriundas das cargas aplicadas, podendo ser dispensada a utilização da camada da base (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008).

Os materiais mais usados para a confecção das placas de concreto são: CP-II; CP-III; CP-V; areia natural; brita; aditivos. Em relação ao método construtivo, o comumente aplicado aos pavimentos rígidos consiste na execução de placas de concreto simples moldadas “in loco”, sem qualquer armadura ou fibras para aumentar a resistência do concreto. Após a moldagem das placas são serradas juntas de dilatação, tanto longitudinais quanto transversais (BALBO, 2009).

É essencial que a mistura precursora da placa de concreto seja dosada e ensaiada adequadamente, de forma que atenda às condições de tráfego, ao clima e aos critérios tecnológicos de execução. Vale ressaltar que, no pavimento rígido, é de extrema importância a realização de todas as etapas de controle tecnológico, uma vez que a

durabilidade do pavimento rígido é diretamente e sensivelmente relacionada à qualidade final da placa.

Existem diferentes tipos de pavimento rígido, e os mais usuais são: pavimento de concreto simples (PCS); pavimento de concreto armado (PCA); pavimento de concreto com armadura contínua (PCAC); pavimento de concreto protendido (PCPRO); pavimento de concreto pré-moldado (PCPM); whitetopping (WT); whitetopping ultradelgado (WTUD) (ABCP, 2012). A Figura 11 ilustra de forma esquemática alguns dos tipos de pavimentos rígidos que podem ser feitos.

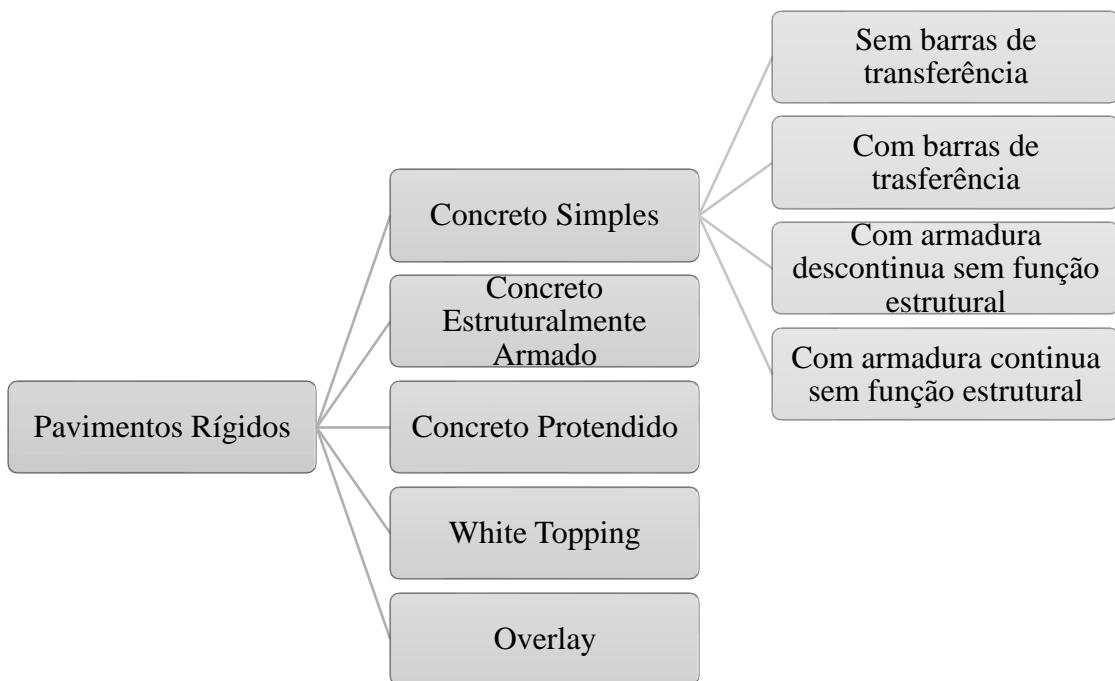


Figura 11 - Esquema representativo de alguns dos tipos de pavimentos rígidos (REALES, 2021).

O pavimento de concreto simples (PCS) é aquele no qual apenas o concreto resiste aos esforços solicitantes, tanto os de compressão quanto os de tração, sem que exista o uso de armadura. As placas são separadas por juntas longitudinais e transversais, moldadas ou serradas, que desempenham um importante papel na qualidade final da placa de concreto (OLIVEIRA, 2000).

As juntas longitudinais de articulação desempenham o papel de controlar e direcionar as fissuras longitudinais oriundas do empenamento da placa de concreto, podendo servir também como juntas de construção. Essas juntas podem ser dos tipos seção enfraquecida

ou encaixe “macho-e-fêmea”, podendo ambas as tipologias contar ou não com barras de ligação (ou ligadores) de aço corrugado. Considera-se adequado para pavimentos rodoviários um espaçamento compreendido na faixa de 3,5 m a 3,6 m (DNIT, 2005).

As juntas transversais são construídas no sentido da largura da placa de concreto, e quanto a sua serventia, podem ser dos seguintes tipos: de retração, de retração com barras de transferência, de construção, e de expansão. As juntas transversais de retração são utilizadas para controlar e direcionar as fissuras transversais oriundas da contração volumétrica do concreto, podendo ou não contar com barras de transferência (ou passadores). Quanto ao espaçamento, a experiência brasileira tem demonstrado que uma distância de até 6,0 m entre as juntas transversais é perfeitamente adequada às condições gerais (DNIT, 2005).

A Figura 12 ilustra o espaçamento recomendado para as juntas longitudinais e transversais, representando também a disposição das barras de ligação e barras de transferência no caso da utilização delas.

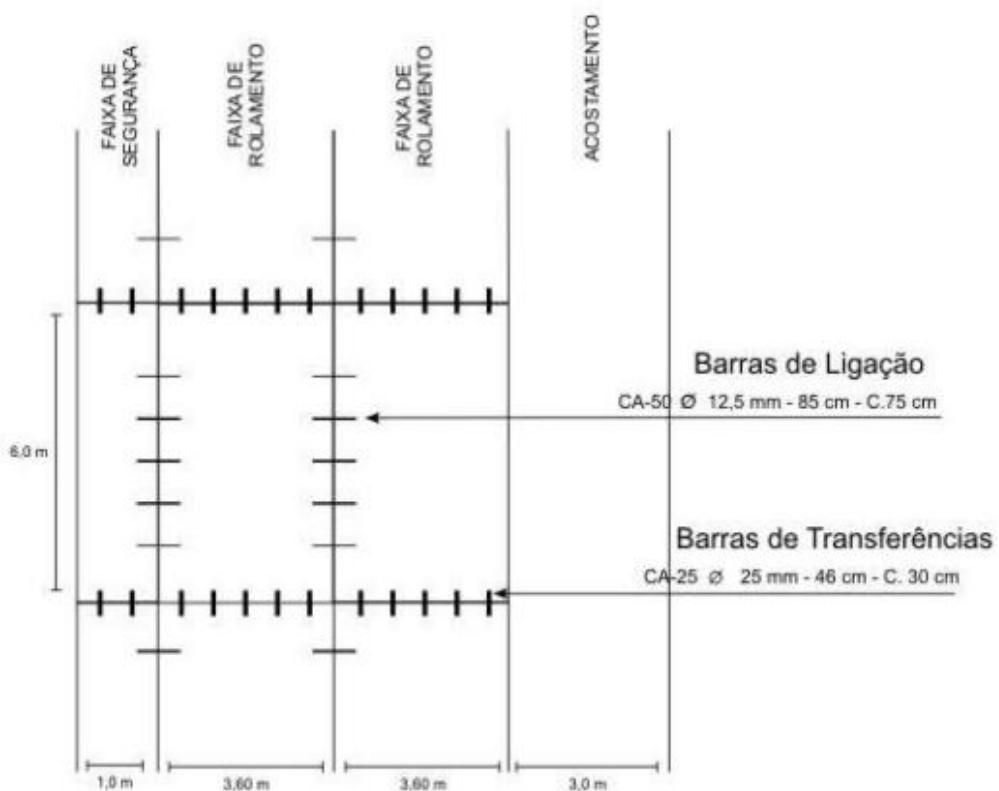


Figura 12 - Espaçamento recomendado para as juntas longitudinais e transversais, e representação da disposição das barras de ligação e de transferência (CAMPOS, 2019).

As barras de transferência são de aço liso (CA-25) e têm a função de transmitir esforços verticais entre placas adjacentes, permitindo a movimentação horizontal e restringindo o empenamento das placas. Por sua vez, isso acaba evitando a atuação brusca dos esforços verticais provocados pelas rodas dos veículos e assim, evita-se a ocorrência de “degraus” entre essas placas. É importante ressaltar que as barras de transferência não são consideradas armaduras, portanto não descharacterizam o pavimento de concreto simples (SILVA, 2019). Através da Figura 13, é possível ver que sem a utilização das barras de transferência existe a formação de um “degrau” no encontro de placas adjacentes, em decorrência da passagem da carga de uma placa para outra. A partir da Figura 14, é possível perceber que com a utilização das barras de transferência não há a formação desse desnível entre placas adjacentes, mesmo com a passagem da carga.

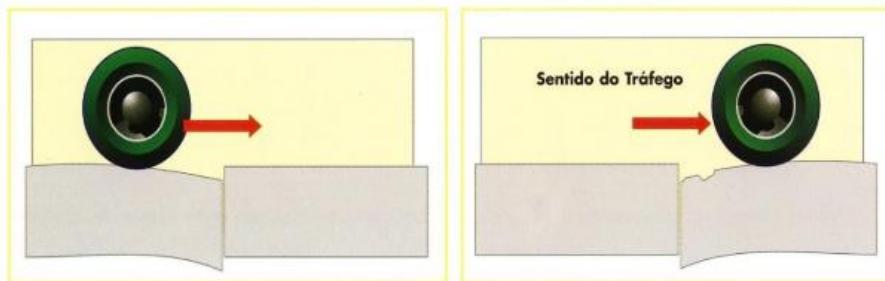


Figura 13 - Transição entre placas de concreto sem o uso de barras de transferência (SILVA, 2019).

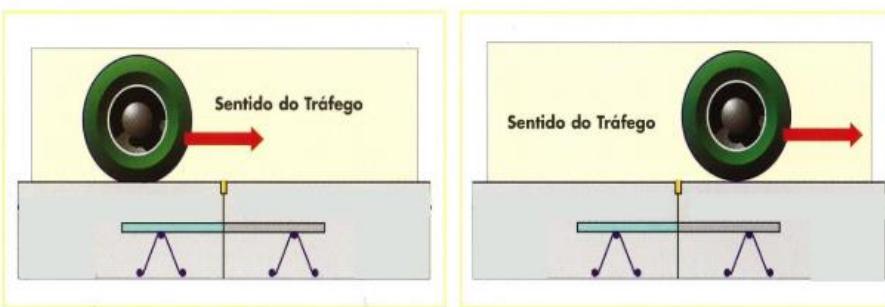


Figura 14 - Transição entre placas de concreto com o uso de barras de transferência (SILVA, 2019).

3 PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO

Este capítulo dedica-se ao projeto de dimensionamento dos pavimentos da Ilha do Fundão. O projeto foi dividido em duas partes, de acordo com o tipo de pavimento projetado, da seguinte forma: pavimento rígido, designado às vias principais, e pavimento flexível ou asfáltico, destinado às vias secundárias. Devido ao considerável volume de pessoas que tem como destino o Centro de Tecnologia, o Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza e o Prédio de Letras, foi considerada a entrada dos ônibus do BRT que passam pelo Terminal Aroldo Melodia (Fundão) para dentro da Ilha do Fundão, mais especificadamente, transitando apenas pelas vias principais. A Figura 15 ilustra o tipo de pavimento considerado para cada via, sendo que as vias marcadas em amarelo são reservadas ao pavimento rígido e as vias marcadas em vermelho reservam-se ao pavimento flexível.



Figura 15 - Vias a serem pavimentadas da Ilha do Fundão. As vias em amarelo são destinadas ao pavimento rígido e as vias em vermelho destinam-se ao pavimento asfáltico.

Através da planta em AutoCAD da Ilha do Fundão, fornecida pela Prefeitura Universitária, foram analisados os locais em que existia mudança na largura da via. Foi também através dessa planta que foram obtidas as medidas da largura de cada um dos

trechos considerados, e com isso identificou-se a área total a ser pavimentada. Por fim, a delimitação gráfica e obtenção da extensão de cada um dos trechos foi realizada com o auxílio do Google Earth Pro. A Tabela 2 mostra a extensão total e a área total das vias a serem pavimentadas para cada um dos tipos de pavimento.

Tabela 2 - Dimensões totais das vias a serem pavimentadas, separadas por tipo de pavimento.

Pavimento	Extensão a ser pavimentada	Área a ser pavimentada
Rígido	8628 m	84318 m ²
Flexível	11294 m	108344 m ²
TOTAL	19922 m	192661 m²

Em termos de porcentagem, o projeto em pavimento rígido representou 43,31% da extensão total a ser pavimentada e 43,76% da área total a ser pavimentada, enquanto o projeto em pavimento flexível compreendeu 56,69% da extensão total a ser pavimentada e 56,24% da área total a ser pavimentada.

Buscando-se um dimensionamento com medidas mais precisas, as vias foram divididas em diversos trechos de forma a considerar as diferentes larguras de cada uma das vias existentes. Ao todo, as vias foram divididas em 49 trechos diferentes, sendo 18 deles presentes nas vias principais e 31 existentes nas vias secundárias.

- **Contagem dos veículos**

Para que seja possível determinar o VDM da Ilha do Fundão, é necessário se ter os dados do fluxo e classificação dos veículos que transitam por lá.

Neste trabalho, a contagem e classificação dos veículos usada como base foi a realizada pelos alunos da disciplina Pavimentação B, do curso de Engenharia Civil da UFRJ, ministrada pela professora Sandra Oda no período 2016.1. Os dados dessa contagem foram obtidos no Trabalho de Conclusão de Curso da aluna Luma Reis Allers (2017).

A possibilidade da realização de uma contagem atualizada foi descartada pelo motivo de que o fluxo atual de veículos na Ilha do Fundão está muito menor, devido à pandemia provocada pela Covid – 19, o que levaria a um projeto de pavimento subdimensionado para o fluxo de veículos existente fora do período de pandemia. Dessa forma, foi

escolhido usar os dados de um período em que as atividades do Fundão estivessem em normalidade. Vale ressaltar que a Prefeitura da Ilha do Fundão não possuía dados que pudessem ser utilizados.

As contagens de tráfego foram realizadas em 11 postos distribuídos pela Ilha do Fundão, e foram feitas nos dias 28, 29 e 30 de junho de 2016, respectivos a terça-feira, quarta-feira e quinta-feira. Os postos de contagens foram distribuídos nas entradas e saídas da Ilha do Fundão e na via principal da Cidade Universitária, a Av. Horácio Macedo. Os veículos foram classificados como: carros, ônibus e caminhões.

Foram escolhidos os horários de maior fluxo de veículos, denominados horários de pico, para se realizar as contagens. Na Ilha do Fundão os horários de pico são: das 7h15 às 9h15 e das 16h15 às 18h15. A distribuição dos postos está apresentada na Figura 16 e a descrição/localização de cada posto consta na Tabela 3.



Figura 16 - Localização dos postos de contagem (ALLERS, 2017).

Tabela 3 - Descrição dos postos de contagem (ALLERS, 2017).

