



**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE
DIMENSIONAMENTO DE ESTRADAS DE BAIXO
VOLUME DE TRÁFEGO**

Isabela Borges dos Santos Silva

Relatório Final de Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Novembro, 2020



**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE
DIMENSIONAMENTO DE ESTRADAS DE BAIXO
VOLUME DE TRÁFEGO**

Isabela Borges dos Santos Silva

Dissertação apresentada à
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de
Bragança**
para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção
no âmbito da Dupla Diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientadores:

Professor Doutor António Miguel Verdelho Paula
Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto
Professor Doutor Ewerton Clayton Alves da Fonseca

Novembro, 2020

DEDICATÓRIA

*Dedico aos meus pais e ao meu irmão,
que me deram total apoio e tornaram essa
jornada possível.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela minha vida, por ter guiado meus caminhos e me ajudado a superar cada obstáculo que foi colocado durante o meu trajeto.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Professores Doutores António Miguel Verdelho Paula, Manuel Joaquim da Costa Minhoto e Ewerton Clayton Alves da Fonseca, pela orientação, suporte e paciência que me deram no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Campo Mourão (UTFPR-CM) e ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) pela oportunidade e pelo comprometimento em formar profissionais mais capacitados.

Agradeço aos meus familiares e amigos que sempre estiverem ao meu lado me incentivando e dando todo o apoio que precisava.

RESUMO

A malha rodoviária é um importante aspecto no desenvolvimento econômico, social e cultural de um país. É responsável por ligar áreas rurais e urbanas e por permitir o deslocamento de pessoas e produtos por todo o território terrestre. Estradas não pavimentadas geralmente são uma evolução das trilhas e dos caminhos de terras precárias, caracterizadas pelo baixo custo de implementação e por tolerar grandes deformações. Devido a sua importância, é essencial que essas estradas sejam estudadas e projetadas de forma adequada e eficaz para que possam atender as necessidades dos usuários e garantir um tráfego confortável e seguro.

Com o objetivo de melhorar as condições das estradas de baixo volume de tráfego (EBVT) não pavimentadas, este trabalho apresenta um comparativo entre três métodos diferentes de dimensionamento. O primeiro método refere-se ao Manual ERA (2011) que utiliza as variáveis CBR e tráfego para o dimensionamento. A segunda metodologia corresponde ao método Austroads (2009) que também faz uso das variáveis CBR e tráfego para o dimensionamento. Por fim o Manual FCE (Brito, 2011) que utiliza apenas a classificação do solo, conseqüentemente o valor de CBR, para determinar a espessura da camada de base da estrada.

Para a aplicação das metodologias referidas, uma estrada localizada na região do parque natural de Montesinho, responsável por assegurar o acesso entre duas barragens que abastecem o distrito de Bragança, foi alvo do estudo. Por meio de ensaios laboratoriais e “*in situ*” realizados por Cabette (2018) e Freitas (2019) foi possível estimar algumas características físicas e mecânicas sobre a estrutura da estrada e, assim, determinar a espessura da camada de base necessária para as condições aplicadas.

A espessura da camada de base dimensionada pelos três métodos foi similar, variando de 10 – 15 cm de espessura. Após um estudo de sensibilidade das variáveis de entrada das metodologias apresentadas, chegou-se à conclusão de que para o Manual ERA (2011) a variável tráfego é a mais sensível, enquanto que para o método Austroads (2009) a variável mais sensível é o valor de CBR, e em relação ao Manual FCE (Brito, 2011) a resistência do material específico do subleito e o valor de CBR são as variáveis mais sensíveis.

Palavras-Chave

Estradas não pavimentadas; dimensionamento; método; manual.

ABSTRACT

The road network is an important aspect of a country's economic, social and cultural development. It is responsible for connecting rural and urban areas and for allowing the movement of people and products throughout the terrestrial territory. Unpaved roads are generally an evolution of precarious trails and dirt paths, characterized by the low cost of implementation and by tolerating large deformation. Due to their importance, it is essential that those roads are studied and designed in an appropriate and effective way so that they can meet the needs of users and ensure comfortable and safe traffic.

In order to improve the conditions of the unpaved low traffic roads, this work presents a comparison between three different design methods. The first method refers to the ERA Manual (2011) which uses the CBR and traffic variables for the design. The second methodology corresponds to the Austroads method (2009) which also makes use of the CBR and traffic variables for the design. Finally, the FCE Manual (Brito, 2011) which uses only the soil classification, consequently the CBR value, to determine the thickness of the base layer of the road.

For the application of the aforementioned methodologies, a road located in the Montesinho natural park region, responsible for ensuring access between two dams that supply the district of Bragança, was the target of the study. Through laboratory and “*in situ*” tests carried out by Cabette (2018) and Freitas (2019) it was possible to estimate some physical and mechanical characteristics on the road structure and thus determine the thickness of the base layer required for the applied conditions.

The thickness of the layer designed by the three methods was similar, ranging from 10 – 15 cm in thickness. After a sensitivity study of the input variables of the presented methodologies, it was concluded that for the ERA Manual (2011) the traffic variable is the most sensitive, while for the Austroads method (2009) the most sensitive variable is the CBR value, and in relation to the FCE Manual (Brito, 2011) the resistance of the specific subgrade material and the CBR value are the most sensitive variables.

Keywords

Unpaved roads; sizing; method; manual.

SUMÁRIO

1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organização do Trabalho.....	3
2 Estradas Não Pavimentadas.....	5
2.1 Estrutura de Estradas Não Pavimentadas.....	5
2.2 Avaliação Funcional e Estrutural.....	7
2.3 Classificação do Pavimento - <i>Pavement Surface Evaluation and Rating – Gravel PASER Manual</i>	8
2.4 Métodos de Dimensionamento de EBVT Não Pavimentada.....	11
2.4.1 <i>Austroads Guide to Pavement Technology: Part 6 (2009)</i>	11
2.4.2 <i>The Forestry Civil Engineering Design Recommendation – (Brito, 2011)</i> ...	14
2.5 Manuais e Guias Complementares	16
2.5.1 <i>Low-Volume Roads Engineering – Best Management Practices Field Guide</i>	16
2.5.2 <i>Gravel Roads Management: Implementation Guide – Wyoming – EUA</i>	22
2.5.3 Uma Aplicação Comparativa de Métodos de Avaliação das Condições Superficiais de Estrada Não-Pavimentada – Campinas, Brasil.....	22
3 Dimensionamento da EBVT Não Pavimentada	25
3.1 Local de Estudo	25
3.2 Estudos de Cabette (2018)	27
3.2.1 Método Austroads (2009)	31
3.2.2 Método FCE (Brito, 2011).....	32
3.3 Estudos de Freitas (2019)	33
3.3.1 Método Austroads (2009)	36
3.3.2 Método FCE (Brito, 2011).....	37

4 Análise Comparativa.....	39
4.1 Análise Comparativa dos Ensaios.....	39
4.1.1 Seções Homogêneas.....	39
4.1.2 Valor de CBR.....	41
4.1.3 Peso Específico Seco e Teor em Água Ótimo	41
4.1.4 Módulo de Deformabilidade	42
4.1.5 Compactação do Solo	44
4.2 Análise Comparativa das Metodologias	45
4.3 Estudo de Sensibilidade	47
4.3.1 Manual ERA (2011).....	47
4.3.2 Austroads (2009).....	51
4.3.3 FCE (Brito, 2011)	53
5 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	55
Referências Bibliográficas	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Percentagem de estradas não pavimentadas em relação ao total de estradas (km) em alguns países. (Adaptado CIA, 2020).	2
Tabela 2: Classificação PASER: 5 Excelente. (Adaptado Walker, 2002).....	9
Tabela 3: Classificação PASER: 4 – Boa. (Adaptado Walker, 2002).	9
Tabela 4: Classificação PASER: 3 – Regular. (Adaptado Walker, 2002).....	10
Tabela 5: Classificação PASER: 2 – Ruim. (Adaptado Walker, 2002).	10
Tabela 6: Classificação PASER: 1 – Fracassado. (Adaptado Walker, 2002).....	11
Tabela 7: Tráfego para projeto. (Adaptado Austroads, 2009).	13
Tabela 8: Determinação da espessura da camada de base - FCE. (Adaptado Brito, 2011).	15
Tabela 9: Classificação do solo nos pontos representativos. (Adaptado Cabette, 2018).	29
Tabela 10: Valores de CBR nos pontos representativos. (Adaptado Cabette, 2018).	29
Tabela 11: Resultados do ensaio de Proctor Normal. (Cabette, 2018).	30
Tabela 12: Resultado do ensaio de Carga em Placa. (Cabette, 2018).	30
Tabela 13: Resultado do ensaio do Gamadensímetro. (Cabette, 2018).	31
Tabela 14: Classificação do solo nos pontos representativos. (Adaptado Freitas, 2019).	34
Tabela 15: Valores de CBR nos pontos representativos. (Adaptado Freitas, 2019).	34
Tabela 16: Resultados do ensaio de Proctor Normal. (Freitas, 2019).	35
Tabela 17: Resultados do ensaio LFWD. (Freitas, 2019).	35
Tabela 18: Relação do módulo E _{vd} com a compactação do solo (Zorn, 2016).	36
Tabela 19: Relação E _{vd} e Grau de Compactação. (Freitas, 2019).	36
Tabela 20: Comparação dos valores de CBR.	41
Tabela 21: Comparação do peso específico aparente seco.	42
Tabela 22: Comparação do teor em água ótimo.	42
Tabela 23: Comparação do módulo de deformabilidade.	43
Tabela 24: Relação E _{vd} e E _{v2}	44
Tabela 25: Compactação do solo.	44
Tabela 26: Comparativo – Cabette (2018).	46
Tabela 27: Comparativo – Freitas (2019).	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do pavimento de uma EBVT. (Adaptado SATCC, 2003).....	5
Figura 2: Distribuição de carga da roda através da estrutura do pavimento. (Adaptado SATCC, 2003).....	7
Figura 3: Curvas granulométricas para camada de desgaste não pavimentada. (Austroads, 2009).....	12
Figura 4: Curva granulométrica para camada de base e sub-base. (Austroads, 2009)...	13
Figura 5: Determinação da espessura da camada de base. (Adaptado Austroads, 2009).	14
Figura 6: Curva granulométrica das camadas de base e de desgaste – FCE. (Adaptado Brito, 2011).....	16
Figura 7: Exemplo de uma estrada com um sistema de drenagem ineficaz. (Keller <i>et al.</i> , 2003).....	17
Figura 8: Exemplo de uma estrada com um bom sistema de drenagem. (Keller <i>et al.</i> , 2003).....	17
Figura 9: Correlação entre a velocidade de fluxo e o diâmetro do agregado. (Keller <i>et al.</i> , 2003).....	19
Figura 10: Proteção da estrada contra o alto fluxo de água utilizando <i>riprap</i> e geotêxtil. (Keller <i>et al.</i> , 2003).....	20
Figura 11: Esquema de drenagem superficial de estradas. (Adaptado Keller <i>et al.</i> , 2003).	21
Figura 12: Localização da estrada de baixo volume de tráfego não pavimentada.	26
Figura 13: Perfil longitudinal da EBVT. (Freitas, 2019).....	27
Figura 14: Perfil geotécnico (cm) dos pontos representativos. (Cabette, 2018).....	28
Figura 15: Dimensionamento (cm) Método Austroads (2009). (Cabette, 2018).....	32
Figura 16: Dimensionamento (cm) Método FCE (Brito, 2011). (Cabette, 2018).	33
Figura 17: Dimensionamento (cm) Método Austroads (2009). (Freitas, 2019).....	37
Figura 18: Dimensionamento (cm) FCE (Brito, 2011). (Freitas, 2019).....	37
Figura 19: Seções homogêneas pelo ensaio PDL - Cabette. (Freitas, 2019).....	40
Figura 20: Seções homogêneas pelo ensaio CP - Cabette. (Freitas, 2019).	40
Figura 21: Seções homogêneas pelo ensaio LFWD - Freitas. (Freitas, 2019).	40
Figura 22: Dimensionamento (cm) da EBVT – Cabette (2018).....	45

Figura 23: Dimensionamento (cm) da EBVT – Freitas (2019).....	46
Figura 24: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Manual ERA (2011) CBR 45%.....	48
Figura 25: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Manual ERA (2011) CBR 30%.....	48
Figura 26: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Manual ERA (2011) – CBR 15%.....	49
Figura 27: Variação da espessura (%) da camada de base – Manual ERA (2011) – CBR 45%.....	50
Figura 28: Variação da espessura (%) da camada de base – Manual ERA (2011) – CBR 30%.....	50
Figura 29: Variação da espessura (%) da camada de base – Manual ERA (2011) CBR 15%.....	51
Figura 30: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Austroads (2009).	52
Figura 31: Variação da espessura (%) da camada de base – Austroads (2009).	52
Figura 32: Influência do CBR e do tipo de material na espessura do pavimento – FCE (Brito, 2011).	53

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CP	Carga em Placa
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DVI	<i>Detailed Visual Inspection</i>
EBVT	Estrada de Baixo Volume de Tráfego
ERA	<i>Ethiopian Roads Authority</i>
ERCI	<i>Earth Road Condition</i>
ESA	<i>Equivalent Standard Axle</i>
FCE	<i>The Forestry Civil Engineering</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GPM	<i>Gravel PASER Manual</i>
GRMS	<i>Gravel Roads Management: Implementation Guide</i>
LFWD	<i>Light Falling Weight Deflectometer</i>
MTPW	<i>Ministry of Transport and Public Works</i>
PASER	<i>Pavement Surface Evaluation and Rating</i>
PDL	Penetrômetro Dinâmico Ligeiro
RCS	<i>Road Condition Survey</i>
RSMS	<i>Road Surface Management System</i>
SATCC	<i>Southern Africa Transport and Communications Commission</i>
TMDA	Tráfego Médio Diário Anual
URCI	<i>Unsurfaced Road Condition Index</i>

CAPÍTULO 1

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A malha rodoviária é uma peça importante no desenvolvimento econômico, social e cultural de um país. É responsável por permitir o deslocamento de pessoas e mercadorias por todo o território terrestre além de proporcionar novos postos de trabalho, direta ou indiretamente, relacionados com o meio de transporte.

A evolução, ao longo do tempo, das trilhas e dos caminhos de terras precários resultou nas estradas não pavimentadas. Estas surgiram da necessidade em ligar a zona rural e urbana para que a população do campo tivesse acesso aos serviços básicos de saúde, educação e lazer que as cidades proporcionavam, bem como o escoamento de produtos agrícolas. Vale ressaltar que a escolha por esse tipo de estradas é, principalmente, em função do seu baixo custo de implementação e tolerância a grandes deformações (Rodrigues, 2015).

As causas determinantes das intervenções de conservação periódicas e recorrentes dessas estradas são a ineficiência, e até a inexistência, de um sistema adequado de drenagem das águas no leito da estrada e as grandes deformações provocadas pela falta de resistência do solo que a compõe. Isto se dá pelo fato de que, na sua maioria, essas estradas não são adaptadas para suportar um tráfego diário de caminhões e equipamentos agrícolas de grande porte. Estes fatores, somados aos períodos de chuva, tornam as deformações excessivas, o surgimento de rupturas localizadas e erosões mais recorrentes, promovendo difícil acesso e desconforto aos passageiros (Guedes, 2018).

Na Tabela 1 é apresentado, de forma simplificada, a percentagem de estradas não pavimentadas em relação ao total de estradas (km) de alguns países, a fim de salientar a importância das mesmas no transporte rodoviário.

Tabela 1: Percentagem de estradas não pavimentadas em relação ao total de estradas (km) em alguns países. (Adaptado CIA, 2020).

Continentes	País	Estradas (km)	Estradas Não Pavimentadas (%)	Ano
África	África do Sul	750.000	78,9%	2016
	Egito	65.050	26,2%	2017
	Angola	26.000	47,7%	2018
América	EUA	6.586.610	34,6%	2012
	Canadá	1.042.300	60,1%	2011
	Cuba	60.000	66,7%	2015
	Brasil	2.000.000	87,7%	2018
	Argentina	281.290	58,2%	2017
Europa	Portugal	82.900	14,0%	2008
	Hungria	203.601	62,1%	2014
	Suécia	573.134	75,6%	2016
Ásia	Japão	1.218.772	18,5%	2015
	China	4.960.600	12,5%	2017
	Rússia	1.283.387	27,7%	2012
Oceania	Nova Zelândia	94.000	34,5%	2017

Por meio da Tabela 1 é possível observar que a percentagem de estradas não pavimentadas é consideravelmente elevada por todo o globo. Sua existência não pode ser assimilada à riqueza do país, visto que países considerados desenvolvidos como Japão, Estados Unidos e Canadá apresentam um percentual significativo de estradas não pavimentadas, 18,5%, 34,6 % e 60,1%, respectivamente.

O Brasil, a África do Sul e a Suécia são uns dos países que apresentam a maior taxa de estradas não pavimentadas, ultrapassando 75% de toda a sua malha rodoviária nacional. Quando comparado com os demais, Portugal é um dos países com menor índice de estradas não pavimentadas, computando 14% de toda sua malha nacional, entretanto, ainda apresenta um índice expressivo relativo a suas vias.

Tendo em vista que a existência de estradas não pavimentadas é uma realidade recorrente por todo o mundo e levando em consideração a sua importância para uma região e até mesmo para um país, é interessante que estudos sejam realizados para aprimorar e desenvolver métodos de dimensionamento, de construção e de manutenção que possibilitem uma melhora no desenvolvimento de estradas não pavimentadas, aumentando sua vida útil, proporcionando melhor conforto e segurança para os usuários, além de reduzir os impactos ambientais que podem ser causados.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo central realizar uma análise comparativa entre os métodos de dimensionamento direcionados para estradas não pavimentadas de baixo volume de tráfego praticados por outros países como os Estados Unidos, Austrália e Reino Unido.

Como objetivos secundários, têm-se:

- Apresentar métodos de dimensionamento de estradas não pavimentadas de baixo volume de tráfego;
- Utilizar os parâmetros obtidos nas dissertações anteriores nos dimensionamentos indicados na presente dissertação;
- Realizar um comparativo dos resultados dos ensaios anteriores;
- Realizar um estudo de sensibilidade dos métodos;
- Verificar a viabilidade da aplicação dos métodos retratados.

1.3 Organização do Trabalho

A estrutura deste trabalho é composta por 5 capítulos.

No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema central da dissertação. Em seguida são expostos os objetivos desejados e a organização do trabalho.

No capítulo 2 é apresentado diferentes métodos de dimensionamento de estradas não pavimentadas de baixo volume de tráfego baseados em manuais e normas internacionais adotados por outros países. Neste capítulo são apresentados os parâmetros geotécnicos utilizados em cada metodologia, como é feito o dimensionamento da estrada e quais são as considerações a serem feitas ao se adotar determinado método.

No capítulo 3 é feito o dimensionamento de uma estrada em estudo - localizada no distrito de Bragança, Portugal - utilizando os resultados obtidos em estudos anteriores e os métodos apresentados no capítulo 2.

O capítulo 4 tem como objetivo realizar um comparativo entre os resultados dos ensaios realizados anteriormente, os métodos de dimensionamento estudados e apresentar um estudo de sensibilidade das metodologias de dimensionamento.

O capítulo 5 contém as conclusões mais importantes do estudo e as recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

2 Estradas Não Pavimentadas

2.1 Estrutura de Estradas Não Pavimentadas

De acordo com o Livro de Atas (2015, apud Baesso e Gonçalves, 2003) pavimentos cuja superfície é constituída pelos seguintes materiais, podem ser consideradas estradas não pavimentadas:

- a. Agregados naturais identificados como cascalho;
- b. Pedregulhos oriundos de jazidas e seixo rolados;
- c. Agregados artificiais conhecidos como os materiais britados;
- d. Solos constituídos por materiais da própria base ou subleito e solos naturalmente estabilizados.