Nº do Posto	Descrição/Localização
1	Entrada do Fundão - Terminal do BRT
2	Saída do Fundão - Terminal do BRT
5	Entrada do Fundão - Prefeitura Universitária
6	Saída do Fundão - Prefeitura Universitária
7	Av. Horácio de Macedo (Sent. HU) - em frente ao CENPES
8	Av. Horácio de Macedo (Sent. Reitoria) - em frente ao CENPES
9	Entrada do Fundão - Linha Amarela
10	Saída do Fundão - Linha Amarela
11	Av. Horácio de Macedo (Sent. Reitoria) - em frente ao CT (Bloco H)
12	Av. Horácio de Macedo (Sent. HU) - em frente ao CT (Bloco H)
15	Saída do Fundão - Ponte do Saber

A Tabela 4 e a Tabela 5 resumem todos os dados coletados pelos 11 postos de contagem. É importante ressaltar que a contagem dos veículos não foi realizada de 15 em 15 min, não sendo possível determinar o valor de V_{15} . Desse modo, para este trabalho, foi considerado que o valor da contagem de 1h é o próprio VHP.

Tabela 4 - Resultado da contagem nas horas de pico da parte da manhã dos 11 postos distribuídos pela Ilha do Fundão (adaptado de ALLERS, 2017).

CONTAGEM DE VEÍCULOS NOS HORÁRIOS DE PICO DA MANHÃ (JUNHO DE 2016)							
Posto	Data	Período da Manhã (7h15 às 9h15)					
		Carro	Média	Ônibus	Média	Caminhão	Média
Posto 01	28/06/2016	1276	1219	280	255	13	10
	29/06/2016	1204		257		12	
	30/06/2016	1175		226		5	
Posto 02	28/06/2016	155	149	191	187	18	11
	29/06/2016	123		169		8	
	30/06/2016	167		201		6	
Posto 05	28/06/2016	3510	3495	40	44	96	85
	29/06/2016	3107		37		71	
	30/06/2016	3866		54		86	
Posto 06	28/06/2016	586	558	60	56	32	40
	29/06/2016	559		59		49	
	30/06/2016	529		47		39	
Posto 07	28/06/2016	1873	1774	170	162	19	34
	29/06/2016	1782		161		52	
	30/06/2016	1665		153		31	
Posto 08	28/06/2016	2884	2845	156	142	48	52
	29/06/2016	2941		132		58	
	30/06/2016	2710		136		50	
Posto 09	28/06/2016	3910	3820	73	76	15	20
	29/06/2016	3898		79		30	
	30/06/2016	3652		75		15	
Posto 10	28/06/2016	1062	1104	76	81	14	22
	29/06/2016	978		82		26	
	30/06/2016	1270		85		25	
Posto 11	28/06/2016	3591	3565	186	193	54	53
	29/06/2016	3578		203		51	
	30/06/2016	3524		189		52	
Posto 12	28/06/2016	428	411	134	139	19	22
	29/06/2016	456		147		35	
	30/06/2016	349		135		12	
Posto 15	28/06/2016	2198	2398	58	62	22	25
	29/06/2016	2446		55		26	
	30/06/2016	2548		73		27	

Tabela 5 - Resultado da contagem nas horas de pico da parte da tarde dos 11 postos distribuídos pela Ilha do Fundão (adaptado de ALLERS, 2017).

CONTAGEM DE VEÍCULOS NOS HORÁRIOS DE PICO DA TARDE (JUNHO DE 2016)							
Posto	Data	Período da Tarde (16h15 às 18h15)					
		Carro	Média	Ônibus	Média	Caminhão	Média
Posto 01	28/06/2016	213	831	228	255	13	21
	29/06/2016	1940		278		38	
	30/06/2016	340		258		11	
Posto 02	28/06/2016	757	662	147	167	22	38
	29/06/2016	216		203		64	
	30/06/2016	1011		150		28	
Posto 05	28/06/2016	740	1001	26	27	42	39
	29/06/2016	1089		30		38	
	30/06/2016	1173		23		36	
Posto 06	28/06/2016	1281	1503	80	71	83	83
	29/06/2016	1596		61		95	
	30/06/2016	1630		72		71	
Posto 07	28/06/2016	1995	2817	126	123	81	97
	29/06/2016	3567		125		118	
	30/06/2016	2889		118		91	
Posto 08	28/06/2016	1245	1504	136	133	16	13
	29/06/2016	1534		135		7	
	30/06/2016	1733		128		14	
Posto 09	28/06/2016	853	1661	49	44	46	60
	29/06/2016	2468		32		81	
	30/06/2016	1662		49		53	
Posto 10	28/06/2016	954	1131	67	66	18	23
	29/06/2016	912		62		21	
	30/06/2016	1526		68		28	
Posto 11	28/06/2016	1917	2044	202	187	25	21
	29/06/2016	2241		168		20	
	30/06/2016	1973		190		16	
Posto 12	28/06/2016	1115	1176	121	117	27	29
	29/06/2016	1193		126		29	
	30/06/2016	1218		103		31	
Posto 15	28/06/2016	2185	2266	111	103	6	5
	29/06/2016	2601		105		6	
	30/06/2016	2011		93		2	

Para a determinação do VDM do projeto em pavimento rígido foram considerados os postos localizados nas vias a serem projetadas com esse tipo de pavimento, e isso inclui os postos 1, 2, 7, 8, 11 e 12. No caso do projeto em pavimento flexível, foram utilizados para a determinação do VDM os postos 5, 6, 9 ,10 e 15.

Vale ressaltar que, nessa contagem, não estão inclusos os ônibus do BRT. Por isso, para o dimensionamento das vias principais, o VDM oriundo da contagem foi acrescido do VDM referente aos ônibus do BRT que passam pelo Terminal Aroldo Melodia (Fundão).

3.1 VIAS PRINCIPAIS - PAVIMENTO RÍGIDO

Para as vias principais foi escolhido o pavimento de concreto simples (PCS) e todo o dimensionamento do pavimento rígido foi feito através do método PCA-84. Nesse método, são avaliados em conjunto dois modos de falha: falha por fadiga e falha por erosão. A falha por fadiga ocorre, em geral, na parte central da placa devido à aplicação de carga nas bordas da placa, pois cargas nessa posição produzem as maiores tensões de flexão no meio da placa. A falha por erosão é ocasionada pela compressão da fundação, sendo as bordas das placas os locais que mais sofrem com esse tipo de falha. Isso ocorre devido ao fato das cargas aplicadas nos cantos causarem as piores deflexões nessa região, o que por sua vez provoca erosão do material da fundação (BALBO, 2009).

O método PCA-84 consiste em realizar análises estruturais com o uso de ábacos gerados a partir de análises por elementos finitos e para isso, será necessário definir os parâmetros listados a seguir (DNIT, 2005):

- Se há ou não acostamento nas vias;
- Se as juntas contam ou não com barras de transferência;
- Resistência à tração na flexão do concreto aos 28 dias;
- Coeficiente de recalque (k);
- Fator de segurança para as cargas (FSC);
- Tráfego esperado para cada nível de carga e de acordo com a vida útil de projeto do pavimento.

Todos os pontos listados serão devidamente definidos ao longo deste capítulo.

Para este projeto, considerou-se a utilização de barras de transferência nas juntas transversais entre as placas de concreto, e como todas as vias principais possuem largura superior a 3,6 m, torna-se imprescindível a presença de juntas longitudinais ao longo dessas vias.

Para o dimensionamento do pavimento rígido é estipulado inicialmente uma espessura para a placa de concreto e em seguida são feitas as verificações quanto às falhas, e caso a espessura escolhida seja insuficiente, deve-se repetir o cálculo com uma espessura maior. Seguindo o procedimento descrito, a espessura testada inicialmente foi de:

$$\textbf{\textit{Espessura da placa}} = 25 \text{ cm}$$

Para a determinação do número admissível de repetições em função do fator de erosão e de fadiga foram utilizadas as cargas dos eixos corrigidas, isto é, as cargas dos eixos multiplicadas por um Fator de Segurança para as Cargas (FSC). Neste projeto, por se tratar de uma via de moderada frequência de caminhões, foi utilizado o FSC = 1,1. Esse valor foi obtido através da Tabela 6, e na Tabela 7 são apresentados os valores das cargas corrigidas para cada um dos tipos de eixo.

Tabela 6 - Fatores de Segurança para as Cargas (FSC) (DNIT, 2005).

Tipo de Pavimento	FSC
– para ruas com tráfego com pequena porcentagem de caminhões e pisos em condições semelhantes de tráfego (estacionamentos, por exemplo)	1,0
– para estradas e vias com moderada frequência de caminhões	1,1
– para altos volumes de caminhões	1,2
– pavimentos que necessitem de um desempenho acima do normal	Até 1,5

Tabela 7 - Cargas corrigidas dos eixos.

Tipo de eixo	Carga do eixo (t)	Carga corrigida (t)
ESRS	6	6,6
ESRD	10	11
ETD	13,5	14,85
ETD-B	17	18,7

3.1.1 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO (VDM)

Para o dimensionamento do pavimento rígido é preciso ser calculado o VDM para, através dele, ser determinado o Volume Diário Médio Anual (VDMA). Para este projeto, foi considerado que todas as vias recrutadas para terem pavimento rígido possuem o mesmo valor de VDM, e consequentemente o mesmo VDMA, que é o VDM multiplicado por 365 dias. A Tabela 8 contém os dados de contagem dos postos 1, 2, 7, 8, 11 e 12, que são localizados nas vias principais, e apresenta a média entre os valores obtidos de contagem nos três dias consecutivos para cada um dos tipos de veículos.

Como o dimensionamento de pavimentos rígidos desconsidera a influência dos veículos leves, que neste caso são representados pelos carros de passeio, foram calculados os valores de VDM apenas para os ônibus e caminhões.

Tabela 8 - Médias das contagens dos postos das vias principais. As maiores médias encontram-se marcadas em azul (adaptado de ALLERS, 2017).

CONTAGEM DE VEÍCULOS NOS HORÁRIOS DE PICO EM JUNHO DE 2016: POSTOS NAS VIAS PRINCIPAIS					
Posto	Data	Período da Manhã (7h15 às 9h15)		Período da Tarde (16h15 às 18h15)	
		Ônibus	Caminhão	Ônibus	Caminhão
Posto 01	28/06/2016	255	10	255	21
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 02	28/06/2016	187	11	167	38
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 07	28/06/2016	162	34	123	97
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 08	28/06/2016	142	52	133	13
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 11	28/06/2016	193	53	187	21
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 12	28/06/2016	139	22	117	29
	29/06/2016				
	30/06/2016				

Considerando cada um dos tipos de veículos, foram escolhidas as maiores médias, de forma que o VDM pudesse atender à maior solicitação. A escolha englobou os períodos de contagem da manhã e da tarde. Como os valores médios considerados referem-se a um intervalo de contagem de 2h, os valores foram divididos por dois para se obter o valor médio correspondente a 1h de contagem para cada tipo de veículo. A Tabela 9 resume os valores encontrados a partir do que foi descrito anteriormente.

Tabela 9 - Maiores médias do número de veículos contados no horário de pico:
Vias Principais.

Intervalo	Ônibus	Caminhão
2h	255	97
1h	128	49

* Número de veículos contados em junho de 2016.

Assim, dividindo-se os valores considerados como VHP pelo fator k , definiu-se o valor de VDM do ano de 2016 para cada um dos tipos de veículos. O valor do fator k utilizado foi de 0,091 e teve sua obtenção a partir do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006b), sendo apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Fatores de k típicos nas vias norte-americanas (DNIT, 2006b).

Tipo de Área	Fator k
Urbana	9,1%
Suburbana	9,3%
Rural em Transição para Urbana	9,3%
Rural Desenvolvida	9,5%
Rural Subdesenvolvida	10,0%

$$VDM_{2016: ÔNIBUS} = \frac{128}{0,091} = 1406,59 \rightarrow 1407$$

$$VDM_{2016: CAMINHÃO} = \frac{49}{0,091} = 538,46 \rightarrow 539$$

Para a utilização dos valores do ano de 2016 foi necessário ser feita a “atualização” deles, isto é, trazer para o presente os valores, e para isso, considerou-se um crescimento exponencial fazendo-se o uso das taxas de crescimento presentes na Tabela 11.

Tabela 11 - Taxas de crescimento dos veículos.

Veículo	Taxa de crescimento
Ônibus	3%
Caminhão	1%

Foi considerada uma taxa de crescimento de caminhões inferior à dos ônibus, pois no período em que foi realizada a contagem, estavam acontecendo diversas obras no Parque Tecnológico, e por isso, havia um fluxo de caminhões elevado. Do ano de 2016 até o ano de 2022 passaram-se 6 anos, portanto, $n = 6$.

Dessa forma, tem-se que:

$$VDM_{final} = VDM_{inicial}(1 + Taxa\ de\ crescimento)^n$$

$$VDM_{2022:\hat{\text{ÔNIBUS}}} = 1407 (1 + 0,03)^6 = 1680,03 \rightarrow \mathbf{1681}$$

$$VDM_{2022:\text{CAMINHÃO}} = 539 (1 + 0,01)^6 = 572,16 \rightarrow \mathbf{573}$$

3.1.1.1 Cálculo do VDM dos ônibus do BRT

Diferente de como foi realizado o cálculo do VDM para os ônibus comuns e caminhões, a definição do VDM dos ônibus do BRT não foi baseada nos dados de contagem da aluna Luma Reis Allers (2017). No caso dos ônibus do BRT, como eles possuem horários pré-estabelecidos, foram analisados seus intervalos de passagem de forma a contabilizar o número de BRTs relacionados a um tempo de contagem de 1h, sendo esse último subdividido em quatro intervalos iguais de 15 min.

Foi analisado o intervalo de passagem dos ônibus no terminal do BRT Aroldo Melodia (Fundão). Nesse terminal passam duas linhas, o BRT 38 e o BRT 42A, porém, como elas possuem horários de funcionamento alternados, não há sobreposição da passagem dos ônibus das duas linhas. No que diz respeito à frequência dos ônibus, o intervalo de tempo

entre dois ônibus é de 10 min, sendo o sentido de percurso de ônibus consecutivos alternado entre: Fundão-Galeão e Fundão-Alvorada. Assim, em 1h tem-se um total de 6 ônibus e considerando-se a contagem de 15 em 15 min, a distribuição da quantidade de ônibus do BRT se dá conforme representado na Tabela 12.

Tabela 12 - Distribuição da passagem de ônibus do BRT no intervalo de 1h, contados de 15 em 15 min.

	1 Hora				Total
	15 min	15 min	15 min	15 min	
Nº de ônibus do BRT	2	1	2	1	6

Definiu-se, então, o VHP utilizando o maior número de ônibus contabilizados em 15 minutos, que no caso foi o valor $V_{15} = 2$. Em seguida, calculou-se o valor do VDM utilizando o valor de VHP e o valor do fator $k = 0,091$, como mostrado a seguir.

$$VHP = 4 \times V_{15}$$

$$VHP = 4 \times 2 = 8$$

$$VDM = \frac{VHP}{k}$$

$$VDM_{2022: ônibus BRT} = \frac{8}{0,091} = \mathbf{88}$$

3.1.2 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO ANUAL (VDMA)

Após a definição dos valores de VDM para cada um dos tipos de veículos pesados, realizou-se a projeção desses valores e o cálculo dos VDMA para os 20 anos de projeto. Para a projeção dos eixos que irão solicitar o pavimento, utilizou-se o valor do VDMA acumulado durante a vida útil do pavimento projetado. Para os anos de projeto considerou-se que o crescimento é do tipo exponencial e com as mesmas taxas anuais de crescimento apresentadas anteriormente na Tabela 11. A Tabela 13 apresenta o cálculo do VDM e VDMA para cada um dos anos de projeto e ao final, apresenta o valor acumulado de VDMA para cada tipo de veículo.