Estradas de baixo volume de tráfego (EBVT) apresentam uma estrutura relativamente simples, podendo ser pavimentadas ou não pavimentadas. A Figura 1 mostra a composição estrutural principal de uma EBVT.

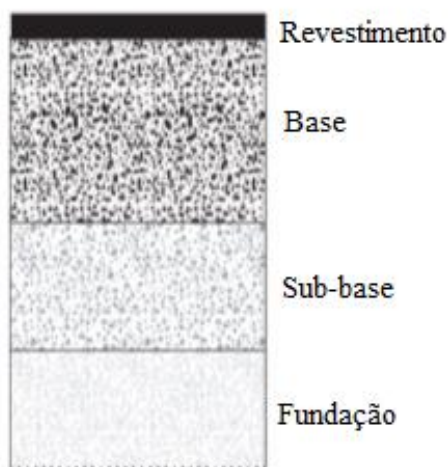


Figura 1: Estrutura do pavimento de uma EBVT. (Adaptado SATCC, 2003).

MTPW (2013) e SATCC (2003) caracterizam as camadas constituintes do pavimento da seguinte forma:

- a. Revestimento: camada superficial uniforme, segura, econômica e durável para todos os climas; minimiza a infiltração de umidade na estrutura do pavimento; diminui os custos com manutenção dos veículos; proporciona melhores condições quanto a poeira, resistência à derrapagem e textura da superfície. Em estradas não pavimentadas essa camada não existe.

- b. Base: principal camada de suporte responsável pela maior parte da capacidade estrutural e pela distribuição das cargas no pavimento; reduz as mudanças da resistência com o tempo devido à baixa suscetibilidade à umidade; minimiza a entrada de umidade por possuir propriedades adequadas de incompressibilidade e fadiga.
- c. Sub-base: fornece uma plataforma de construção para as camadas superiores; geralmente construída com materiais de qualidade inferior se comparado com a camada de base; consiste em uma camada secundária que auxilia na distribuição das cargas e mantém as deformações no subleito dentro dos limites aceitáveis.
- d. Fundação ou Subleito: camada inferior natural que suporta toda a estrutura do pavimento. Esta é compactada durante a construção para garantir maior resistência.

Os defeitos mais comuns presentes nas estradas não pavimentadas são decorrentes de fatores climáticos, condição de tráfego ou de manutenção inadequada. Uma correlação entre estes fatores e suas principais causas são descritos abaixo (Zoccal *et al.*, 2016):

- i. Fatores Climáticos: períodos chuvosos umedecem e encharcam o solo superficial, diminuindo sua capacidade de suporte. Este fator junto com a água que corre na superfície da estrada, causa o arrancamento de material, o transporte e a deposição do mesmo em outro local, surgindo assim buracos e valas;
- ii. Condição de Tráfego: o trânsito de veículos gera tensões na estrutura do pavimento, provocando deformações na estrada;
- iii. Forma de Manutenção: quando a utilização de maquinários de terraplanagem é usada de forma inadequada, podem causar o efeito contrário do esperado, causando redução da capacidade de suporte da via, alteração da drenagem etc.

Segundo o Manual Era (2013) para evitar-se deformações significativas no subleito os pavimentos rodoviários são projetados, de tal maneira que as tensões provenientes do tráfego de veículos na superfície da estrada sejam limitadas, dessa forma as solicitações concentradas geradas pelas rodas dos veículos são distribuídas em uma área maior quando o subleito é alcançado.

A Figura 2 apresenta a transferência de carga da roda da superfície para o subleito. A tensão aplicada superficialmente é reduzida ao chegar nas camadas mais inferiores, a

pressão que antes se encontrava mais localizada é dispersada conforme se aumenta a profundidade de análise. A resistência do solo a ser utilizado na fundação é que ditará o tipo de estrutura do pavimento a ser adotada (SATCC, 2003).

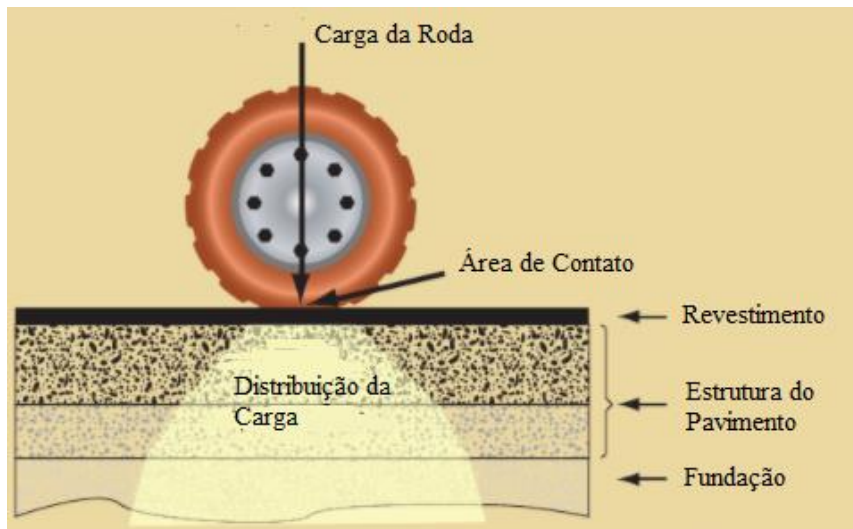


Figura 2: Distribuição de carga da roda através da estrutura do pavimento. (Adaptado SATCC, 2003).

Ter um conhecimento amplo das propriedades mecânicas dos materiais que constituem as camadas do pavimento e da fundação é essencial para a concepção da estrutura rodoviária. A capacidade de carga do pavimento é atribuída à espessura e rigidez dos materiais que a compõem assim como o apoio fornecido pela fundação. Fatores como drenagem e condições climáticas afetam significativamente o desempenho da estrutura como um todo, sendo necessário serem levados em consideração no planejamento rodoviário (Jorge, 2014).

2.2 Avaliação Funcional e Estrutural

Segundo o Departamento de Estradas de Rodagem (DER, 2006) o pavimento é projetado para proporcionar determinado nível de desempenho funcional durante seu período de vida útil.

O pavimento rodoviário pode ser avaliado sob dois aspectos: avaliação funcional e avaliação estrutural. A avaliação funcional reflete a visão do usuário em relação a estrada, no qual o desempenho e serventia da via é avaliado. Já a avaliação estrutural consiste em investigar o comportamento mecânico da estrutura do pavimento e avaliá-lo de forma técnica, ou seja, do ponto de vista do engenheiro de pavimentos (Mota, 2009).

SATCC (2003) reforça que o pavimento deve ser projetado para atender as exigências funcionais e estruturais. Funcionalmente, o tráfego de veículos deve ser seguro, confortável e eficiente a um custo mínimo. Estruturalmente, trata-se de uma

estrutura de suporte que deve funcionar de forma adequada sob as condições ambientais e de tráfego que está sujeita, e demandar uma mínima manutenção no decorrer de sua vida útil.

Para o DER (2006), a avaliação funcional refere-se à capacidade do pavimento em proporcionar uma superfície com qualidade de rolamento ao usuário, enquanto a avaliação estrutural trata-se da capacidade do pavimento em manter sua integridade estrutural (DER, 2006). Bernucci *et al.* (2008) considera que a avaliação funcional de um pavimento consiste na análise da superfície dos pavimentos e como este estado influencia no conforto ao rolamento.

As condições funcionais e estruturais de um pavimento devem ser avaliadas por meio de procedimentos adequados, utilizando metodologias que proporcionam a análise de defeitos que se manifestam na superfície do pavimento. Estes defeitos são consequências da atuação de fatores como clima, ação do tráfego, propriedades dos materiais e processos construtivos que podem agir de forma isolada ou conjunta (Benevides, 2006).

2.3 Classificação do Pavimento - *Pavement Surface Evaluation and Rating – Gravel PASER Manual*

Assim como a avaliação estrutural do pavimento, a avaliação funcional também é imprescindível para manter a qualidade da estrada. Problemas funcionais como buracos, ondulações, afundamentos de trilho de rodas, poeira e cascalhos soltos são exemplos de patologias encontradas nas vias que podem evoluir para um problema estrutural, modificando a estabilidade das camadas inferiores à camada superficial, acarretando manutenções mais severas e menos econômicas.

Segundo Walker (2002) os fatores mais importantes a serem considerados na avaliação funcional é a seção transversal, drenagem e a adequação da camada de cascalho. Tendo em vista que a espessura da camada de cascalho está diretamente relacionada com as condições de tráfego e da resistência do solo adjacente, ela pode variar, entretanto uma espessura mínima de 10 – 15 cm é exigida.

A classificação proposta pelo manual PASER é simples e varia de 1 a 5, sendo 1 (fracassado) a pior situação e 5 (excelente) a melhor situação. Essa está relacionada com o grau e tipo de manutenção que é requerido para a adequação da superfície da estrada, desta forma, é preciso analisar a coroa, o sistema de drenagem e a camada de cascalho (Walker, 2002).

As Tabelas de 2 a 6 mostram como é feita a classificação com base nas condições mencionadas anteriormente, nas condições gerais da estrada e nas medidas de reparo necessárias.

Tabela 2: Classificação PASER: 5 Excelente. (Adaptado Walker, 2002).

Classificação: 5 - Excelente	
Fatores/Defeitos	Condições Gerais
Seção transversal	Excelente
Drenagem	Excelente
Camada de cascalho	Adequada
Buracos	Inexistente
Ondulações	Inexistente
Afundamentos de trilho de rodas	Inexistente
Cascalho solto	Inexistente
Poeira	Controlada
Condições gerais	Construção nova ou reconstruída
Tipo de manutenção	Não há necessidade de manutenção

Tabela 3: Classificação PASER: 4 – Boa. (Adaptado Walker, 2002).