Tabela 13 - VDM, VDMA dos anos de projeto e o VDMA acumulado para 20 anos.

Ano		Ônibus		Ônibus do BRT		Caminhão	
		VDM	VDMA	VDM	VDMA	VDM	VDMA
2022	0	1681	-	88	-	573	-
2023	1	1731	631972	91	33084	579	211236
2024	2	1783	650931	93	34076	585	213349
2025	3	1837	670459	96	35098	590	215482
2026	4	1892	690573	99	36151	596	217637
2027	5	1949	711290	102	37236	602	219813
2028	6	2007	732629	105	38353	608	222012
2029	7	2067	754608	108	39504	614	224232
2030	8	2129	777246	111	40689	620	226474
2031	9	2193	800563	115	41909	627	228739
2032	10	2259	824580	118	43167	633	231026
2033	11	2327	849317	122	44462	639	233336
2034	12	2397	874797	125	45795	646	235670
2035	13	2469	901041	129	47169	652	238027
2036	14	2543	928072	133	48584	659	240407
2037	15	2619	955914	137	50042	665	242811
2038	16	2698	984592	141	51543	672	245239
2039	17	2778	1014129	145	53089	679	247691
2040	18	2862	1044553	150	54682	685	250168
2041	19	2948	1075890	154	56323	692	252670
2042	20	3036	1108167	159	58012	699	255197
VDMA acumulado		16.981.323		888.969		4.651.217	

Os valores acumulados de VDMA, utilizados para a determinação da projeção de eixos, constam na Tabela 14.

Tabela 14 - VDMA acumulado nos 20 anos de projeto.

Veículo	VDMA acumulado em 20 anos
Ônibus	16.981.323
Ônibus do BRT	888.969
Caminhão	4.651.217

3.1.3 CÁLCULO DA PROJEÇÃO DE EIXOS POR CLASSE DE CARGA

Para se projetar os eixos por classe de carga deve-se conhecer o tipo de eixo que compõe cada tipo de veículo. Na Figura 17 são apresentados os eixos considerados no dimensionamento do pavimento rígido.

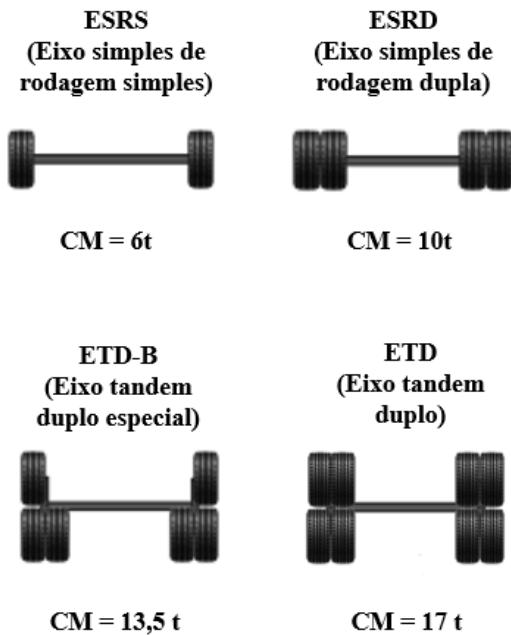


Figura 17 - Tipos de eixos considerados no dimensionamento do pavimento rígido (adaptado de LEME, 2021).

Os ônibus que transitam pela Ilha do Fundão são os padrões do transporte público. Segundo a tabela do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006b), esses ônibus são do tipo 2CB, possuindo um eixo dianteiro simples com rodagem simples (ESRS), que possui carga máxima (CM) de 6 t, e um eixo traseiro simples com rodagem dupla (ESRD), que possui carga máxima (CM) de 10 t. A Figura 18 representa a classificação desses ônibus.

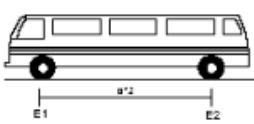
	2	16(16,8)	ÔNIBUS E1 = ES. RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t $d12 \leq 3,50\text{m}$	2CB
---	----------	-----------------	---	------------

Figura 18 - Classificação dos ônibus padrões que circulam pela Ilha do Fundão (DNIT, 2006b).

Os ônibus do BRT são do tipo articulado, sendo compostos de um eixo dianteiro simples com rodagem simples (ESRS), que possui carga máxima (CM) de 6 t, um eixo

intermediário simples com rodagem dupla (ESRD), que possui carga máxima (CM) de 10 t, e um eixo traseiro em tandem duplo especial (ETD-B), que possui carga máxima (CM) de 13,5 t.

Os caminhões contabilizados foram os do tipo 3C, caracterizados por um eixo dianteiro simples com rodagem simples (ESRS), que possui carga máxima (CM) de 6 t, e um eixo traseiro tandem duplo (ETD), que possui carga máxima (CM) de 17 t. A Figura 19 representa a classificação desses caminhões.

	3	23(24,2)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = ES, RS, CM = 6t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t $d_{12} > 2,40m$ $1,20m < d_{23} \leq 2,40m$	3C
--	---	-----------------	---	----

Figura 19 - Classificação dos caminhões que circulam pela Ilha do Fundão (DNIT, 2006b).

De posse do valor de VDMA acumulado para o tempo de 20 anos, considerando-se cada um dos tipos de veículos separadamente, e conhecendo-se os tipos de eixo presentes nesses veículos, determinou-se a quantidade de repetições que cada um dos tipos de eixo terá durante os 20 anos de projeto. A Tabela 15 apresenta o cálculo da projeção de repetição de cada um dos eixos para os 20 anos de projeto.

Tabela 15 - Projeção de eixos totais para os 20 anos de projeto.

Tipos de Eixo	Carga (t)	ÔNIBUS		CAMINHÃO	Total de Eixos
		Comum (2CB)	Articulado BRT	3C	
Volume de Veículos Comerciais para o Período de Projeto					
ESRS	6	16.981.323	888.969	4.651.217	22.521.509
ESRD	10	16.981.323	888.969		17.870.292
ETD-B	13,5		888.969		888.969
ETD	17			4.651.217	4.651.217

3.1.4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE RECALQUE (k)

Para o dimensionamento da espessura do pavimento rígido, o parâmetro coeficiente de recalque (k), também denominado de Módulo de Reação ou Módulo de Westergaard, deve ser definido (DNIT, 2005).

Para a definição desse coeficiente é preciso da informação do CBR do subleito, bem como da espessura e material da camada de sub-base. O CBR do subleito foi considerado como sendo o mínimo, de valor igual a 3%, e o material escolhido para a sub-base foi a Brita Graduada Simples (BGS) com uma espessura de 15 cm, que é a mínima dimensão recomendada pelo DNIT (2005) para essa camada.

Para a avaliação preliminar do coeficiente de recalque (k) do sistema subleito / sub-base, foi utilizado o ábaco apresentado na Figura 20.

Dessa forma, o valor encontrado para o coeficiente de recalque (k) foi o seguinte:

$$k = 37 \text{ MPa/m}$$

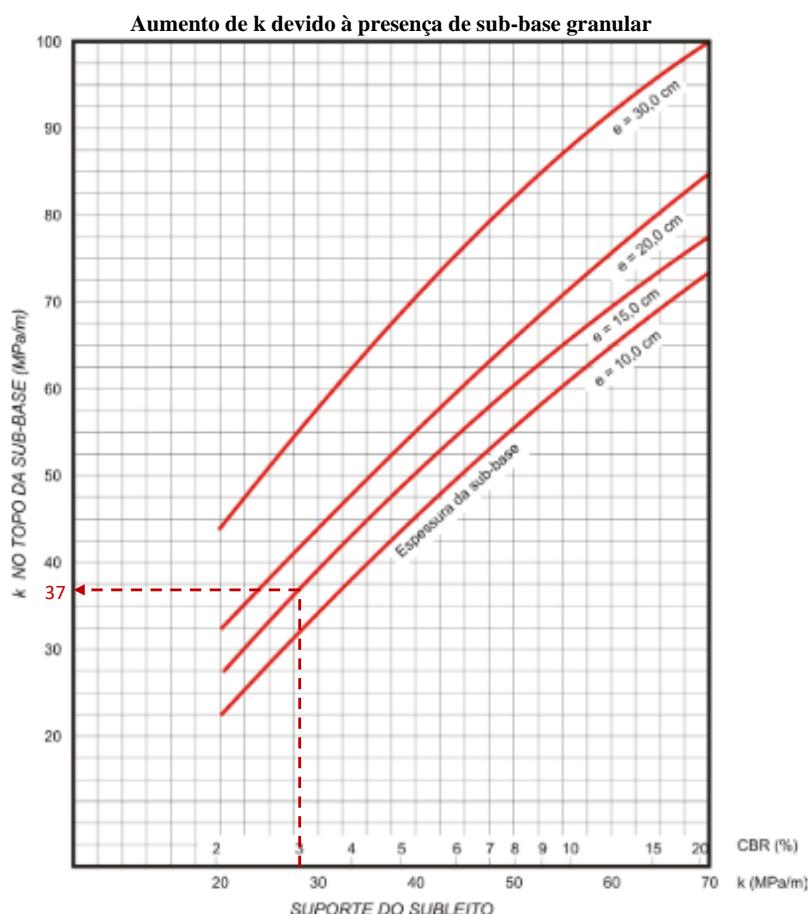


Figura 20 - Ábaco de definição do coeficiente de recalque k (adaptado de DNIT, 2005).

3.1.5 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO EQUIVALENTE

A tensão equivalente foi determinada para os dois tipos de eixo, o simples e o tandem duplo. Vale ressaltar que o tipo de rodagem do eixo não é considerado para esse cálculo.

Os valores para o cálculo da tensão equivalente foram obtidos através da Figura 21, que relaciona a espessura da placa de concreto com o coeficiente de recalque (k). Como o valor de $k = 37 \text{ MPa/m}$ está situado entre 20 e 40, foi feita uma ponderação de forma a obter o valor correspondente a esse coeficiente de recalque. Para a escolha do quadro da Figura 21, também foi levado em consideração o fato das vias a serem pavimentadas em concreto não possuírem acostamento, devido à falta de espaço.

Tensão Equivalente para Eixos Simples e Eixos Tandem Duplos (Mpa)
PCAC (pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		180	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	4,30	3,56	3,78	3,01	3,51	2,81	3,31	2,68	3,17	2,57	2,91	2,43	2,74	2,35
13	3,84	2,33	3,38	2,73	3,14	2,53	2,97	2,40	2,84	2,30	2,61	2,16	2,46	2,08
14	3,46	2,96	3,05	2,49	2,83	2,29	2,68	2,16	2,56	2,08	2,37	1,94	2,23	1,85
15	3,14	2,72	2,27	2,29	2,57	2,09	2,44	1,97	2,33	1,88	2,16	1,75	2,04	1,67
16	2,87	2,52	2,53	2,12	2,35	1,93	2,23	1,81	2,13	1,73	1,97	1,60	1,87	1,52
17	2,63	2,35	2,33	1,97	2,16	1,79	2,05	1,67	1,96	1,60	1,81	1,47	1,72	1,39
18	2,43	2,20	2,15	1,84	1,99	1,66	1,89	1,55	1,81	1,48	1,68	1,36	1,59	1,28
19	2,25	2,07	1,99	1,72	1,85	1,56	1,75	1,45	1,68	1,38	1,56	1,26	1,48	1,19
20	2,10	1,95	1,85	1,62	1,72	1,46	1,64	1,36	1,56	1,29	1,45	1,18	1,38	1,11
21	1,96	1,85	1,73	1,53	1,61	1,38	1,52	1,29	1,46	1,22	1,36	1,11	1,28	1,04
22	1,83	1,75	1,62	1,45	1,50	1,31	1,42	1,22	1,37	1,15	1,28	1,05	1,20	0,98
23	1,72	1,67	1,52	1,38	1,41	1,24	1,33	1,15	1,28	1,09	1,20	0,99	1,13	0,92
24	1,62	1,59	1,43	1,31	1,33	1,18	1,25	1,10	1,21	1,04	1,13	0,94	1,07	0,88
25	1,53	1,52	1,35	1,25	1,26	1,12	1,19	1,05	1,14	0,99	1,07	0,89	1,01	0,83
26	1,45	1,45	1,28	1,20	1,19	1,07	1,13	1,00	1,08	0,94	1,01	0,85	0,95	0,80
27	1,38	1,39	1,21	1,15	1,13	1,03	1,07	0,95	1,03	0,90	0,95	0,81	0,90	0,76
28	1,31	1,34	1,15	1,10	1,07	0,99	1,02	0,91	0,98	0,86	0,90	0,78	0,86	0,73
29	1,25	1,29	1,10	1,06	1,02	0,95	0,97	0,88	0,93	0,83	0,86	0,75	0,82	0,69
30	1,19	1,24	1,05	1,02	0,97	0,91	0,92	0,85	0,89	0,80	0,82	0,72	0,78	0,66
31	1,13	1,20	1,00	0,99	0,93	0,88	0,88	0,81	0,84	0,77	0,78	0,69	0,74	0,64
32	1,09	1,16	0,96	0,95	0,89	0,85	0,84	0,78	0,80	0,74	0,75	0,67	0,71	0,62
33	1,04	1,12	0,92	0,92	0,85	0,82	0,80	0,76	0,77	0,71	0,72	0,64	0,68	0,60
34	1,00	1,08	0,88	0,89	0,81	0,79	0,77	0,73	0,73	0,69	0,69	0,62	0,66	0,58

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Figura 21 - Quadro para a determinação da tensão equivalente (adaptado de DNIT, 2005).

Dessa forma, as tensões equivalentes valem:

⇒ Eixo Simples:

$$\frac{40 - 20}{1,35 - 1,53} = \frac{37 - 20}{x - 1,53} \rightarrow x = 1,377 \rightarrow \text{Tensão equivalente} = 1,377 \text{ MPa}$$

⇒ Eixo Duplo:

$$\frac{40 - 20}{1,25 - 1,52} = \frac{37 - 20}{x - 1,52} \rightarrow x = 1,291 \rightarrow \text{Tensão equivalente} = 1,291 \text{ MPa}$$

3.1.6 ANÁLISE DE EROSÃO

Neste item calcula-se o fator de erosão e determina-se o número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão.

O cálculo do fator de erosão é análogo ao da determinação da tensão equivalente, utilizando-se a Figura 22 para relacionar a espessura da placa de concreto com o coeficiente de recalque (k), fazendo-se a ponderação de forma a obter o valor correspondente ao coeficiente de recalque de 37 MPa/m. Para a escolha do quadro da Figura 22, foi levado em consideração o fato das vias não possuírem acostamento e a informação das placas possuírem barras de transferências nas juntas.

Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos JSP e PCAC
(Junta com barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)													
	20		40		60		80		100		150		200	
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD
12	3,51	3,61	3,50	3,57	3,49	3,54	3,48	3,52	3,48	3,51	3,47	3,49	3,45	3,47
13	3,41	3,53	3,39	3,48	3,39	3,45	3,38	3,43	3,38	3,41	3,37	3,39	3,35	3,37
14	3,32	3,45	3,30	3,39	3,29	3,36	3,28	3,34	3,28	3,33	3,27	3,30	3,25	3,28
15	3,23	3,45	3,21	3,31	3,20	3,28	3,19	3,26	3,19	3,24	3,18	3,22	3,16	3,20
16	3,15	3,37	3,12	3,24	3,12	3,21	3,10	3,18	3,10	3,17	3,09	3,14	3,08	3,12
17	3,07	3,30	3,05	3,17	3,04	3,14	3,02	3,11	3,02	3,10	3,01	3,07	3,00	3,04
18	2,99	3,24	2,97	3,11	2,96	3,07	2,95	3,05	2,94	3,03	2,93	3,00	2,92	2,97
19	2,93	3,18	2,90	3,05	2,89	3,01	2,88	2,98	2,87	2,97	2,86	2,93	2,85	2,91
20	2,86	3,12	2,83	3,00	2,83	2,95	2,81	2,92	2,80	2,91	2,79	2,87	2,79	2,84
21	2,80	3,06	2,77	2,93	2,76	2,89	2,74	2,86	2,74	2,85	2,73	2,81	2,72	2,78
22	2,74	3,01	2,71	2,88	2,70	2,84	2,68	2,81	2,68	2,80	2,67	2,76	2,66	2,73
23	2,68	2,96	2,65	2,83	2,64	2,79	2,62	2,76	2,62	2,74	2,61	2,70	2,59	2,67
24	2,63	2,91	2,60	2,78	2,59	2,74	2,57	2,71	2,56	2,69	2,55	2,65	2,54	2,62
25	2,58	2,87	2,54	2,74	2,54	2,69	2,52	2,67	2,51	2,65	2,50	2,60	2,49	2,57
26	2,53	2,83	2,50	2,70	2,49	2,65	2,47	2,62	2,46	2,61	2,45	2,56	2,44	2,53
27	2,48	2,79	2,45	2,66	2,44	2,61	2,42	2,58	2,41	2,57	2,40	2,52	2,39	2,49
28	2,43	2,75	2,40	2,63	2,39	2,57	2,37	2,54	2,37	2,53	2,35	2,48	2,34	2,45
29	2,39	2,72	2,36	2,59	2,35	2,54	2,33	2,51	2,32	2,49	2,31	2,44	2,30	2,41
30	2,43	2,69	2,31	2,56	2,30	2,50	2,28	2,47	2,28	2,45	2,26	2,41	2,25	2,37
31	2,30	2,65	2,27	2,52	2,26	2,47	2,24	2,43	2,24	2,43	2,22	2,37	2,21	2,34
32	2,26	2,62	2,23	2,49	2,22	2,43	2,20	2,40	2,19	2,38	2,18	2,33	2,17	2,30
33	2,22	2,59	2,19	2,46	2,18	2,40	2,16	2,37	2,15	2,35	2,14	2,30	2,13	2,27
34	2,18	2,56	2,15	2,43	2,14	2,37	2,12	2,33	2,12	2,32	2,10	2,27	2,09	2,24

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Figura 22 - Quadro para a determinação do fator de erosão (adaptado de DNIT, 2005).

Dessa forma, os fatores de erosão valem:

⇒ Eixo Simples:

$$\frac{40 - 20}{2,54 - 2,58} = \frac{37 - 20}{x - 2,58} \rightarrow x = 2,546 \rightarrow \text{Fator de erosão} = 2,546$$

⇒ Eixo Duplo:

$$\frac{40 - 20}{2,74 - 2,87} = \frac{37 - 20}{x - 2,87} \rightarrow x = 2,760 \rightarrow \text{Fator de erosão} = 2,760$$

3.1.6.1 Número admissível de repetições de carga

Para se encontrar o número admissível de repetições com base no fator de erosão foram utilizadas a Figura 23 e a Figura 24, associando as cargas corrigidas dos eixos com o respectivo fator de erosão calculado.

⇒ Eixos Simples: ESRS (6,6 t) e ESRD (11 t).

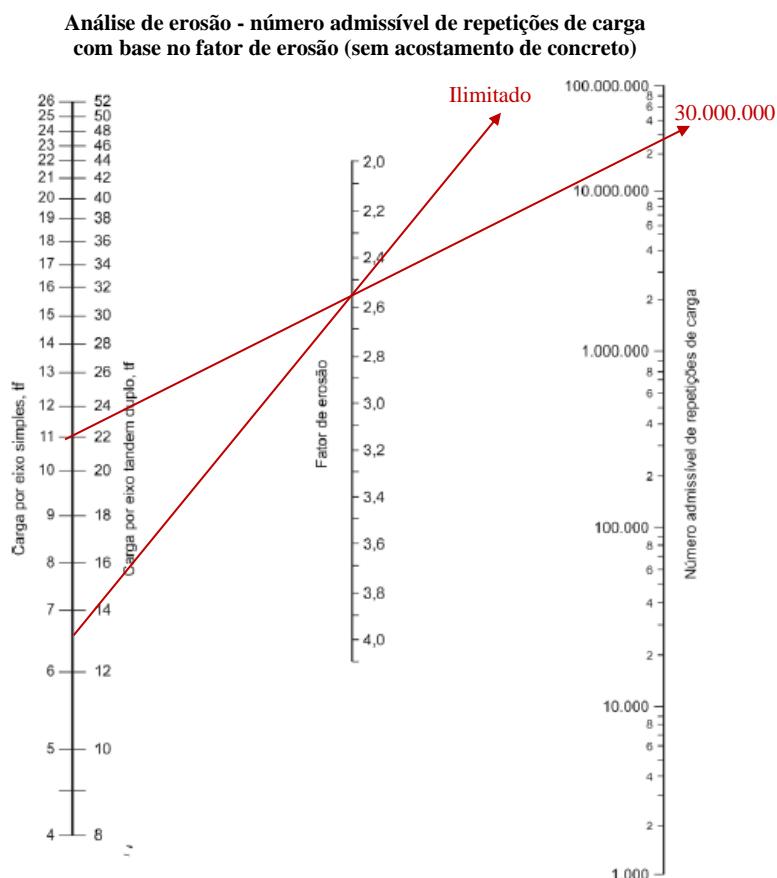


Figura 23 - Determinação do número admissível de repetições de carga para os eixos simples em função do fator de erosão (adaptado de DNIT, 2005).

Dessa forma, tem-se que:

Tabela 16 - Resumo do nº admissível de repetições de carga para os eixos simples.

Eixo	Carga corrigida (t)	Nº admissível de repetições de carga em função do fator de erosão
ESRS	6,6	Ilimitado
ESRD	11	30.000.000

⇒ Eixos Duplos: ETD-B (14,85 t) e ETD (18,7 t).

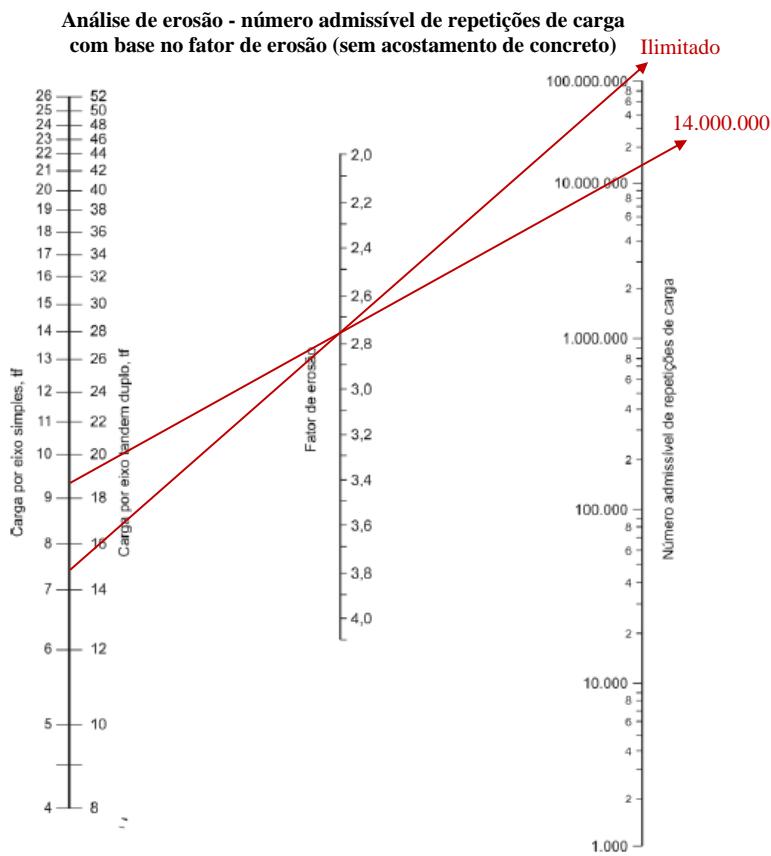


Figura 24 - Determinação do número admissível de repetições de carga para os eixos duplos em função do fator de erosão (adaptado de DNIT, 2005).

Dessa forma, tem-se que:

Tabela 17 - Resumo do nº admissível de repetições de carga para os eixos duplos.

Eixo	Carga corrigida (t)	Nº admissível de repetições de carga em função do fator de erosão
ETD-B	14,85	Ilimitado
ETD	18,7	14.000.000

3.1.7 ANÁLISE DE FADIGA

Neste item calcula-se o fator de fadiga e determina-se o número admissível de repetições de carga com base no fator de fadiga.

Para a determinação do fator de fadiga divide-se a tensão equivalente pela resistência à tração na flexão do concreto (f_{ctm}) aos 28 dias. Existem dois fatores de fadiga, um para o eixo simples e outro para o eixo duplo.

Segundo o DNIT (2005), valores muito baixos de resistência característica à tração na flexão, como por exemplo 4,0 MPa, correspondem a concretos de baixa impermeabilidade, durabilidade inadequada e uma espessura necessária de placa bastante elevada, enquanto que os valores muito altos, por exemplo 5,0 MPa, correspondem a concretos de maior impermeabilidade, durabilidade adequada e menor espessura necessária de placa, mas que em contrapartida, exigem um controle tecnológico rigoroso, e quase sempre têm custo inicial mais elevado. Optou-se, então, pela adoção de uma resistência à tração na flexão do concreto no valor intermediário de:

$$f_{ctm} = 4,5 \text{ MPa}$$

Dessa forma, os fatores de fadiga valem:

⇒ Eixo Simples:

$$\frac{1,377}{4,5} = \rightarrow \text{Fator de fadiga} = 0,306$$

⇒ Eixo Duplo:

$$\frac{1,291}{4,5} = \rightarrow \text{Fator de fadiga} = 0,287$$

3.1.7.1 Número admissível de repetições de carga

Para se encontrar o número admissível de repetições com base no fator de fadiga foram utilizadas a Figura 25 e a Figura 26, associando as cargas corrigidas dos eixos com o respectivo fator de fadiga calculado.

⇒ Eixos Simples: ESRS (6,6 t) e ESRD (11 t).

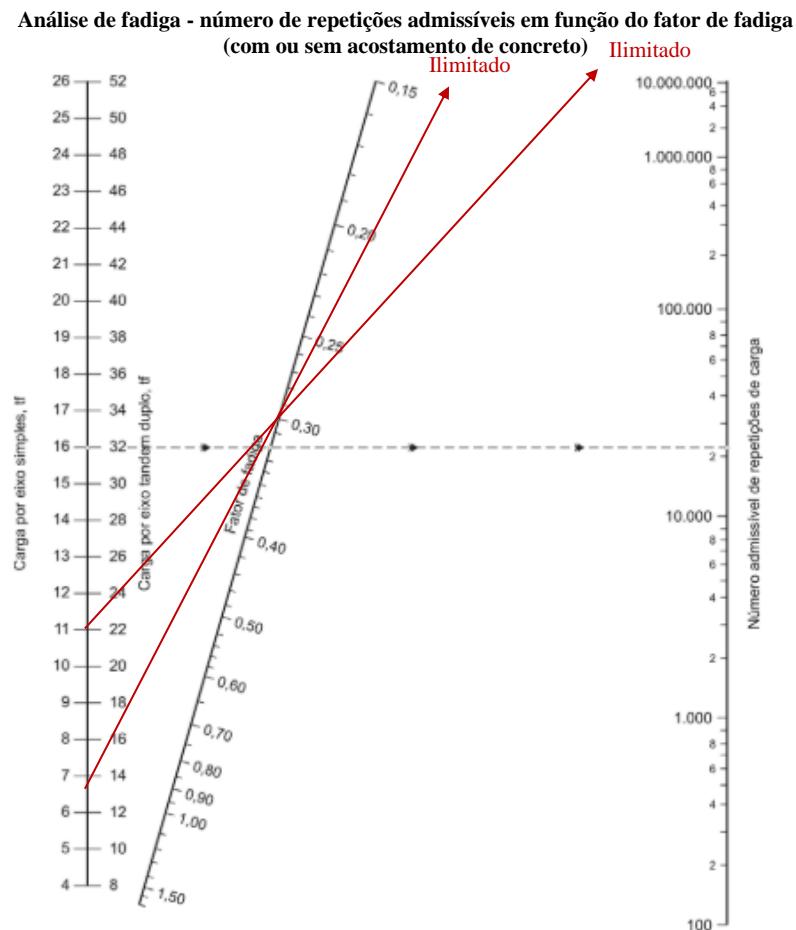


Figura 25 - Determinação do número admissível de repetições de carga para os eixos simples em função do fator de fadiga (adaptado de DNIT, 2005).

Dessa forma, tem-se que:

Tabela 18 - Resumo do nº admissível de repetições de carga para os eixos simples.

Eixo	Carga corrigida (t)	Nº admissível de repetições de carga em função do fator de fadiga
ESRS	6,6	Ilimitado
ESRD	11	Ilimitado

⇒ Eixos Duplos: ETD-B (14,85 t) e ETD (18,7 t).

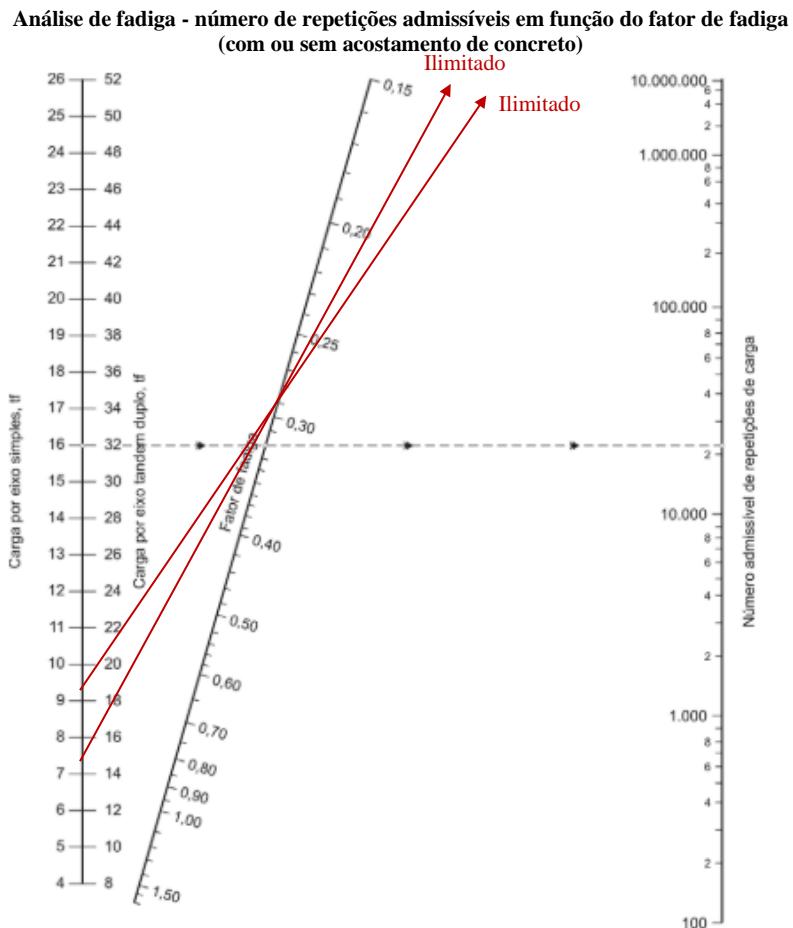


Figura 26 - Determinação do número admissível de repetições de carga para os eixos duplos em função do fator de fadiga (adaptado de DNIT, 2005).