Classificação: 4 - Boa	
Fatores/Defeitos	Condições Gerais
Seção transversal	Boa
Drenagem	Por toda parte
Camada de cascalho	Adequada
Buracos	Inexistente
Ondulações	Leve
Afundamentos de trilho de rodas	Inexistente
Cascalho solto	Moderado
Poeira	Sob condições de secas
Condições gerais	Manutenção recente
Tipo de manutenção	Manutenção de rotina e controle de poeira

Tabela 4: Classificação PASER: 3 – Regular. (Adaptado Walker, 2002).

Classificação: 3 - Regular	
Fatores/Defeitos	Condições Gerais
Seção transversal	Boa
Drenagem	Valas adequadas em mais de 50% da estrada, pode ter a necessidade de limpeza em algumas valas
Camada de cascalho	Adequada na maior parte, mas pode ter necessidade de agregado adicional em alguns locais para corrigir ondulações ou buracos localizados
Buracos	Pequenos buracos isolados (profundidade inferior à 5,0 cm)
Ondulações	Moderada (profundidade de 2,5 - 5,0 cm em 10% - 25% da área)
Afundamentos de trilho de rodas	Inexistente ou leve (profundidade inferior à 2,5 cm)
Cascalho solto	Leve (cerca de 5,0 cm)
Poeira	Moderada, obstrução parcial da visão
Condições gerais	Apresenta as ações do tráfego
Tipo de manutenção	Manutenção no sistema de drenagem e necessidade de regularização em algumas áreas

Tabela 5: Classificação PASER: 2 – Ruim. (Adaptado Walker, 2002).

Classificação: 2 - Ruim	
Fatores/Defeitos	Condições Gerais
Seção transversal	Pouca ou inexistente (coroa menor que 7,5 cm)
Drenagem	Valas adequadas em menos de 50% da estrada, contendo áreas obstruídas, com vegetação ou apresentando erosões
Camada de cascalho	Cerca de 25% da área apresenta pouco ou nenhum agregado
Buracos	Moderado (profundidade entre 2,5 - 10,0 cm em 10% - 25% da área)
Ondulações	Moderada a severa (profundidade superior á 7,5 cm em mais de 25% da área)
Afundamentos de trilho de rodas	Moderado (entre 2,5 - 7,5 cm de profundidade em 10% - 25% da área)
Cascalho solto	Severo (superior à 10 cm)
Poeira	Não especificado
Condições gerais	Tráfego lento
Tipo de manutenção	Manutenção no sistema de drenagem e necessidade de regularização com adição de cascalho

Tabela 6: Classificação PASER: 1 – Fracassado. (Adaptado Walker, 2002).

Classificação: 1 - Fracassado	
Fatores/Defeitos	Condições Gerais
Seção transversal	Inexistência de coroa ou estrada em formato de tigela com presença de poças
Drenagem	Pouca ou inexistência de valas e bueiros danificados
Camada de cascalho	Não especificado
Buracos	Severo (profundidade superior à 10,0 cm) em mais de 25% da área
Ondulações	Não especificado
Afundamentos de trilho de rodas	Severo (profundidade superior à 7,5 cm) em mais de 25% da área
Cascalho solto	Mais de 25% da área com pouco ou nenhum agregado
Poeira	Não especificado
Condições gerais	Tráfego difícil, estrada pode estar fechadas as vezes
Tipo de manutenção	Manutenção total, instalação de novos bueiros ou até mesmo uma reconstrução total da estrada

Nota-se que para a classificação da superfície outros fatores além dos defeitos presentes são considerados, isto se dá pelo fato de que estradas naturais que não possuem uma camada de revestimento como o asfalto ou o concreto, estão mais suscetíveis a sofrerem com as intempéries, com a ação do tráfego intenso, assim como pelas atividades de manutenção de rotina.

O manual sugere ainda, assim como Huntington *et al.* (2010), que se faça a divisão da estrada em segmentos cujas áreas possuam construção e condições similares, assim é possível fazer um inventário documentando as mudanças das condições da via. Quando não se tem estes dados é impossível saber se as condições da estrada estão melhorando, se mantendo ou piorando.

2.4 Métodos de Dimensionamento de EBVT Não Pavimentada

2.4.1 Austroads Guide to Pavement Technology: Part 6 (2009)

O manual australiano apresenta um método de dimensionamento de estradas não seladas baseado no tráfego de veículos diários e na resistência, valor de CBR, da camada de subleito, fornecendo assim uma espessura da camada de base suficientemente resistente para suportar o carregamento aplicado e evitar deformações no subleito natural da estrada.

Austroads (2009) complementa que os principais fatores que podem afetar a performance dos materiais que constituem a estrutura da via são:

- a) Estabilidade: habilidade do material em resistir a deformações. A resistência dos materiais depende principalmente da umidade e da densidade de compactação (número de vazios existentes). Essa variável pode ser determinada por meio de ensaios laboratoriais e “*in situ*” como o ensaio de CBR e o FWD;
- b) Resistência ao desgaste: uma vez que está sujeita às ações do tráfego e das intempéries, a superfície de desgaste deve ser adequadamente compactada produzindo uma superfície estanque na qual o agregado é mantido no lugar;
- c) Impermeabilidade: uma superfície relativamente impermeável é necessária para proteger o material das camadas inferiores da entrada de água e, assim, evitar a perda de resistência ou estabilidade do rolamento;
- d) Trabalhabilidade e Compactação: relacionada com a facilidade do material em ser compactado a uma densidade desejada.

Assim como as propriedades dos materiais a serem utilizados na estrutura do pavimento são importantes, a curva granulométrica a ser adotada também tem sua relevância. Quanto maior o diâmetro do agregado mais importante se torna fornecer uma graduação uniforme do solo para garantir que as partículas estejam arranjadas e possam produzir uma superfície menos permeável (Austroads,2009).

A Figura 3 apresenta uma sugestão de gamas de curvas granulométricas para a camada de desgaste não pavimentada.

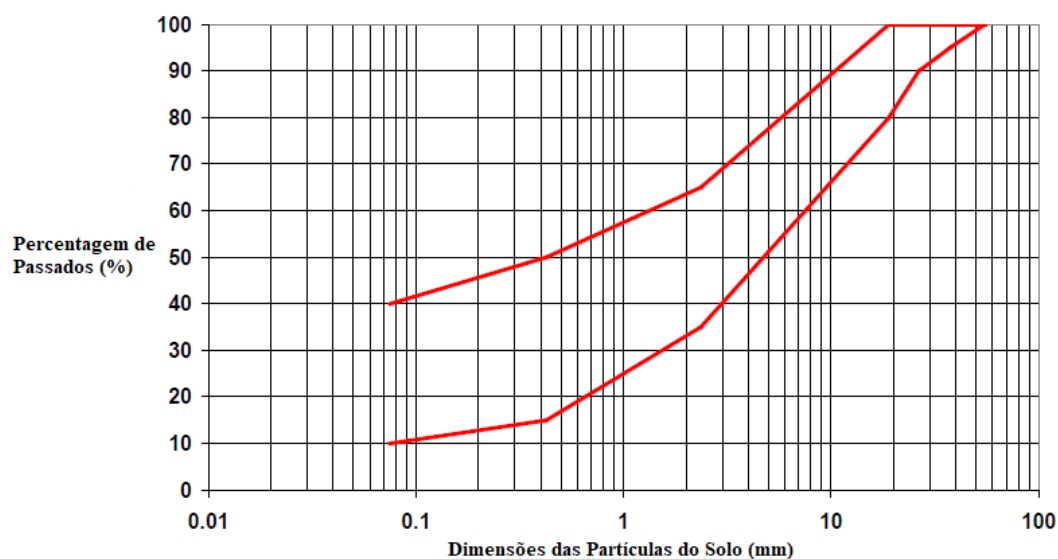


Figura 3: Curvas granulométricas para camada de desgaste não pavimentada. (Austroads, 2009).

O material que constitui a camada de desgaste apresenta uma distribuição uniforme das partículas de solo, de tal forma que o volume de vazios seja mínimo fazendo com que o solo atinja uma resistência maior.

Geralmente, materiais com diâmetro superior à 40 mm são usados em camadas de base e sub-base. Para estas camadas deve-se dar maior ênfase na disponibilidade de material do local e avaliar o seu papel no desempenho da estrada. A curva para um tráfego leve (*light traffic*) possui a característica de ter uma distribuição uniforme das partículas do solo, sendo constituída por cascalho, areia e silte, conforme ilustrado na Figura 4.

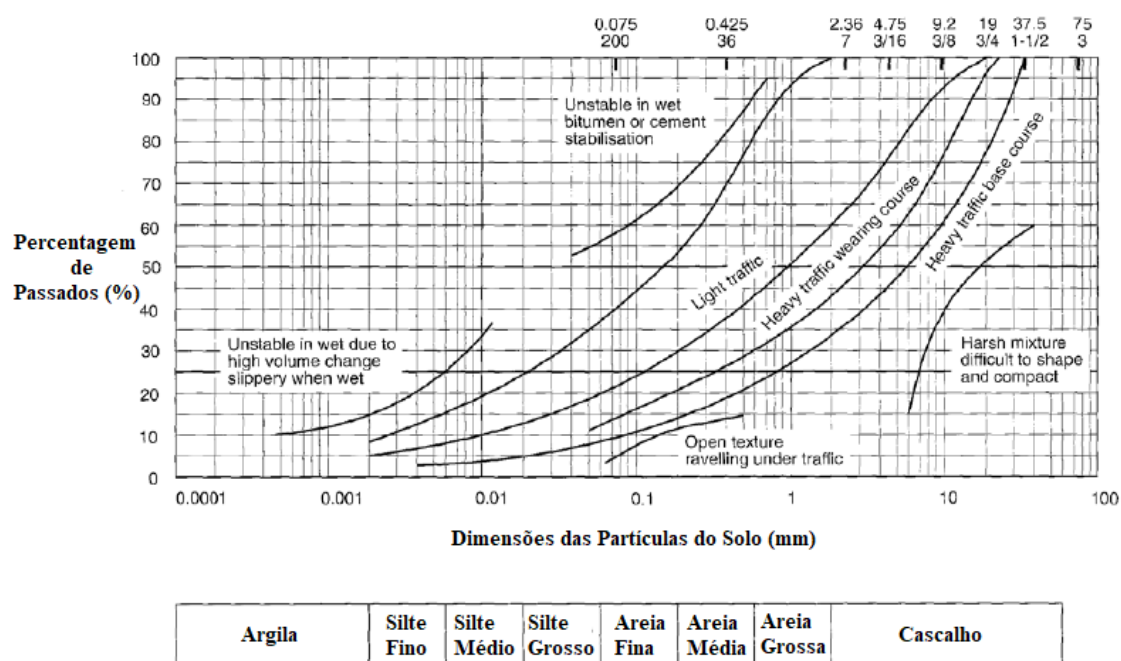


Figura 4: Curva granulométrica para camada de base e sub-base. (Austroads, 2009).