Dessa forma, tem-se que:

Tabela 19 - Resumo do nº admissível de repetições de carga para os eixos duplos.

Eixo	Carga corrigida (t)	Nº admissível de repetições de carga em função do fator de fadiga
ETD-B	14,85	Ilimitado
ETD	18,7	Ilimitado

3.1.8 ESPESSURAS FINAIS DAS CAMADAS DO PAVIMENTO RÍGIDO

Definidos os fatores de erosão e de fadiga, é verificado se a espessura adotada para a placa de concreto atende quanto ao critério de falha por erosão e falha por fadiga, isto é, tanto a soma da coluna “consumo por erosão (%)” quanto a soma da coluna “consumo por fadiga (%)” não podem ultrapassar os 100 %. Caso ultrapasse, quer dizer que a espessura da placa foi insuficiente, devendo-se então repetir os cálculos com uma espessura maior. É interessante que a porcentagem esteja o mais próximo possível dos 100%, pois isso indica que a placa está economicamente bem dimensionada.

Na Tabela 20 são resumidas algumas informações importantes para o dimensionamento do pavimento rígido, já mencionadas anteriormente.

Tabela 20 - Informações referentes ao projeto de pavimento rígido.

Espessura da placa de concreto (cm)	25
Espessura da sub-base (BGS) (cm)	15
k (MPa/m)	37
Resistência característica à tração na flexão ($f_{ctm,k}$) (MPa)	4,5
Fator de segurança de cargas (FSC)	1,1
Período de projeto (anos)	20
Acostamento de concreto	Não
Juntas com barras de transferência	Sim

Por fim, na Tabela 21 foi verificado se a espessura de 25 cm da placa de concreto atendeu aos critérios de falha. Percebeu-se que, tanto o consumo de fadiga quanto o consumo de erosão deram inferiores a 100%, atendendo ao dimensionamento. Foi testada também a espessura de 24 cm para a placa, porém, utilizando essa espessura já não se atendia mais o critério da falha por erosão, uma vez que a porcentagem encontrada ficava superior a 100%. Desse modo, 25 cm foi a menor espessura possível para a placa de concreto, considerando a não utilização de uma camada de reforço do subleito. A Figura 27 ilustra a seção transversal do pavimento rígido, considerando as espessuras definidas.

Espessura da placa de concreto = 25 cm

Tabela 21 - Verificação quanto à falha por fadiga e erosão da placa com 25 cm de espessura.

			ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSÃO	
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x FSC (tf)	Nº de repetições previstas	Nº de repetições admissíveis	Consumo de Fadiga (%)	Nº de repetições admissíveis	Consumo de Erosão (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixos Simples			(8) Tensão equivalente	1,377 MPa		
Eixos Tandem Duplos			(9) Fator de erosão	2,546		
			(10) Fator de fadiga	0,306		
6	6,6	22.521.509	Ilimitado	-	Ilimitado	-
10	11	17.870.292	Ilimitado	-	30.000.000	59,57
			(11) Tensão equivalente	1,291 MPa		
			(12) Fator de erosão	2,760		
			(13) Fator de fadiga	0,287		
13,5	14,85	888.969	Ilimitado	-	Ilimitado	-
17	18,7	4.651.217	Ilimitado	-	14.000.000	33,22
			TOTAL (%)	0,00	TOTAL (%)	92,79

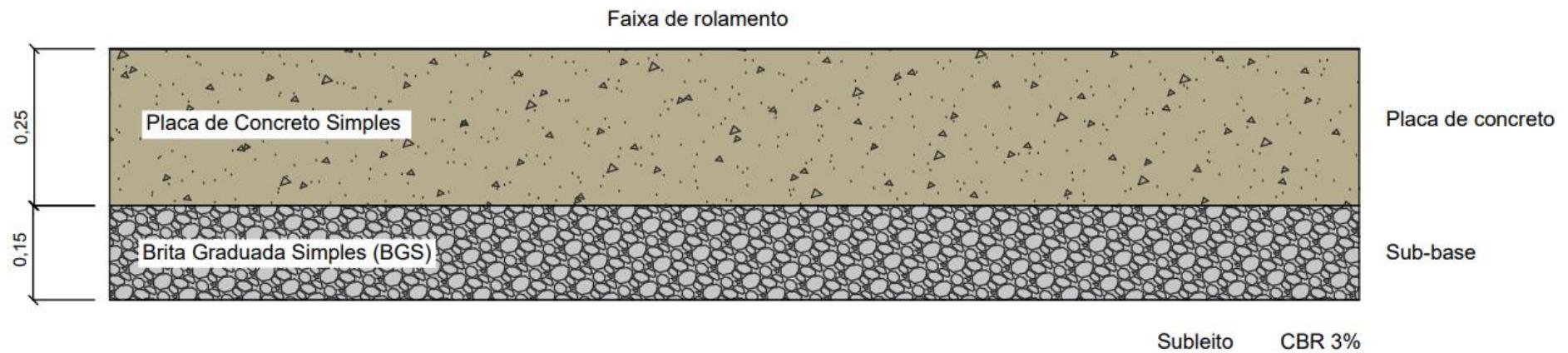
Tendo sido definida a espessura da placa de concreto como sendo de 25 cm, foi possível se conhecer, a partir da Tabela 22, o diâmetro das barras de transferência a serem utilizadas. Dessa forma, definiu-se um diâmetro de 32 mm para as barras em questão.

Tabela 22 - Diâmetro das barras de transferência (DNIT, 2005).

Espessura do pavimento – h (cm)	Diâmetro das barras (mm)
$h \leq 12,5$	16
$12,5 < h \leq 15,0$	20
$15,0 < h \leq 20,0$	25
$h > 20,0$	32

Caso haja interesse em reduzir a espessura da placa é necessário o uso da camada de reforço do subleito para aumentar o CBR da fundação, devendo ser verificado se o custo de adição dessa nova camada compensa a redução de espessura da placa de concreto. No caso deste trabalho, não foi realizada essa análise, pois antes de se adicionar a camada de

reforço do subleito deve-se realizar o ensaio do material do subleito para se definir qual é de fato o valor do seu CBR, uma vez que existe a possibilidade do subleito possuir um CBR superior a 3%, de forma a possibilitar a redução da espessura da placa sem precisar da camada de reforço. Além disso, a placa de concreto com espessura de 25 cm é apenas 1 cm mais espessa do que a utilizada nos corredores do BRT (RIO PREFEITURA, 2022).



* Medidas em metros.

Figura 27 - Seção transversal do pavimento rígido.

3.2 VIAS SECUNDÁRIAS - PAVIMENTO FLEXÍVEL

3.2.1 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DIÁRIO MÉDIO (VDM)

Para o dimensionamento dos pavimentos flexíveis foi utilizado um valor de VDM igual para todas as vias secundárias e para o cálculo desse VDM foram considerados os postos 5, 6, 9, 10 e 15. A Tabela 23 contém os dados de contagem desses postos, que são localizados nas vias secundárias, e apresenta a média entre os valores obtidos de contagem nos três dias consecutivos para cada um dos tipos de veículos.

Como para a obtenção do número N é desconsiderada a influência dos veículos leves, que neste caso são representados pelos carros de passeio, foram calculados os valores de VDM apenas para os ônibus e caminhões.

Tabela 23 - Médias das contagens dos postos das vias secundárias. As maiores médias encontram-se marcadas em azul (adaptado de ALLERS, 2017).

CONTAGEM DE VEÍCULOS NOS HORÁRIOS DE PICO EM JUNHO DE 2016: POSTOS NAS VIAS SECUNDÁRIAS					
Posto	Data	Período da Manhã (7h15 às 9h15)		Período da Tarde (16h15 às 18h15)	
		Ônibus	Caminhão	Ônibus	Caminhão
Posto 05	28/06/2016	44	85	27	39
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 06	28/06/2016	56	40	71	83
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 09	28/06/2016	76	20	44	60
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 10	28/06/2016	81	22	66	23
	29/06/2016				
	30/06/2016				
Posto 15	28/06/2016	62	25	103	5
	29/06/2016				
	30/06/2016				

Considerando cada um dos tipos de veículos, foram escolhidas as maiores médias, de forma que o VDM pudesse atender à maior solicitação. A escolha englobou os períodos de contagem da manhã e da tarde. Como os valores médios considerados referem-se a um intervalo de contagem de 2h, os valores foram divididos por dois para se obter o valor médio correspondente a 1h de contagem para cada tipo de veículo. A Tabela 24 resume os valores encontrados a partir do que foi descrito anteriormente.

Tabela 24 - Maiores médias do número de veículos contados no horário de pico:
Vias Secundárias.

Intervalo	Ônibus	Caminhão
2h	103	85
1h	52	43

* Número de veículos contados em junho de 2016.

Assim, dividindo-se os valores considerados como VHP pelo fator k , definiu-se o valor de VDM do ano de 2016 para cada um dos tipos de veículos. O valor do fator k utilizado foi de 0,091 e teve sua obtenção a partir do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006b), sendo apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Fatores de k típicos nas vias norte-americanas (DNIT, 2006b).

Tipo de Área	Fator k
Urbana	9,1%
Suburbana	9,3%
Rural em Transição para Urbana	9,3%
Rural Desenvolvida	9,5%
Rural Subdesenvolvida	10,0%

$$VDM_{2016: ÔNIBUS} = \frac{52}{0,091} = 571,42 \rightarrow 572$$

$$VDM_{2016: CAMINHÃO} = \frac{43}{0,091} = 472,53 \rightarrow 473$$

Para a utilização dos valores do ano de 2016 foi necessário ser feita a “atualização” deles, isto é, trazer para o presente os valores, e para isso, considerou-se um crescimento exponencial fazendo-se o uso das taxas de crescimento presentes na Tabela 26.

Tabela 26 - Taxas de crescimento dos veículos.

Veículo	Taxa de crescimento
Ônibus	3%
Caminhão	1%

Foi considerada uma taxa de crescimento de caminhões inferior à dos ônibus, pois no período em que foi realizada a contagem, estavam acontecendo diversas obras no Parque Tecnológico, e por isso, havia um fluxo de caminhões elevado. Do ano de 2016 até o ano de 2022 passaram-se 6 anos, portanto, $n = 6$.

Dessa forma, tem-se que:

$$VDM_{final} = VDM_{inicial}(1 + Taxa\ de\ crescimento)^n$$

$$VDM_{2022:\text{ÔNIBUS}} = 572 (1 + 0,03)^6 = \mathbf{683}$$

$$VDM_{2022:\text{CAMINHÃO}} = 473 (1 + 0,01)^6 = 502,10 \rightarrow \mathbf{503}$$

3.2.1.1 Determinação do VDM acumulado para os anos de projeto

A partir dos valores de VDM encontrados foi possível ser obtido o valor do VDM acumulado durante o tempo de projeto do pavimento, que para este projeto foi considerado como sendo de 20 anos. Para os anos de projeto considerou-se que o crescimento é do tipo exponencial e com as mesmas taxas anuais de crescimento apresentadas anteriormente na Tabela 26. A Tabela 27 apresenta o cálculo do VDM correspondente a cada ano e ao final, apresenta o somatório desses valores para cada um dos tipos de veículo.

Tabela 27 - VDM dos anos de projeto e o VDM acumulado para 20 anos.

Ano		VDM	
		Ônibus	Caminhão
2022	0	683	503
2023	1	703	508
2024	2	725	513
2025	3	746	518
2026	4	769	523
2027	5	792	529
2028	6	816	534
2029	7	840	539
2030	8	865	545
2031	9	891	550
2032	10	918	556
2033	11	945	561
2034	12	974	567
2035	13	1003	572
2036	14	1033	578
2037	15	1064	584
2038	16	1096	590
2039	17	1129	596
2040	18	1163	602
2041	19	1198	608
2042	20	1234	614
VDM acumulado		19.587	11.690

Os valores acumulados de VDM, utilizados para a determinação do número N, constam na Tabela 28.

Tabela 28 - VDM acumulado nos 20 anos de projeto.

Veículo	VDM acumulado em 20 anos
Ônibus	19.587
Caminhão	11.690

3.2.2 CÁLCULO DO NÚMERO N

Para o cálculo no número N, deve-se inicialmente classificar cada um dos veículos pelos tipos de eixo que os compõe. Neste projeto, foi considerada a ação da carga máxima permitida por eixo fornecida pelo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006b). No dimensionamento dos pavimentos flexíveis foram considerados os ônibus comuns do tipo 2CB e os caminhões do tipo 3C. Como a rota dos ônibus do BRT está associada apenas às vias principais, não haverá influência desses ônibus sobre os pavimentos flexíveis das vias secundárias. A Tabela 29 resume as informações dos veículos considerados, os quais já foram apresentados no item 3.1.3, referente ao dimensionamento do pavimento rígido.

Tabela 29 - Resumo dos eixos presentes nos veículos considerados para o dimensionamento do pavimento flexível.

Veículo	EIXO DIANTEIRO		EIXO TRASEIRO	
	Tipo	Carga máxima (CM)	Tipo	Carga máxima (CM)
Ônibus – 2CB	ESRS	6 t	ESRD	10 t
Caminhão – 3C	ESRS	6 t	ETD	17 t

Inicialmente, calculou-se o Fator de Carga (FC) para cada eixo dos veículos considerados, como mostrado na Tabela 30.

Tabela 30 - Cálculo do FC para cada eixo.

Ônibus			
Eixo	CM (t)	Cálculo do FC	FC
E1 - RS	6	$2,0782 \times 10^{-4} \times 6^{4,0175}$	0,277914
E2 - RD	10	$1,8320 \times 10^{-6} \times 10^{6,2542}$	3,289467
Caminhão			
Eixo	CM (t)	Cálculo do FC	FC
E1 - ES	6	$2,0782 \times 10^{-4} \times 6^{4,0175}$	0,277914
E2 - TD	17	$1,5280 \times 10^{-6} \times 17^{5,484}$	8,548802

Calculados os valores de FC, determinou-se os valores dos Fatores de Veículo (FV) para cada um dos tipos de veículos. O FV é o somatório dos valores de FC de cada um dos eixos que compõem um veículo. Por fim, multiplicou-se o valor de FV pelo VDM e pela

porcentagem que o veículo representa na composição total da frota de veículos. A Tabela 31 e a Tabela 32 representam o descrito anteriormente.

Tabela 31 - Determinação do FV e da parcela de contribuição dos ônibus.

Ônibus		
2CB		
Eixo	E1 - RS	E2 - RD
CM (t)	6	10
FC	0,2779	3,2895
FV	3,5674	
VDM	19587	
% na composição	62,62	
$\sum FV \cdot VDM \cdot \%$	43.758,27	

Tabela 32 - Determinação do FV e da parcela de contribuição dos caminhões.

Caminhão		
3C		
Eixo	E1 - RS	E1E2 - TD
CM (t)	6	17
FC	0,2779	8,5488
FV	8,8267	
VDM	11690	
% na composição	37,38	
$\sum FV \cdot VDM \cdot \%$	38.565,86	

Por fim, calculou-se o valor do número N como representado a seguir:

$$N = 365 \times (43758,27 + 38565,86) \times 1 = 30048309$$

$$\boxed{N = 3,00 \times 10^7}$$

3.2.3 ESCOLHA DOS MATERIAIS DAS CAMADAS

O material constituinte de cada uma das camadas deve atender às especificações mínimas exigidas pelo DNER (1981). A seguir são apresentadas as características mínimas a serem atendidas:

- Reforço do subleito:

CBR maior que o do subleito

Expansão $\leq 2\%$

- Sub-base:

CBR $\geq 20\%$

Expansão $\leq 1\%$

- Base:

CBR $\geq 80\%$ para $N > 10^6$

CBR $\geq 60\%$ para $N \leq 10^6$

Expansão $\leq 0,5\%$

Limite de liquidez (LL) $\leq 25\%$

Índice de plasticidade (IP) $\leq 6\%$

Com base nas especificações a serem seguidas para cada uma das camadas, para o projeto de pavimento flexível foram escolhidos os seguintes materiais:

- Rachão → Caracterizado por ser um material granular de grandes dimensões, foi escolhido para a camada de reforço do subleito devido a sua grande capacidade de suporte. Sua utilização busca compensar a baixa resistência do subleito, que possui CBR de apenas 3%.
- Solo – Brita 50/50 → Foi escolhido para a camada de sub-base devido a sua maior facilidade de compactação e baixo custo, sendo esse material comumente utilizado nessa camada.
- Brita Graduada Simples (BGS) → Foi escolhido para a camada de base por se tratar de um material com boa capacidade de suporte, sendo um dos mais utilizados no campo da pavimentação.

É importante ressaltar que a mistura escolhida para o revestimento foi o Concreto Asfáltico (CA), pelo motivo de ser a mistura empregada comumente pela Prefeitura Universitária nas vias da Ilha do Fundão.

A BGS, escolhida para a camada de base, e o solo-brita, escolhido para a camada de sub-base, são materiais granulares de boa capacidade de suporte. O CBR típico da BGS, em geral, situa-se na faixa de 60 a 100% (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008), e o do solo-brita 50/50 situa-se em torno de 80% (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2008). Sendo assim, foi adotado o CBR = 80% para a BGS e o CBR = 80% para o solo-brita. O material rachão, escolhido como reforço do subleito, possui características muito próximas às do macadame seco, possuindo diferenças quanto à granulometria do agregado graúdo, que assume dimensões maiores no rachão (FONSECA, 2016). Desse modo, foi adotado o CBR = 20% para o rachão, sendo igual ao valor de CBR encontrado no macadame seco (FERMINO, CERATTI, 2016).

Os valores dos coeficientes de equivalência estruturais (k) foram obtidos a partir do DNER (1981), que estabelece $k = 1,00$ para camadas granulares e $k = 2,00$ para a camada de revestimento em concreto asfáltico. A Tabela 33 resume as características de cada material escolhido para constituir as camadas do pavimento.

Tabela 33 - Características dos materiais escolhidos para cada camada.

Camada	Material	CBR	Coeficientes estruturais
Revestimento	Concreto asfáltico	-	$k_R = 2,0$
Base	Brita graduada simples (BGS)	80%	$k_B = 1,0$
Sub-base	Solo – Brita 50/50	80%	$k_S = 1,0$
Reforço do subleito	Rachão	20%	$k_{Ref} = 1,0$

3.2.4 DETERMINAÇÃO DAS ESPESSURAS DAS CAMADAS

O método utilizado para o dimensionamento das espessuras das camadas constituintes do pavimento flexível foi o “Método do CBR”. Esse método é apresentado no Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (1981) publicado pelo DNER. Assim, as espessuras foram determinadas de forma a atender um número N de solicitações, considerando as características do subleito e dos materiais escolhidos para as camadas do pavimento.

Foi solicitado à Prefeitura Universitária a informação do valor do CBR do subleito da Ilha do Fundão, porém os responsáveis pela área de pavimentação não tinham tal informação. Neste caso, foi considerado o CBR mínimo de 3% para o material do subleito.

Para uma melhor compreensão dos cálculos que virão a seguir, a Figura 28 representa a nomenclatura adotada para cada uma das espessuras das camadas presentes no pavimento.

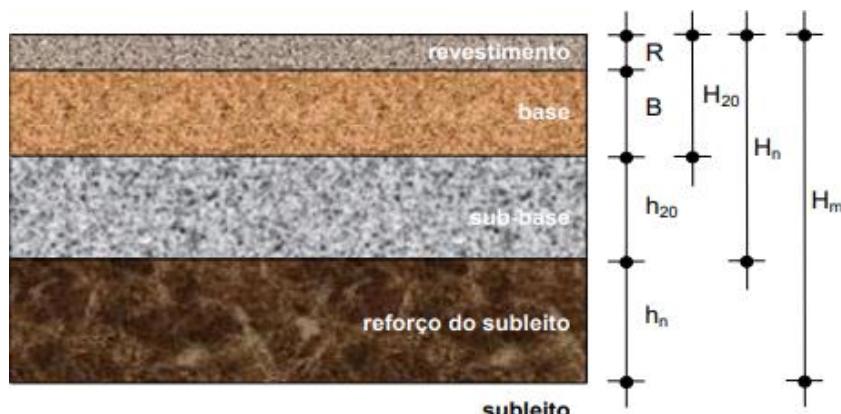


Figura 28 - Representação das espessuras de cada camada do pavimento flexível (adaptado de DNER, 1981).

Tem-se que:

R : espessura do revestimento asfáltico;

B : espessura da base;

h_{20} : espessura da sub-base;

h_n : espessura do reforço do subleito;

H_{20} : espessura do revestimento + base;

H_n : espessura do revestimento + base + sub-base;

H_m : espessura do revestimento + base + sub-base + reforço do subleito.

Para o dimensionamento das espessuras de cada camada do pavimento flexível foram utilizadas as expressões (9), (10) e (11) (DNER, 1981):

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B \geq H_{20} \quad (9)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_{20} \cdot k_S \geq H_n \quad (10)$$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_{20} \cdot k_S + h_n \cdot k_{Ref} \geq H_m \quad (11)$$

Vale ressaltar que a espessura mínima para qualquer camada granular é de 15 cm. Dessa forma, tendo como base os materiais escolhidos para cada uma das camadas, a base, sub-base e reforço do subleito devem respeitar essa espessura mínima. Outra informação a ser pontuada é que para $N > 10^7$, que é o caso deste trabalho, multiplica-se o H_{20} por 1,2.

Através do ábaco da Figura 29 é possível relacionar, para diferentes valores de CBR, o número de operações do eixo padrão (número N) com os valores de espessura (H), considerando o coeficiente de equivalência estrutural $k = 1,0$ (material granular). O gráfico foi desenvolvido considerando a faixa de valores de CBR de materiais granulares, de 2% até 20%. Diante disso, para materiais com CBR superiores a 20% utiliza-se a curva de maior valor, que é a de CBR = 20%.

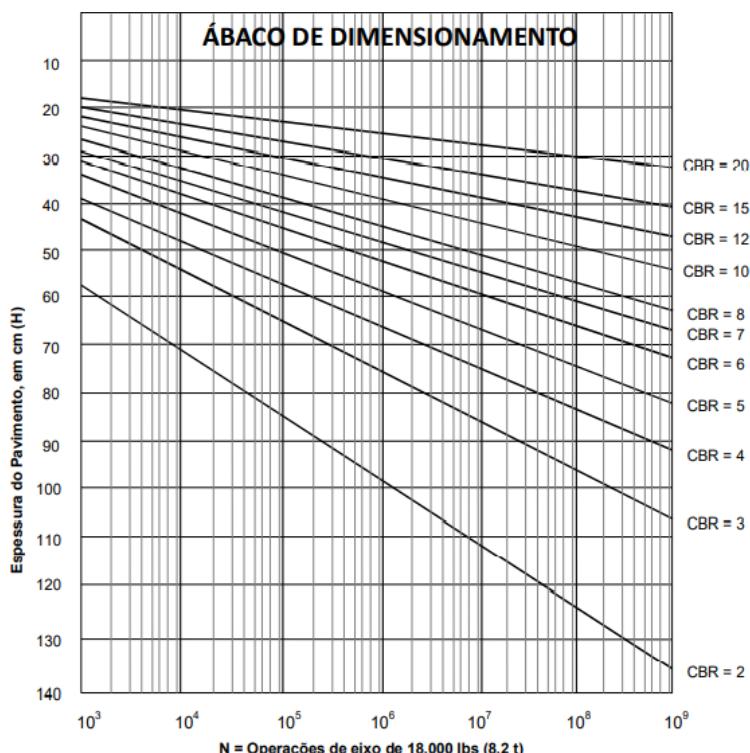


Figura 29 - Ábaco de dimensionamento das espessuras em função do número N (DNER, 1981).

O ábaco anterior foi utilizado para a determinação das espessuras de H_m ; H_n e H_{20} , e para isso foi utilizado o número $N = 3,00 \times 10^7$, sendo sempre associado a um determinado valor de CBR. O CBR utilizado para cada uma das espessuras é correspondente ao do material imediatamente inferior, isto é, para se determinar o H_m utiliza-se o CBR do subleito, para se determinar o H_n utiliza-se o CBR do reforço do subleito, e para se determinar o H_{20} utiliza-se o CBR da sub-base.

- Espessura H_m

Para a determinação dessa medida, utilizou-se a curva do CBR de 3%, referente ao material do subleito. A Figura 30 mostra, em vermelho, a determinação da espessura de H_m , que assume o valor de:

$$H_m = 90 \text{ cm}$$

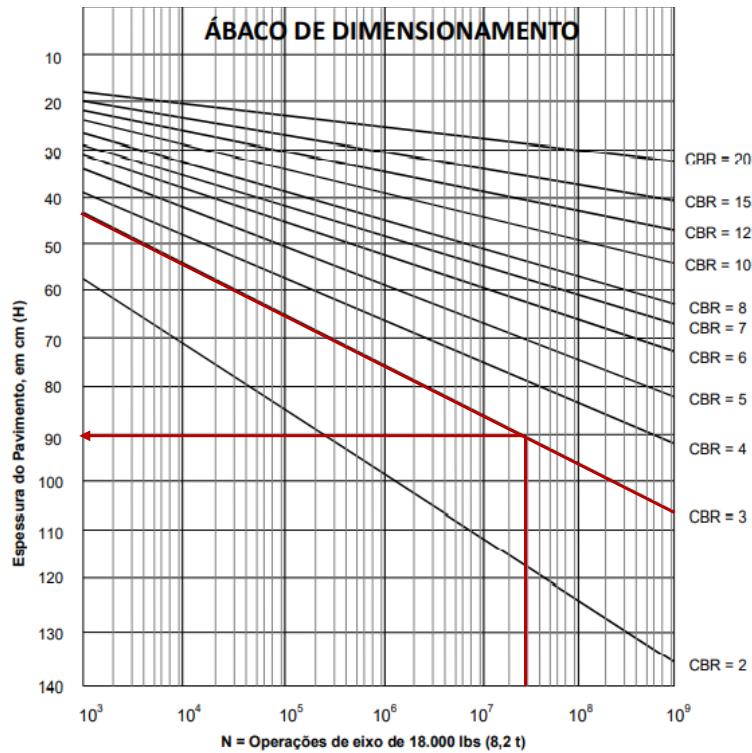


Figura 30 - Determinação da espessura da camada H_m (adaptado de DNER, 1981).

- Espessura H_n

Para a determinação dessa medida, utilizou-se a curva do CBR de 20%, referente ao material rachão do reforço do subleito. A Figura 31 mostra, em verde, a determinação da espessura de H_n , que assume o valor de:

$$H_n = 29 \text{ cm}$$

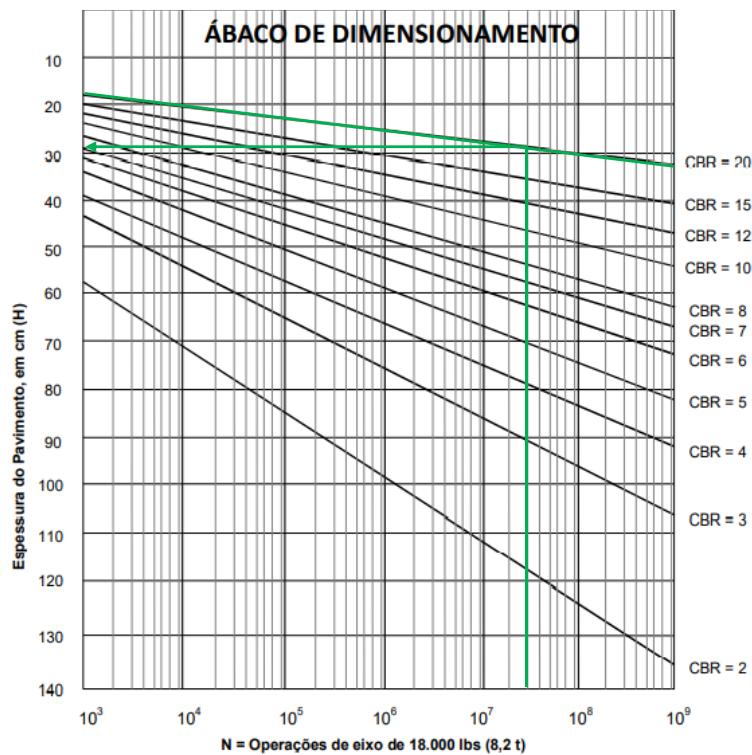


Figura 31 - Determinação da espessura da camada H_n (adaptado de DNER, 1981).

- Espessura H_{20}

Para a determinação dessa medida, utilizou-se a curva do CBR de 20%, referente ao material solo-brita 50/50 da sub-base. A Figura 32 mostra, em laranja, a determinação da espessura de H_n , que assume o valor de:

$$H_{20} = 29 \text{ cm}$$

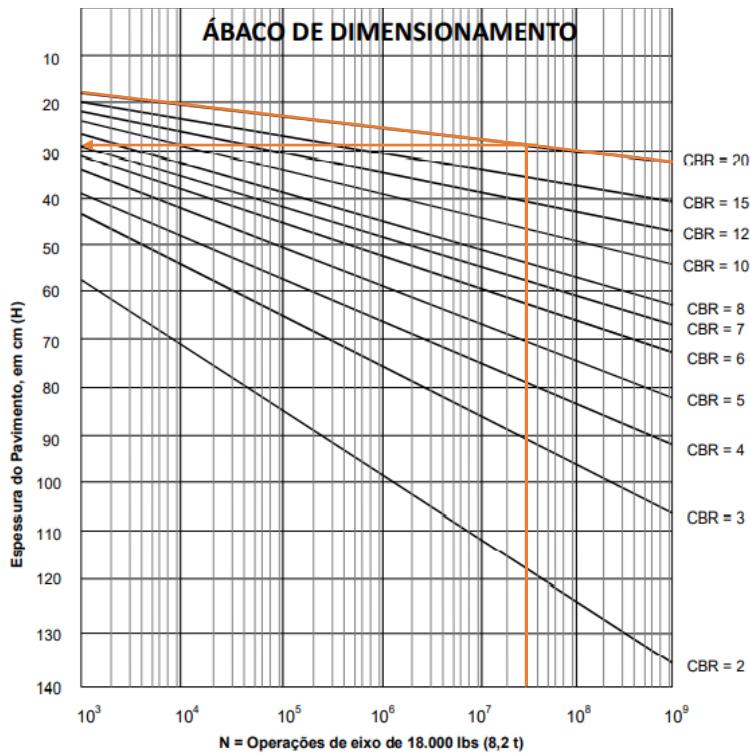


Figura 32 - Determinação da espessura da camada H_{20} (adaptado de DNER, 1981).