A estimativa do número equivalente de eixo padrão (80KN) durante a vida útil de projeto (ESA) é apresentada no Austroads (2006). A Tabela 7 expõe os parâmetros usados pelo manual na determinação do ESA de projeto a partir do tipo de estrada e do volume de tráfego diário.

Tabela 7: Tráfego para projeto. (Adaptado Austroads, 2009).

Tipo de Rua	Tráfego Médio Diário	Tráfego para Projeto
Menor com Trânsito de Pista Única	30	3×10^3
Menor com Trânsito de Pista Dupla	90	4×10^3
Acesso Local sem Ônibus	400	4×10^4
Acesso Local com Ônibus	500	8×10^4
Acesso Local em Área Industrial	400	$1,5 \times 10^5$
Coletora sem Ônibus	1200	4×10^5
Coletora com Ônibus	2000	8×10^5

A partir do número equivalente de eixo padrão e do valor de CBR da fundação é possível utilizar o ábaco abaixo para determinar a espessura da camada de base do pavimento.

O ábaco apresentado na Figura 5 corresponde a um índice de confiabilidade de 80%. A espessura determinada representa uma espessura mínima que deve ser adotada para suportar as solicitações e proteger o subleito de deformações durante sua vida de projeto.

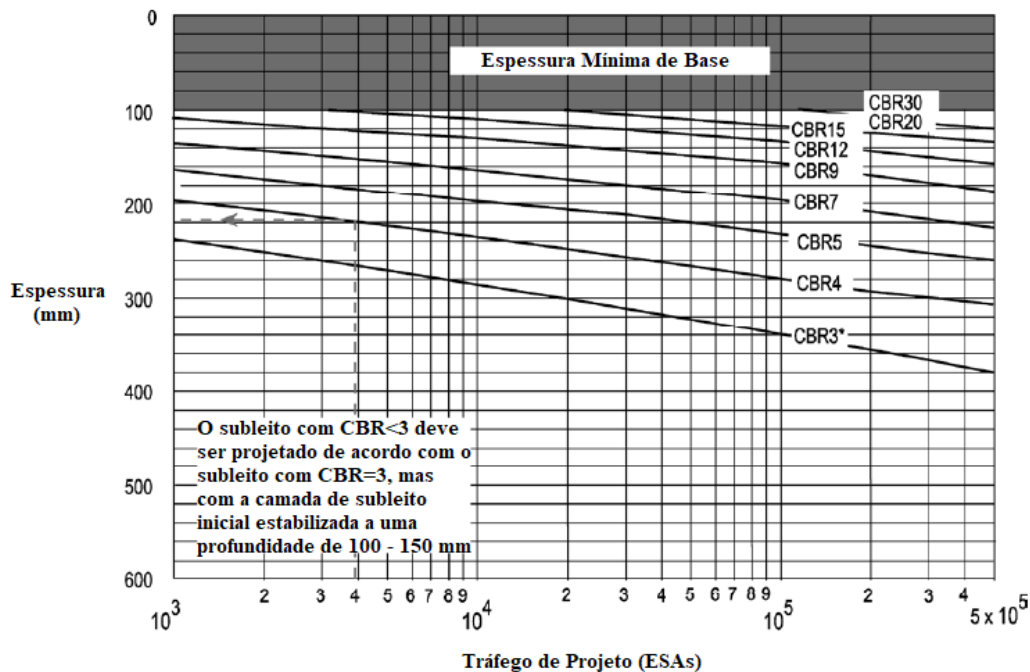


Figura 5: Determinação da espessura da camada de base. (Adaptado Austroads, 2009).

O manual aconselha o projetista a incluir uma espessura “de sacrifício” adicional ao pavimento visto que ao decorrer de sua vida útil com a ação do tráfego e das intempéries a camada de desgaste pode sofrer redução da sua espessura devido à perda de material. Para valores de CBR inferiores a 3 %, deve-se acrescentar uma camada com espessura entre 100 mm e 150 mm. (Austroads, 2009).

2.4.2 *The Forestry Civil Engineering Design Recommendation – (Brito, 2011)*

A Engenharia Civil Florestal (*The Forestry Civil Engineering – FCE*) é responsável pela construção e manutenção de estradas e pontes no Reino Unido. O Manual de Engenharia Civil Florestal (*The Forestry Civil Engineering Handbook – Forestry Enterprise 2004*) contém a maioria das especificações definidas pela FCE necessárias para obras de estradas e pontes, bem como planejamento de estradas e avaliação econômica (Brito, 2011).

Para o dimensionamento de estradas de baixo volume de tráfego o manual FCE considera para o seu dimensionamento as propriedades do tipo de solo encontrado “*in situ*” e, conseqüentemente, o valor de CBR. Para a determinação da espessura da camada de base do pavimento parâmetros pré-estabelecidos pelo Manual de Projeto para Estradas e Pontes (*Design Manual for Roads and Bridges – DMRB 070403*) são usados, como (Brito, 2011):

- Velocidade de Projeto: 25 km/h;
- Carga de Projeto: 44 toneladas.

Como é possível observar na Tabela 8, o método não leva em consideração a variação do volume de tráfego para o seu dimensionamento. O manual sugere o uso de uma camada granular como forma de proteção do subleito e complementa que para os 10 cm superiores do pavimento deve-se utilizar um agregado durável que não se quebre facilmente com a carga da roda. (Brito, 2011).

Tabela 8: Determinação da espessura da camada de base - FCE. (Adaptado Brito, 2011).

Tipo do Material	CBR (%)	Espessura (mm)
Turfa	<2	>850
Argila Siltosa	2	700
Argila Pesada	3	550
Argila Arenosa	4	475
Areia Saturada	7	325
Areia Fina	10	250
Cascalho Arenoso Graduado	20	150
Rocha	250+	Mín. 100

Assim como o manual australiano, o manual FCE também faz referência a importância da curva granulométrica do solo que compõe a estrutura do pavimento. Desta forma ele apresenta uma sugestão de curva granulométrica, fornecendo os limites máximos e mínimos da curva, para as camadas de base e de desgaste, de acordo com as especificações Suecas expostas na Figura 6.

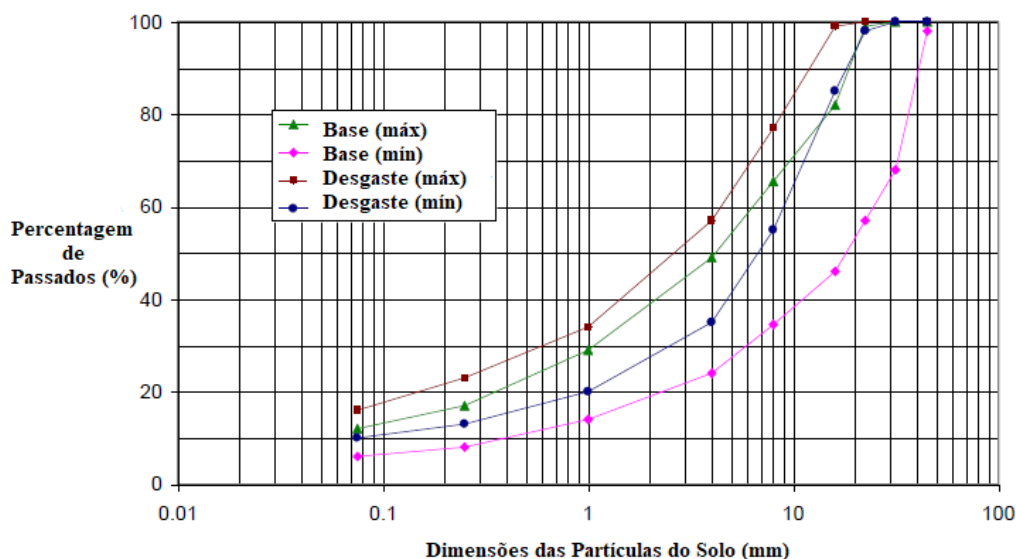


Figura 6: Curva granulométrica das camadas de base e de desgaste – FCE. (Adaptado Brito, 2011).

2.5 Manuais e Guias Complementares

2.5.1 *Low-Volume Roads Engineering – Best Management Practices Field Guide*

O guia norte americano de Engenharia de Estradas de Baixo Volume (*Low-Volume Roads Engineering*) foi elaborado por engenheiros e profissionais da área com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de estradas de baixo volume de tráfego e minimizar os impactos ambientais. Ele é constituído por recomendações de boas práticas da engenharia no planejamento, na construção e na manutenção de vias de comunicação. Seu foco principal é a drenagem de água durante a construção de uma estrada, um fator que muitas vezes é negligenciado.

A melhor forma de otimizar um projeto de drenagem e evitar problemas é realizando uma análise ambiental. Fazer um estudo mais detalhado sobre o local a ser construído e procurar soluções que atendam às necessidades de cada projeto contribui para que o sistema de drenagem seja adequado, eficiente, econômico e que demande menos manutenções ao longo de sua vida útil.