Outra espessura facilmente determinada é a da camada de revestimento. Para isso, utilizou-se a Tabela 34, que associa o número N com a espessura do revestimento em concreto betuminoso. Como $N = 3,00 \times 10^7$, a espessura mínima do revestimento assume o valor de:

$$R = 10 \text{ cm}$$

Tabela 34 - Espessuras mínimas de revestimento em função de N (DNER, 1981).

N	Espessura mínima de revestimento
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais
$10^6 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$	Revestimento betuminoso com 5,0 cm de espessura
$5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 \leq N \leq 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

De posse das espessuras de H_m , H_n , H_{20} e R , foram utilizadas as equações (9), (10) e (11) para a determinação das espessuras das camadas de reforço do subleito (h_n), da sub-base (h_{20}) e da base (B). A Tabela 35 apresenta os resultados das espessuras já encontradas que foram utilizadas nos cálculos mostrados adiante.

Tabela 35 - Resumo das espessuras das camadas utilizadas nas equações (9), (10) e (11).

Camada	Espessura
R	10 cm
H_{20}	29 cm
H_n	29 cm
H_m	90 cm

Aplicando-se a equação (9), (10) e (11), na respectiva ordem, tem-se que:

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B \geq H_{20}$$

$$10 \cdot 2,0 + B \cdot 1,0 \geq 1,2 \cdot 29$$

$$B = 14,8 \text{ cm} \rightarrow \mathbf{B = 15 \text{ cm}}$$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_{20} \cdot k_S \geq H_n$$

$$10 \cdot 2,0 + 15 \cdot 1,0 + h_{20} \cdot 1,0 \geq 29$$

$$h_{20} = -6,0 \text{ cm}$$

A espessura negativa indica que a camada não é necessária $\rightarrow \mathbf{h_{20} = 0}$

$$R \cdot k_R + B \cdot k_B + h_{20} \cdot k_S + h_n \cdot k_{Ref} \geq H_m$$

$$10 \cdot 2,0 + 15 \cdot 1,0 + 0 \cdot 1,0 + h_n \cdot 1,0 \geq 90$$

$$\mathbf{h_n = 55\ cm}$$

Através das espessuras das camadas R , B , h_{20} , h_n , recalcoulou-se os valores de H_{20} , H_n e H_m . A Tabela 36 mostra as espessuras finais de cada uma das camadas, explicitando o cálculo dos valores de H_{20} , H_n e H_m , e na Tabela 37 são apresentadas as informações gerais de cada uma das camadas. Por fim, a Figura 33 e a Figura 34 ilustram de forma esquemática as camadas e espessuras a serem adotadas para o pavimento flexível.

Tabela 36 - Espessuras definitivas das camadas do pavimento flexível.

Camada	Espessura
R	10 cm
B	15 cm
h_{20}	0
h_n	55 cm
H_{20}	$R + B = 25\ cm$
H_n	$R + B + h_{20} = 25\ cm$
H_m	$R + B + h_{20} + h_n = 80\ cm$

Tabela 37 - Resumo das características das camadas do pavimento flexível.

Camada	Material	CBR	Espessura
Revestimento (R)	Concreto asfáltico	-	10 cm
Base (B)	Brita Graduada Simples (BGS)	80%	15 cm
Reforço do Subleito (h_n)	Rachão	20%	55 cm

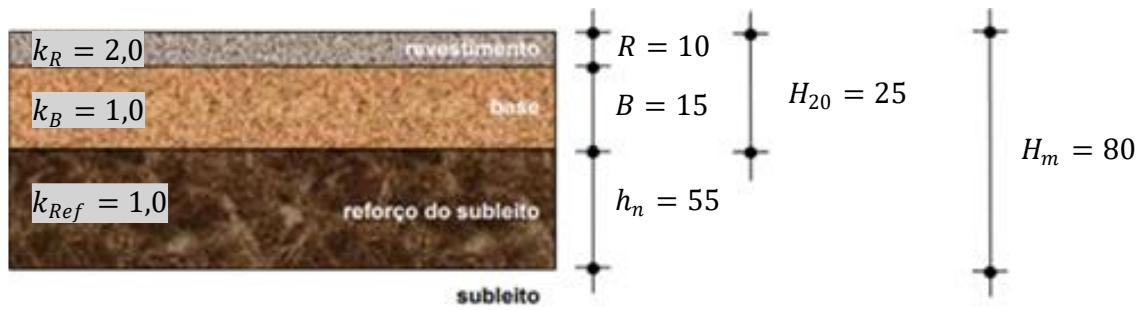


Figura 33 - Esquema das dimensões finais das camadas. Espessuras em centímetros.

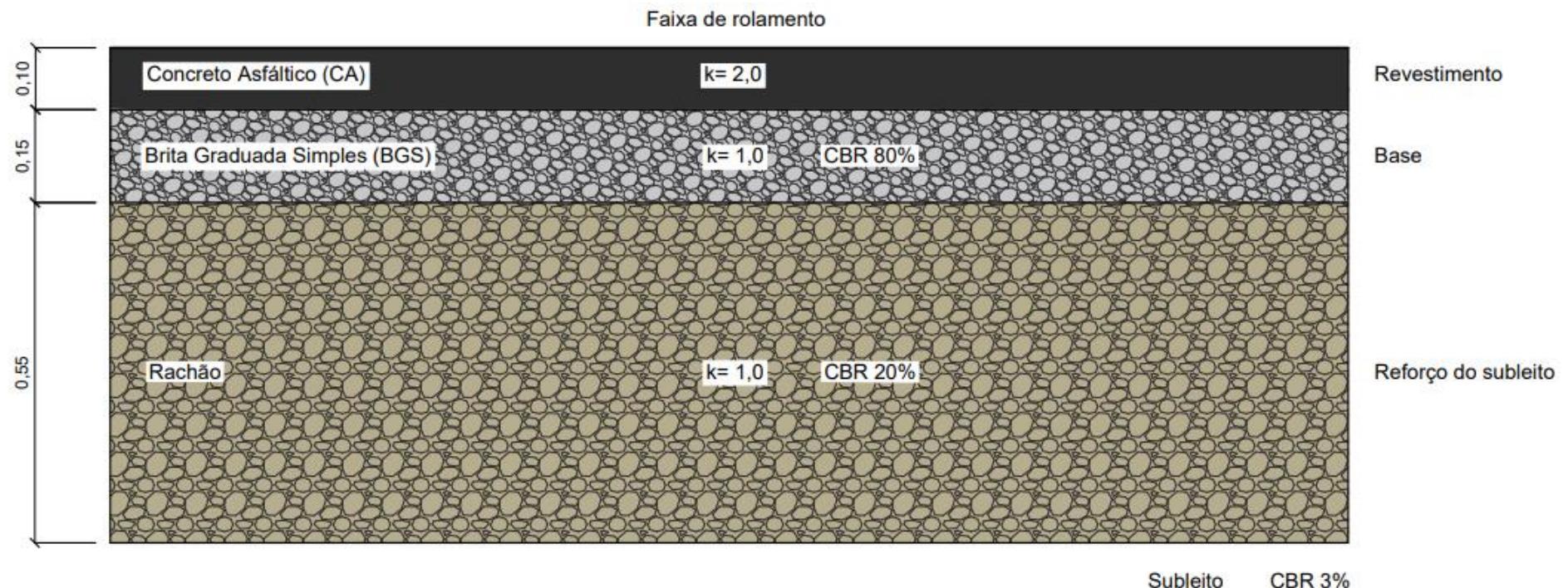


Figura 34 - Seção transversal do pavimento flexível.

3.3 INTERFACES ENTRE O PAVIMENTO RÍGIDO E O FLEXÍVEL

Dimensionados os pavimentos rígido e flexível, foi possível concluir que o pavimento flexível é 40 cm mais “alto” do que o rígido. Pela razão de existir esse desnível, deverão ser feitas pequenas rampas de transição do pavimento mais alto para o mais baixo. Optou-se por uma inclinação de $i = 1,5\%$ para as rampas de transição, de forma a se ter uma baixa declividade, garantindo a suavidade das rampas. A Figura 35 ilustra de forma esquemática esse tipo de rampa.

$$\text{Espessura total do pavimento rígido} = 40 \text{ cm}$$

$$\text{Espessura total do pavimento flexível} = 80 \text{ cm}$$

$$\text{Desnível} = 80 - 40 = 40 \text{ cm}$$

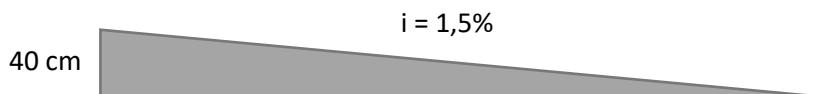


Figura 35 - Rampa de compatibilização das interfaces entre o pavimento rígido e o flexível.

4 CUSTO DE MATERIAIS

Neste item, definiu-se o custo dos materiais necessários para a construção dos pavimentos rígido e flexível, dimensionados anteriormente. Para isso, foi preciso calcular o volume de material gasto em cada uma das camadas para ambos os pavimentos projetados, sendo considerado um acréscimo de 10% em relação a esse volume por conta de eventuais perdas de material. Como referência de preço dos materiais empregados, foi utilizado o Relatório de Insumos e Composições do SINAPI, não desonerado, do estado do Rio de Janeiro, referente ao mês de dezembro de 2021.

Vale ressaltar que os custos definidos são apenas relacionados ao custo direto dos materiais, não referindo-se à execução do projeto como um todo. Para a definição do custo, de uma forma mais precisa, haveria a necessidade de se realizar um estudo mais detalhado a respeito de todas as etapas e serviços envolvidos na execução de cada um dos pavimentos projetados.

Para a determinação do volume gasto de cada tipo de material é necessário saber três informações: espessura de cada camada, largura e comprimento de cada trecho considerado. Multiplica-se, então, todos esses dados para se obter o volume de material, conforme representado na equação (12). Para a obtenção das medidas de largura de cada um dos trechos foi utilizada a planta da Ilha do Fundão em AutoCAD, fornecida pela Prefeitura Universitária, e para a obtenção do comprimento dos trechos foi utilizado o Google Earth Pro.

$$Volume (m^3) = esp. \text{ da camada} (m) \times \sum \text{Áreas dos trechos} (m^2) \quad (12)$$

É importante enfatizar que a espessura dimensionada de cada camada do pavimento rígido é a mesma para todos os trechos das vias principais. O mesmo acontece em relação ao pavimento flexível, cujas espessuras dimensionadas são as mesmas para todos os trechos das vias secundárias.

4.1 PAVIMENTO RÍGIDO

Para a determinação do custo de materiais do pavimento rígido as vias principais foram subdivididas em 18 trechos. A Figura 36 apresenta o mapa da Ilha do Fundão com a sinalização de cada um dos trechos considerados, e de forma complementar, a Tabela 38 contém informações mais detalhadas a respeito de cada um desses trechos, como: localização, comprimento, largura e área.



Figura 36 - Indicação dos trechos referentes às vias principais.

Tabela 38 - Informações dos trechos referentes às vias principais.

Trecho	Local	Comp. (m)	Larg. (m)	Área (m²)
1	R. Luís Renato Caldas	338	8	2704
2	Terminal da UFRJ	179	6	1074
3	R. Luís Renato Caldas / R. Maria Dolores Lins de Andrada	1168	10,5	12264
4	Av. Carlos Chagas Filho (lado do CCS)	942	11	10362
5	Av. Carlos Chagas Filho (lado do EEFD)	331	7,5	2483
6	Av. Carlos Chagas Filho (lado do EEFD)/Av. Horácio Macedo	1814	11	19954
7	Retorno Av. Carlos Chagas Filho	14	11	154
8	Retorno Av. Carlos Chagas Filho sentido HUCFF - EEFD	67	5,5	369
9	Retorno Av. Carlos Chagas Filho sentido EEFD - HUCFF	113	8,5	961
10	Av. Horácio Macedo (lado da Prefeitura) (1)	136	6	816
11	Retorno Av. Horácio de Macedo sentido Prefeitura - EEFD	119	8,5	1012
12	Retorno Av. Horácio de Macedo sentido EEFD - Prefeitura	59	7,5	443
13	Av. Horácio Macedo (lado da Prefeitura) (2)	1331	9,5	12645
14	Praça Giulio Massarani	567	9,5	5387
15	Retorno Av. Horácio Macedo sentido Fac. Letras - CT	51	6	306
16	Av. Horácio Macedo (lado do CT)	550	11,5	6325
17	Av. Horácio Macedo (lado da Faculdade de Letras)	540	8,5	4590
18	Praça Samira Nahid Mesquita	309	8	2472
Total				84318

Sabendo-se que a área total a ser pavimentada é de 84318 m², e conhecendo-se as espessuras da placa de concreto e da camada de sub-base, foi possível calcular o volume de cada material adotado para o pavimento rígido. A Tabela 39 apresenta o volume a ser utilizado de cada material, considerando também o acréscimo de 10% sobre o volume calculado.

Tabela 39 - Determinação do volume necessário de cada material – Pavimento rígido.

Camada	Material	Espessura da camada (cm)	Área a ser pavimentada (m ²)	Volume (m ³)	Volume majorado em 10% (m ³)
Placa de concreto de cimento Portland	Concreto	25	84318	21080	23188
Sub-base	Brita graduada simples (BGS)	15	84318	12648	13913

Para a definição do custo referente à placa de concreto de 25 cm, foi utilizado o preço unitário médio associado a cada unidade de área a ser pavimentada. Já para a determinação do custo da camada de sub-base, foi usado o preço unitário médio associado a cada unidade de volume a ser pavimentado. Somando-se o custo da placa de concreto com o da camada de sub-base, foi possível ser conhecido o custo total de materiais do pavimento rígido. Os referidos custos são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Custo das camadas e custo total de materiais do pavimento rígido (SINAPI, 2022).

Camada	Material	Área (m ²)	Preço (R\$/m ²)	Custo (R\$)
Placa de concreto de cimento Portland	Concreto	84318	100,76	8.495.881,68
Camada	Material	Volume (m ³)	Preço (R\$/m ³)	Custo (R\$)
Sub-base	Brita graduada simples (BGS)	13913	124,97	1.738.707,61
Total				10.234.589,29

4.2 PAVIMENTO FLEXÍVEL

Para a determinação do custo de materiais do pavimento flexível as vias secundárias foram subdivididas em 31 trechos. Na Figura 37 é apresentado o mapa da Ilha do Fundão com a localização de cada um dos trechos considerados para a pavimentação asfáltica. Já a Tabela 41 contém informações mais detalhadas a respeito de cada um desses trechos, como: localização, comprimento, largura e área.



Figura 37 - Indicação dos trechos referentes às vias secundárias.

Tabela 41 - Informações dos trechos referentes às vias secundárias.