Saber identificar determinados fatores que tornem viável e seguro a construção de uma estrada é primordial, para isso é necessário reconhecer a geologia do solo, sua umidade e se há estabilidade quantos as encostas para se evitar erosões e deslizamentos de terra, para assim saber se ela poderá atender a demanda automobilística, essa ideia se reflete na Figura 7 e 8 (Keller *et al.*, 2003).



Figura 7: Exemplo de uma estrada com um sistema de drenagem ineficaz. (Keller *et al.*, 2003).



Figura 8: Exemplo de uma estrada com um bom sistema de drenagem. (Keller *et al.*, 2003).

A drenagem deve ser observada em épocas chuvosas a fim de observar qual o seu comportamento, ou seja, observar o caminho que a água seguirá, onde terá maior concentração e quais danos que pode ocasionar. Esse manual apresenta dois métodos para estimar o fluxo de água de uma determinada bacia hidrográfica:

- Método Racional

Este método é normalmente usado para estimar o fluxo de pequenas bacias hidrográficas e é geralmente utilizado quando não se tem dados do fluxo de riachos locais;

- Fórmula de Manning

Utilizada para determinar a velocidade média do fluxo de um determinado canal com fluxo uniforme. O cálculo da velocidade é realizado conforme a expressão:

$$V = \frac{1}{n}(R^{2/3})(S^{1/2}) \quad (1)$$

Onde:

V: velocidade média do fluxo de água (m/s);

n: coeficiente de rugosidade (geralmente usa-se 0,04 – 0,07 para canais naturais);

R: raio hidráulico;

S: declive do canal (m/m).

Obtido os parâmetros acima mencionados, é possível determinar o diâmetro da *riprap* (“grandes pedras”) a partir de uma correlação entre a velocidade de fluxo e o diâmetro do agregado, como ilustra a Figura 9.

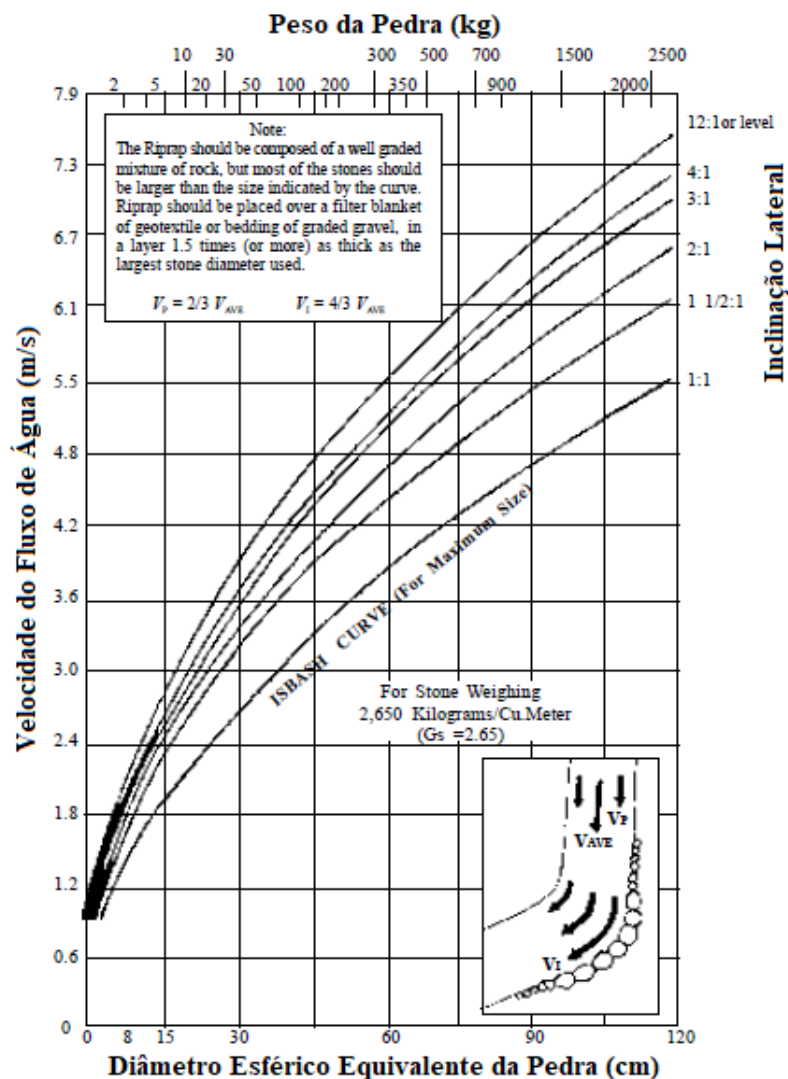


Figura 9: Correlação entre a velocidade de fluxo e o diâmetro do agregado. (Keller *et al.*, 2003).

O ábaco faz uma observação: “o ‘*riprap*’ deve ser composto de uma mistura bem graduada de rocha, mas a maioria das pedras deve ser maior do que o tamanho indicado pela curva. O ‘*riprap*’ deve ser colocado sobre uma manta filtrante de geotêxtil ou cama de cascalho graduado, em uma camada 1,5x (ou mais) da espessura do maior diâmetro da pedra utilizado.”

Keller *et al.* (2003) afirma que para projetos básicos de drenagem de estradas, costuma-se usar a Fórmula de Manning para a determinação da velocidade do fluxo de água em canais naturais e para determinar a capacidade de fluxo de canais e valas. Schall *et al.* (2008) diz que a velocidade do fluxo de água depende da forma do canal, rugosidade (n) e declive (S). Ele ainda complementa que o método pode ser útil para canais naturais, mas que tem aplicação limitada para a maioria dos trabalhos de projeto de drenagem de estradas.

É possível observar no ábaco a cima que quanto maior a velocidade de fluxo da água, maior o diâmetro necessário dos agregados para proteger as margens dos riachos, como demonstrado na Figura 10.



Figura 10: Proteção da estrada contra o alto fluxo de água utilizando *riprap* e geotêxtil. (Keller *et al.*, 2003).

A presença de água em buracos, depressões e caminhos de estradas pode diminuir a resistência do subleito e acelerar o processo de erosão. Estradas que possuem uma inclinação muito acentuada podem fazer com que a água se mova com uma velocidade muito alta, tornando difícil o controle da drenagem, conseqüentemente acelera o processo de erosão assim como a remoção de material da superfície da estrada. Este guia indica alguns métodos de drenagem para controlar a água da superfície da estrada como ilustra a Figura 11.

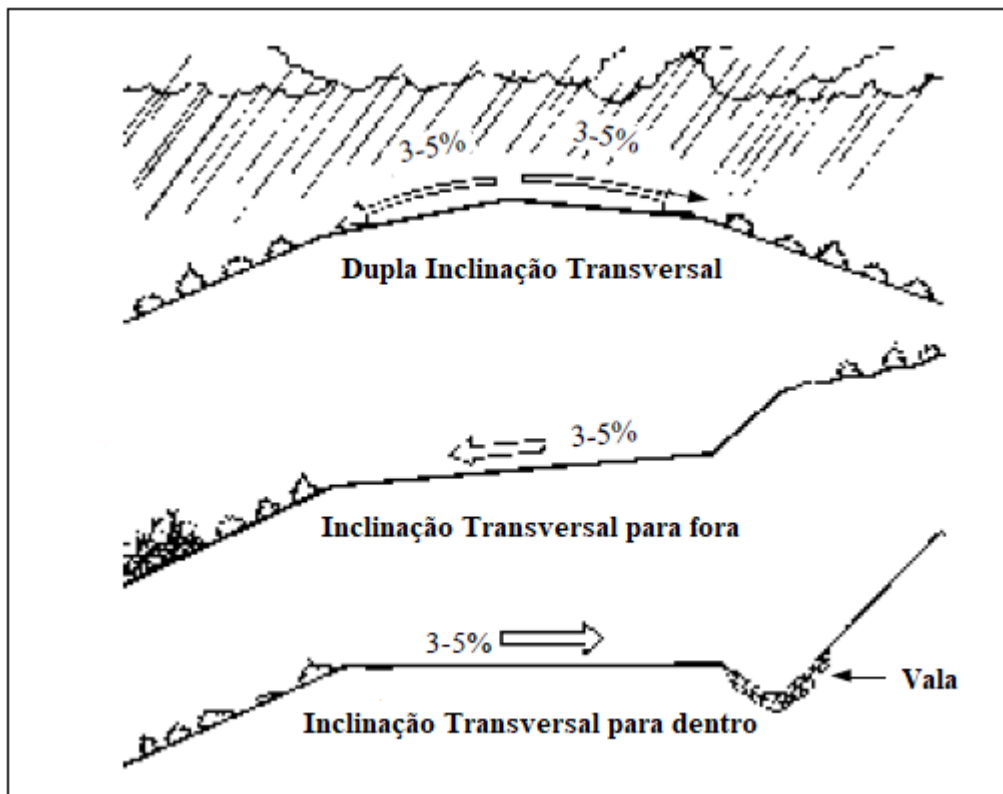


Figura 11: Esquema de drenagem superficial de estradas. (Adaptado Keller *et al.*, 2003).

- **Inclinação transversal para fora - *Outsloped***

Estradas que apresentam um declive permitem que a água escoe mais facilmente, dessa forma a concentração de água na sua superfície é evitada não tendo a necessidade da construção de valas para escoamento, fator que contribui para o menor custo de implementação;

- **Inclinação transversal para dentro - *Insloped***

Este tipo de drenagem solicita a existência de um sistema de valas para o escoamento visto que a configuração da estrada contribui para a concentração de água na sua superfície. Esse método requer o uso de drenos transversais, espaçados a uma distância específica, para a captação da água superficial e para o alívio da captação de água das valas, de tal forma que evite o aparecimento de erosões;

- **Dupla inclinação transversal - *Crown***

Mais utilizado em estradas que possuem duas pistas com uma leve inclinação, este método também exige a construção de um sistema de valas e de drenos transversais;

- **Drenos transversais de bueiros**

Mais apropriados para estradas de alto padrão, os drenos transversais de bueiros são utilizados para mover a água das valas pela estrada. É um método de drenagem mais caro e mais suscetível a entupimento, necessitando uma manutenção preventiva e periódica;

- **Drenos transversais de imersão rolante**

Método mais barato de drenagem e menos suscetível a entupimento, assim não é necessário manutenção frequente.

O guia de Engenharia de Estradas de Baixo Volume expõe considerações importantes a serem pensadas ao desenvolver um projeto de estradas. Algumas dessas considerações foram mencionadas de forma simplificada acima e podem ser consultadas e exploradas no manual norte americano.

2.5.2 *Gravel Roads Management: Implementation Guide – Wyoming – EUA*

Desenvolvido com o intuito de orientar no desenvolvimento e na manutenção de Estradas de Baixo Volume de Tráfego (EBVT), o guia norte americano apresenta uma variedade de informações que auxiliam na boa prática de gerenciamento de redes rodoviárias. Inicialmente o manual contempla uma série de perguntas a serem pensadas antes de se inicializar o estudo da estrada. Posteriormente é abordado como a divisão da estrada em seções e suas respectivas coletas de dados são essenciais para o desenvolvimento de um projeto rodoviário, seja ele em fase de projeto ou de manutenção, assim como para a estimativa da vida útil restante da estrada.

O guia apresenta de forma genérica e sucinta como identificar, analisar e buscar soluções que sejam viáveis para as construtoras e, ao mesmo tempo, que atenda as expectativas dos usuários em questões como conforto e segurança. Apesar de não apresentar um método de dimensionamento ou uma análise funcional e estrutural específica, o Sistema de Gestão de Estradas de Cascalho: Guia de Implementação (GRMS – *Gravel Roads Management: Implementation Guide*) proporciona diretrizes para o aprimoramento de projetos rodoviários.

2.5.3 Uma Aplicação Comparativa de Métodos de Avaliação das Condições Superficiais de Estrada Não-Pavimentada – Campinas, Brasil

Embora não consista em um manual, a dissertação apresentada por Ferreira (2004) apresenta um comparativo entre cinco métodos de avaliação funcional de estradas não pavimentadas, sendo que um deles a análise feita é subjetiva e as demais são objetivas. Ele

apresenta um estudo teórico de sensibilidade dos métodos a partir de estudos de casos hipotéticos e por meio de experimentos “*in situ*”, comentando as vantagens e desvantagens de cada método dentro das limitações impostas.

As metodologias que foram usadas para a avaliação da superfície da estrada nos estudos de Ferreira (2004) foram:

- I. *GPM - Gravel PAsER Manual*: método de avaliação norte americano que apresenta uma avaliação subjetiva. O método classifica a estrada em cinco níveis de 1 -5, sendo o 1 a pior situação e 5 a melhor situação. Os defeitos analisados são: seção transversal inadequada, buracos, afundamento de trilha de roda, ondulações, drenagem lateral inadequada, segregação dos agregados, poeira e espessura de cascalho;
- II. *RCS/DVI - Road Condition Survey/Detailed Visual Inspection*: método objetivo de avaliação europeu. O método classifica a estrada em uma escala de 1 a 5, no qual o 1 é o pior caso e 5 o melhor caso. Os defeitos avaliados são: seção transversal inadequada, buracos, afundamento de trilha de roda, ondulações, segregação dos agregados, poeira, espessura de cascalho e atoleiros;
- III. *ERCI – Earth Road Condition Index*: consiste em método de avaliação objetiva usada no Egito. O método avalia a superfície da estrada segundo uma escala que varia de 0 a 100, correspondendo ao falido e muito bom, respectivamente. Os defeitos avaliados são: seção transversal inadequada, buracos, afundamento de trilha de roda, superfície saturada, falha e erosão de aterro na estrada, falha no muro de contenção, altura da superfície, estrutura ilegal de irrigação, plantas na superfície da estrada e ocupação da superfície da estrada;
- IV. *URCI – Unsurfaced Road Condition Index*: método norte americano que avalia de forma objetiva a superfície da estrada. A superfície da estrada é classificada em uma escala de 0 a 100, na qual ao falido e excelente, respectivamente. Os defeitos avaliados são: seção transversal inadequada, buracos, afundamento de trilha de roda, ondulações, drenagem lateral inadequada, segregação dos agregados e poeira;
- V. *RSMS – Road Surface Management System*: consiste em um método também utilizado nos EUA para a avaliação subjetiva da superfície da estrada. A classificação da estrada varia segundo uma escala de 0 a 100,

na qual 0 é falido e 100 é excelente. Os defeitos avaliados são: seção transversal inadequada, buracos, afundamento de trilha de roda, ondulações, drenagem lateral inadequada, segregação dos agregados e poeira.

Ferreira (2004) realizou a avaliação de uma estrada não pavimentada localizada no município de Piracaia – SP, Brasil, que foi dividida em cinco subseções, e a partir dos resultados encontrados chegou as seguintes conclusões:

- a) Os métodos GPM, DVIr, ERCIr e o RSMS apresentaram resultados próximos e a mesma classificação das condições superficiais do trecho estudado, apesar de apresentarem resultados diferentes entre eles nas avaliações das subseções;
- b) O método ERCI apresenta resultados acima e o URCI e DVI abaixo das demais metodologias de avaliação final do trecho;
- c) Os métodos não apresentam parâmetros gerais para definir qual método é o mais ideal para serem utilizados na gerência de manutenção e conservação da estrada estudada;
- d) De acordo com os resultados obtidos e analisados da estrada de estudo, o método mais indicado para a gerência de manutenção e conservação da estrada é o RCS/DVIR.

Os métodos referidos foram desenvolvidos para serem aplicados em seus países de origem, que possuem características como clima, relevo, solo etc e desenvolvimento tecnológico muito diferentes e que devem ser levados em consideração e devem ser adaptados quando forem empregados em outras localidades (Ferreira, 2004).

CAPÍTULO 3

3 Dimensionamento da EBVT Não Pavimentada

Como atualmente, no ano de 2020, o mundo se encontra em uma situação de pandemia mundial no qual é necessário manter o distanciamento social para a segurança de todos, as soluções propostas nesta dissertação serão com base nos resultados obtidos por meio de ensaios realizados em trabalhos anteriores de Cabette (2018) e Freitas (2019), aplicando as metodologias de dimensionamento adotadas em outros países do mundo como os Estados Unidos, Austrália e Reino Unido e apresentadas no Capítulo 2.

Jorge (2014) considera que estradas de baixo volume de tráfego são aquelas que apresentam um tráfego médio diário anual (TMDA) inferior a 400 veículos por dia com uma velocidade menor que 80 km/h. A estrada em questão não possui uma pesquisa de tráfego, entretanto, durante a realização dos ensaios, Cabette (2018) percebeu que o volume de tráfego na região era pequeno em seus estudos, assim como Freitas, considerou a menor classe de tráfego presente no Manual ERA (2011).

Nos dois estudos referidos foram realizados ensaios laboratoriais e “*in situ*” para a determinação dos parâmetros geotécnicos dos materiais que compõem a estrada. Com os valores dos ensaios a estrada foi dividida em seções homogêneas, ou seja, trechos da estrada que possuem características semelhantes e, conseqüentemente, apresentam um comportamento mecânico similar.

Neste trabalho não será realizada a avaliação funcional proposta pelo Manual PASER (Walker, 2002), pois para a obtenção de resultados mais confiáveis, uma análise completa por todo o trecho da estrada deve ser realizada visto que alguns parâmetros de classificação são dependentes da percentagem de ocorrência dos defeitos por toda a estrada. A coleta de dados de defeitos dos trabalhos anteriores foi feita em um pequeno comprimento de cada sub-trecho da via e, a partir desta coleta, foi estimado os defeitos por toda a via.

A avaliação e o dimensionamento do sistema de drenagem referido simplifcadamente no Capítulo 2 também não serão realizados aqui, pois não se tem dados relacionados aos períodos de chuva no trecho da estrada em estudo.

3.1 Local de Estudo

A EBVT não pavimentada de estudo está localizada no nordeste de Portugal em uma região montanhosa próxima da aldeia de Montesinho na divisa com a Espanha, mais especificamente dentro do Parque Nacional de Montesinho, uma área de reserva natural.

Assim, as propostas sugeridas neste trabalho devem ser adequadas para a preservação das suas características naturais, não podendo adicionar uma camada de revestimento de betume ou betão na superfície da estrada.

A estrada possui 3,06 km de extensão e é o principal percurso de acesso às duas barragens pertencentes ao município de Bragança, a Albufeira de Veiguinhas e a Albufeira da Serra Serrada. A EBVT em estudo começa nas coordenadas Latitude $41^{\circ} 57' 44''$ N e Longitude $6^{\circ} 48' 28''$ W e termina na coordenada Latitude $41^{\circ} 56' 7''$ N e Longitude $6^{\circ} 48' 50''$. A Figura 12 mostra a localização da EBVT de estudo.