Trecho	Local	Comp. (m)	Larg. (m)	Área (m²)
1	Largo Wanda de Oliveira	676	8,5	5746
2	Av. Carlos Chagas Filho (lado do CCS)	140	9	1260
3	Av. Carlos Chagas Filho (lado do EEFD)	222	8,5	1887
4	Retorno na Av. Carlos Chagas Filho	12	9,5	114
5	Retorno atrás do Terminal da UFRJ (1)	191	6	1146
6	Retorno atrás do Terminal da UFRJ (2)	136	6	816
7	R. Prof. Rodolpho Paulo Rocco (lado do CCS)	399	6	2394
8	R. Prof. Rodolpho Paulo Rocco (lado do HU)	568	6	3408
9	R. Luís Renato Caldas	309	4,5	1391
10	Av. Carlos Chagas Filho	131	8	1048
11	Av. Horácio Macedo	174	7,5	1305
12	Av. Horácio Macedo (trecho mais próximo da PU)	45	7	315
13	R. Maria Paulina de Souza / R. Lobo Carneiro	692	11	7612
14	R. Milton Santos	353	11,5	4060
15	Triangulo R. Lobo Carneiro com R. Milton Santos	627	11	6897
16	Av. Pedro Calmon	710	10,5	7455
17	Retorno na Av. Pedro Calmon	12	7	84
18	Av. Athos da Silveira Ramos	90	6,5	585
19	R. Lobo Carneiro	263	13	3419
20	Entrada da Ilha do Fundão pela Linha Vermelha	141	9	1269
21	Saída da Ilha do Fundão pela Linha Amarela	112	7	784
22	R. Moniz Aragão (lado do CT)	559	7	3913
23	R. Moniz Aragão (lado do Coppetec)	508	5,5	2794
24	Av. Pedro Calmon	1327	11	14597
25	R. Afrânio Coutinho	165	6,5	1073
26	R. Pascoal Lemme	308	12,5	3850
27	Retorno na Av. Pedro Calmon	12	10	120
28	R. Paulo Emílio Barbosa / R. Hélio de Almeida	825	13	10725
29	Av. Horácio Macero	869	12	10428
30	Retorno na Av. Horácio Macero	12	7	84
31	R. Hélio de Almeida	706	11	7766
Total				108344

Sabendo-se que a área total a ser pavimentada é de 108344 m², e conhecendo-se as espessuras do revestimento, da base e do reforço do subleito, foi possível calcular o volume de cada material adotado para o pavimento flexível. A Tabela 42 apresenta o volume a ser utilizado de cada material, considerando também o acréscimo de 10% sobre o volume calculado.

Tabela 42 - Determinação do volume necessário de cada material – Pavimento flexível.

Camada	Material	Espessura da camada (cm)	Área a ser pavimentada (m²)	Volume (m³)	Volume majorado em 10% (m³)
Revestimento	Concreto asfáltico (CA)	10	108344	10835	11919
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	15	108344	16252	17878
Reforço do subleito	Rachão	55	108344	59590	65549

De posse dos volumes necessários de cada um dos materiais e de seus preços unitários médios, foi determinado o custo de material referente a cada uma das camadas, assim como o custo total de materiais. Os referidos custos são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 - Custo das camadas e custo total de materiais do pavimento flexível (SINAPI, 2022).

Camada	Material	Volume (m³)	Preço (R\$/m³)	Custo (R\$)
Revestimento	Concreto asfáltico (CA)	11919	1.328,49	15.834.272,31
Base	Brita Graduada Simples (BGS)	17878	124,97	2.234.213,66
Reforço do subleito	Rachão	65549	80,53	5.278.660,97
Total			23.347.146,94	

4.3 CUSTO TOTAL DE MATERIAIS

O custo total é o somatório do custo dos materiais indispensáveis à construção de ambos os pavimentos projetados. A Tabela 44 apresenta o custo total necessário para subsidiar os materiais gastos na confecção dos pavimentos rígido e flexível da Ilha do Fundão.

Tabela 44 - Custo total de materiais.

Pavimento	Custo (R\$)
Rígido	10.234.589,29
Flexível	23.347.146,94
Total	33.581.736,23

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do trabalho apresentado foi possível se conhecer as etapas presentes no processo de dimensionamento dos pavimentos rígido e flexível. É imprescindível que todas essas etapas sejam seguidas corretamente para que os pavimentos apresentem boa qualidade durante os 20 anos de projeto, garantindo vias confortáveis e seguras a todos que necessitarem transitar pela Ilha do Fundão.

Deve-se ter extremo controle na execução de cada uma das camadas dos pavimentos e na verificação das características dos materiais, de forma a garantir que eles atendam a todas as especificações exigidas. A mão de obra utilizada deve ser qualificada para cada um dos tipos de pavimento, principalmente no que diz respeito ao pavimento rígido, uma vez que sua durabilidade é bastante sensível à qualidade de execução das placas de concreto.

Em suma, o projeto apresentado proporcionará a melhoria como um todo dos pavimentos da Ilha do Fundão. Além disso, a ampliação da rota do BRT para que passe pelas vias principais da ilha em questão, possibilitará ganhos em termos de praticidade aos estudantes, trabalhadores e moradores do local.

Quanto à questão de sugestões para trabalhos futuros, é importante se obter algumas informações complementares para tornar o projeto de pavimentação o mais econômico possível, além de trazer mais detalhes para viabilizar a sua execução. A seguir, são listadas algumas dessas informações necessárias:

1. Realização de uma contagem de veículos atualizada, devendo ser feita no cenário pós pandemia, quando as atividades da Ilha do Fundão voltarem à normalidade;
2. Realização de ensaios para a determinação do CBR do subleito;
3. Realização de dosagem dos materiais e das misturas;
4. Elaboração mais detalhada dos custos associados ao projeto, levando-se em conta todos os serviços envolvidos e não só o custo com os materiais necessários;
5. Elaboração de um cronograma de obras.

A obtenção da informação referente ao fluxo atual de veículos e ao CBR do subleito possibilitará que o projeto fique mais acurado, e com isso, mais adequado frente às

demandas do tráfego existente na Ilha do Fundão, evitando-se subdimensionamentos ou superdimensionamentos das camadas dos pavimentos projetados. No que diz respeito à definição dos custos de forma mais detalhada e à elaboração de um cronograma de obras, seria interessante que existisse um projeto mais focado em toda a questão gerencial e administrativa das obras de pavimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Estradas de Concreto: Este é o Caminho do Futuro.** São Paulo, SP, Brasil, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6023: Informação e Documentação – Referências – Elaboração.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.

ALÉM DA INÉRCIA, **Conceitos de Pavimento de Concreto Simples.** Disponível em: <<https://alemdainercia.com/2018/04/25/conceitos-de-pavimento-de-concreto-simples/>> Acesso em 18 de janeiro de 2022.

ALLERS, L. R., **Impactos da Construção da Ponte Saber no Tráfego e no Pavimento das Principais Vias da Ilha do Fundão.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Fevereiro de 2017.

ALMEIDA, J. V., **Modelagem Numérica Tridimensional de Pavimentos de Concreto Submetidos às Cargas do Tráfego e ao Empenamento Térmico.** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Março de 2019.

ANDRADE, F. O., **Análise de Alternativas de Estruturas de Pavimentos para Centros de Distribuição de Bebidas.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Setembro de 2019.

ARAO, M., **Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Março de 2014.

ARAÚJO, M. A., SANTOS, M. J. P., PINHEIRO, H. P., *et al.*, “Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (Concreto) x Flexível (Asfalto)”, **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 10, edição 11, pp. 187-196, Novembro de 2016.

BALBO, J. T., **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** 1 ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

BALBO, J. T., **Pavimentos de Concreto.** 1 ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2009.

BATISTA, E. R., **Pavimentos de Concreto com e sem Armadura Estrutural: Cotejamento de Atributos Relativos a Projeto, Dimensionamento, Construção e Custos de Implantação**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Sergipe – UFS, São Cristóvão, SE, Brasil, Agosto de 2021.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., *et al.*, **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.

BIANCHI, F. R., BRITO, I. R. T., CASTRO, V. A. B., **Estudo Comparativo Entre Pavimento Rígido e Flexível**. UCL – Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste, Serra, ES, Brasil, Setembro de 2008.

BRAGA, C. W. C., **Dimensionamento de Pavimento Flexível: Aplicação de Materiais como Camadas de Pavimento pelo Método Empírico de Dimensionamento do DNIT**. Trabalho de Conclusão de Curso II, Universidade Federal do Maranhão – UFMA, São Luís, MA, Brasil, 2018.

CALLEJAS, I. J. A., DURANTE, L. C., ROSSETI, K. A. C., “Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas”, **E&S - Engineering and Science**, v. 1, edição 3, 2015.

CAMPOS, R. S., “Executando Caminhos em Pavimento de Concreto”. **Estradas de Concreto: Uma Escolha Inteligente e Sustentável**, Seminário ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, Setembro de 2019.

CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B., **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. 1 ed. ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

CERATTI, J. A. P., **Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril de 1991.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, Anuário CNT do Transporte – Estatísticas Consolidadas 2021. CNT, Brasília, DF, Brasil, 2021a.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, Pesquisa CNT de Rodovias 2021. CNT/SEST SENAT, Brasília, DF, Brasil, 2021b.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, **IPR 667: Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1981.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **IPR 714: Manual de Pavimentos Rígidos**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **IPR 719: Manual de Pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006a.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **IPR 723: Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006b.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, **Norma DNIT 137/2010-ES: Pavimentação – Regularização do Subleito – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

FERMINO, G. C., CERATTI, J. A. P., “Comparativo Teórico Entre Três Diferentes Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis”. **Salão UFRGS 2016: SIC – XXVIII Salão de Iniciação Científica da UFRGS**, Porto Alegre, RS, Brasil, 2016.

FERNANDES, W. D., **Análise Comparativa Entre os Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do Brasil e o Método da AASHTO**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, Julho de 2016.

FONSECA, A. M., **Avaliação da Influência do Controle Tecnológico na Qualidade de Obras de Pavimentação – Estudo de Caso: Viário do Parque Olímpico**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril de 2016.

GOINFRA – AGÊNCIA GOIANA DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES, **InSTRUÇÃO DE PROjetos Rodoviários: IP - 10 GOINFRA – Projeto Pavimentação**. Diretoria de Obras Rodoviárias: Gerência de Projetos Rodoviários, Goiânia, GO, Brasil, Agosto de 2018.

GOMES, M. J. T. L., **Volume Horário de Projeto para as Rodovias Estaduais do Ceará: Análise e Contribuição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE, Brasil, Dezembro de 2004.

GUERINI, J. F., **Proposta de Implementação de Sistema de Gerência de Pavimentos para a Ilha do Fundão**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Fevereiro de 2017.

HENRIQUE, Y. F., **Método de Avaliação de Pavimentos Aeroportuários - Aplicação a um Aeródromo Militar**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Março de 2013.

IF – INSTITUTO DE FÍSICA, Universidade federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Disponível em: <<https://www.if.ufrj.br/~coelho/Rio/Rio.htm>> Acesso em 11 de janeiro de 2022.

JOVER, G. R., **Sistema de Gerência de Pavimentos com Ênfase na Manutenção e Reabilitação para a Ilha do Fundão na Cidade do Rio de Janeiro**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Dezembro de 2017.

JÚNIOR, J. G. S., **Aplicação do Novo Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos a Trechos de uma Rodovia Federal**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Setembro de 2018.

JÚNIOR, J. L. F., ODA, S., ZERBINI, L. F., **Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos**. Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil, Janeiro de 2006.

JUNIOR, P. R. A., REIS, E. A. P., “Principais Diferenças Entre o Pavimento Flexível e o Pavimento Rígido”. **ETIC 2018 – Encontro de Iniciação Científica**, Presidente Prudente, SP, Brasil, 2018.

LEME, F. N. D. P., **Dimensionamento: Pavimento de Concreto – Método PCA/84**. Webinar ABCPonLINE, ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, Maio de 2021.

MAPA DA OBRA, A Importância do Pavimento de Concreto em Rodovias. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/pavimento-de-concreto-em-rodovias/>> Acesso em 10 de janeiro de 2022.

MAPA DA OBRA, Pavimento Rígido: Solução para Corredores de Ônibus. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/inovacao/pavimento-rigido-para-corredores-de-onibus/>> Acesso em 10 de janeiro de 2022.

MAPA DA OBRA, Tipos de Pavimentos para Vias Públicas. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/negocios/tipos-de-pavimentos/>> Acesso em 10 de janeiro de 2022.

MARQUES, G. L. O., **Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis (Método do DNIT)**, Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil.

MASCHIO, A., **Pavimentos Urbanos de Concreto**. Treinamento ABCPonLINE, ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, Março de 2021.

ODA, S., **Notas de aula de Geotecnia Rodoviária – Pavimento Flexível**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

OLIVEIRA, P. L., **Projeto Estrutural de Pavimentos Rodoviários e de Pisos Industriais de Concreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP, Brasil, 2000.

REALES, O. A. M., **Notas de aula de Geotecnia Rodoviária – Pavimento Rígido**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

REIS, R. M. M., TEIXEIRA, L. H., CONSTANTINO, R., *et al.*, **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. 2 ed. ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Agosto de 2010.

RIO PREFEITURA, Prefeitura Apura Irregularidades em Obra do BRT Transcarioca que Podem Ter Dado Milhões de Prejuízo. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/guest/exibeconteudo?id=8575959>> Acesso em 19 de fevereiro de 2022.

ROSSI, A. C., **Etapas de uma Obra de Pavimentação e Dimensionamento de Pavimento para uma Via na Ilha do Fundão**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Fevereiro de 2017.

SANCHES, A. E., **Planejamento dos Transportes - Apostila 4: Planejamento e Redes de Transportes**. Manaus, AM, Brasil, 2019.

SANTOS, M. D., ROSA, T. S. C., CUCONATO, P., *et al.*, “Pavimentação de Qualidade das Vias Públicas como uma das Garantias dos Direitos Constitucionais dos Cidadãos”, **Revista Científica UBM**, v. 23, n. 44, pp. 150-165, Barra Mansa, RJ, Brasil, 2021.

SENÇO, W., **Manual de Técnicas de Pavimentação - Volume II**. 1 ed. São Paulo, Pini, 2001.

SETTI, J. R., **Aspectos Teóricos do Fluxo de Tráfego**. Universidade de São Paulo – USP. Disponível em:

<[https://www.stt.eesc.usp.br/setti/stt602/slides/Teoria%20de%20fluxo%20de%20trafego\[1\].pdf](https://www.stt.eesc.usp.br/setti/stt602/slides/Teoria%20de%20fluxo%20de%20trafego[1].pdf)> Acesso em 10 de janeiro de 2022.

SILVA, J. B. R., “Barras de Transferência e de Ligação”. **Estradas de Concreto: Uma Escolha Inteligente e Sustentável**, Seminário ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, Setembro de 2019.

SINAPI – SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, **Cadernos Técnicos de Composições para Aterros, Bases, Sub-bases e Imprimações**. CAIXA, Brasil, Maio de 2021.

SINAPI – SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, **Cadernos Técnicos de Composições para Asfalto**. Versão V-4. CAIXA, Brasil, Novembro de 2019.

SINAPI – SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, **Cadernos Técnicos de Composições para Pavimento Rígido de Concreto**. CAIXA, Brasil, Junho de 2021.

SINAPI – SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL, **Relatório de Insumos e Composições – DEZ/21 – RJ – Sem Desoneração**. CAIXA, Brasil, Janeiro de 2022.

SOUZA, P. M., Proposta de Implementação do Sistema de Gerência de Pavimentos para a Cidade do Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Agosto de 2015.

VIVA A ILHA DO FUNDÃO – CONCURSO FOTOGRÁFICO, A Ilha e suas Múltiplas Pontes. COPPE/UFRJ. Disponível em: <<http://www.coppe50anos.coppe.ufrj.br/vivailha/pt/a-ilha/sobre>> Acesso em 11 de janeiro de 2022a.

VIVA A ILHA DO FUNDÃO – CONCURSO FOTOGRÁFICO, História. COPPE/UFRJ. Disponível em: <<http://www.coppe50anos.coppe.ufrj.br/vivailha/pt/a-ilha/historia>> Acesso em 11 de janeiro de 2022b.