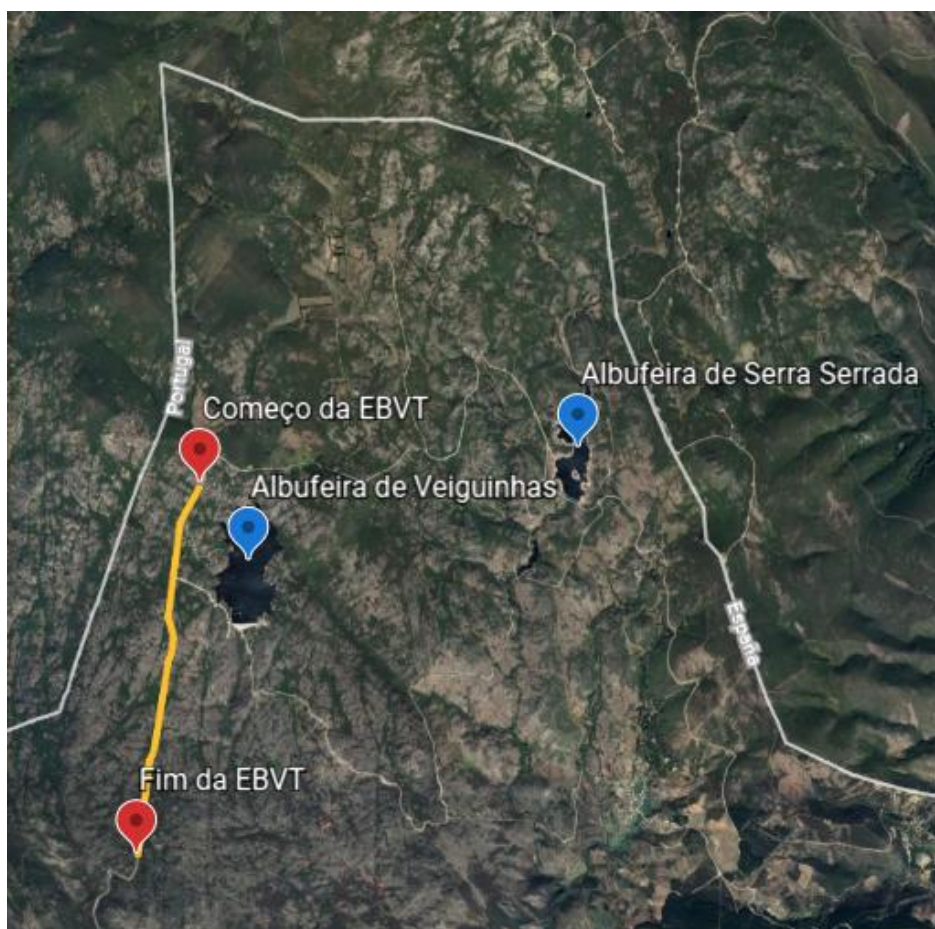


Figura 12: Localização da estrada de baixo volume de tráfego não pavimentada.

A partir do mapa do Google Earth é possível traçar o perfil longitudinal da extensão da EBVT estudada, como ilustra a Figura 13.



Figura 13: Perfil longitudinal da EBVT. (Freitas, 2019).

O Ponto A, localizado a uma altitude de 1251m, corresponde ao início da estrada e o Ponto B, localizado a uma altitude de 1223m, refere-se ao fim da estrada.

3.2 Estudos de Cabette (2018)

Para determinar as seções homogêneas da via e os pontos representativos de cada seção, Cabette (2018) dividiu o trecho da estrada em 31 sub-trechos espaçados de 100 em 100 m e realizou os ensaios de Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (PDL) e de Carga em Placa (CP) segundo as normas EM ISSO 22476-2 e NF P94-117-1, respectivamente. Com os resultados obtidos foi feita a análise das seções homogêneas conforme as recomendações da *American Association of State Highway and Transportation Officials* - AASHTO pelo Método das Diferenças Acumuladas.

Cabette (2018) definiu cinco seções homogêneas para assim coletar amostras e realizar os ensaios de caracterização do solo sendo os pontos representativos: pontos 1 (0m), 3 (300m), 14 (1342m), 21 (2056m) e 31 (3056m) (distância à origem).

A amostragem dos pontos representativos de cada seção permitiu observar que havia duas camadas de solos distintas conforme indica a Figura 14.

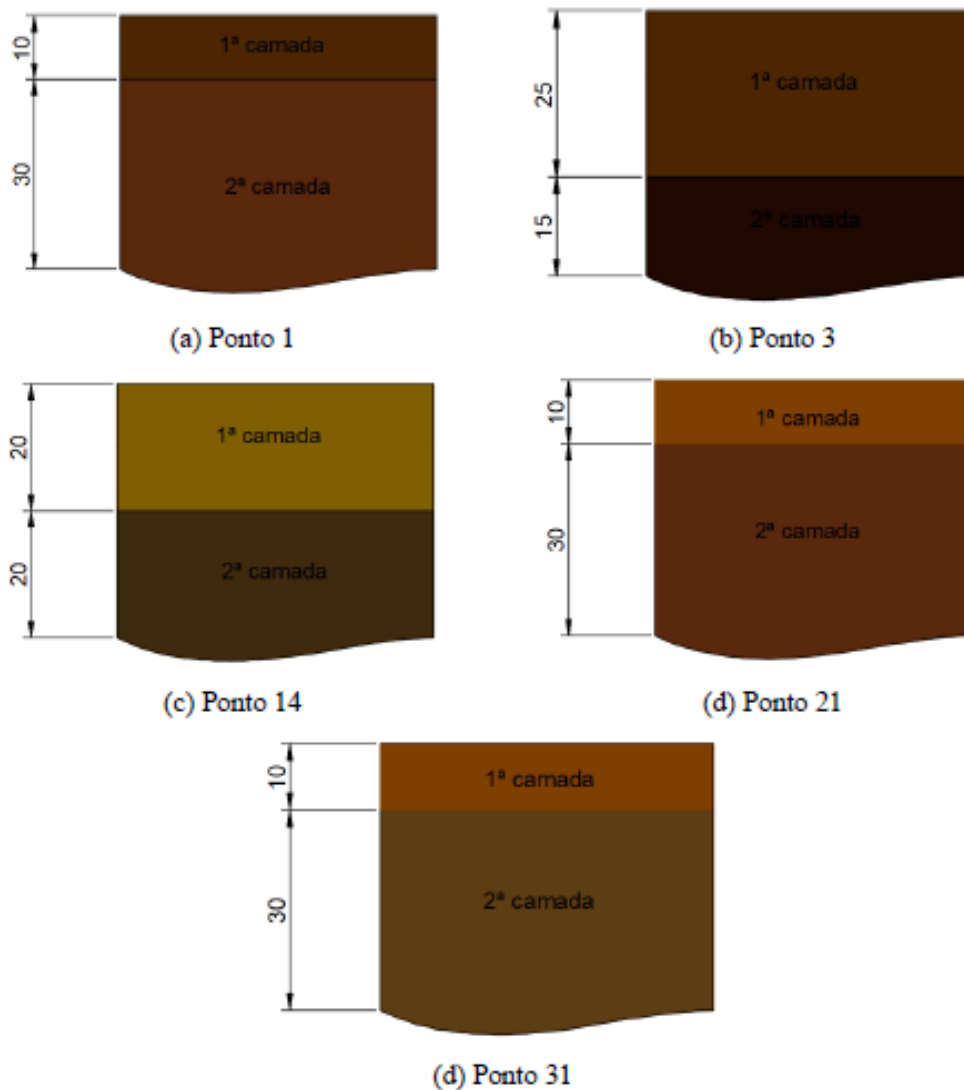


Figura 14: Perfil geotécnico (cm) dos pontos representativos. (Cabette, 2018).

Determinada as seções homogêneas e seus respectivos pontos representativos, os seguintes ensaios foram realizados:

- a) Análise Granulométrica – norma LNEC E 239-1970;
- b) Proctor Normal – norma ASTM D-698-07. Determinação da umidade ótima de compactação;
- c) California Bearing Ratio (CBR) – norma ASTM D-1883-07. Avaliação da resistência dos materiais;
- d) Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (PDL) – norma EM ISSO 22476-2. Resistência à penetração do solo. Este ensaio, também, foi a base para identificar as cinco seções homogêneas;

- e) Controle da Compactação com Gamadensímetro – norma ASTM-D-2922-01. Determinação dos valores de massa específica seca, úmida e do teor de umidade;
- f) Ensaio de Carga em Placa (CP) – norma NF P94-117-1. Determinação da capacidade de carga do solo. Este ensaio, como já referido, foi a base para identificar as cinco seções homogêneas;
- g) CBR “*in situ*” – norma BS 1377:9. Avaliação da resistência dos materiais.

Para o dimensionamento da EBVT não pavimentada apenas os valores do CBR e a classificação do solo obtido por meio dos ensaios de identificação serão utilizados, como mostram as Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Classificação do solo nos pontos representativos. (Adaptado Cabette, 2018).

Pontos Representativos	Camadas	Tipo de Solo
Ponto 1 (0 m)	Camada 1	Areia bem graduada com silte e pedregulho
	Camada 2	pedregulho bem graduado com silte e areia
Ponto 3 (300 m)	Camada 1	Areia bem graduada com silte
	Camada 2	Areia mal graduada com silte
Ponto 14 (1342 m)	Camada 1	Areia siltosa com pedregulho
	Camada 2	Areia mal graduada com pedregulho
Ponto 21 (2056 m)	Camada 1	Areia siltosa
	Camada 2	pedregulho bem graduado com silte e areia
Ponto 31 (3056 m)	Camada 1	Areia siltosa
	Camada 2	Pedregulho mal graduado com silte e areia

Tabela 10: Valores de CBR nos pontos representativos. (Adaptado Cabette, 2018).

Pontos Representativos	Camadas	CBR Laboratorial (%)	CBR “ <i>in situ</i> ” (%)
Ponto 1 (0 m)	Camada 1	39	37
	Camada 2	30	
Ponto 3 (300 m)	Camada 1	37	40
	Camada 2	23	
Ponto 14 (1342 m)	Camada 1	18	24
	Camada 2	38	
Ponto 21 (2056 m)	Camada 1	29	31
	Camada 2	21	
Ponto 31 (3056 m)	Camada 1	30	28
	Camada 2	40	

Os pontos 1 e 3 apresentam valores de CBR próximos quando comparados entre si e com os valores de CBR “*in situ*”, além de apresentarem valores altos de resistência. O ponto 14 é o que possui menor valor de CBR e conseqüentemente, entre os pontos observados, é o que apresenta menor resistência. Os pontos 21 e 31 tem os valores de CBR da primeira camada bem próximos dos valores obtidos em campo, apresentando também uma resistência boa do solo.

Os demais resultados obtidos pelos ensaios realizados por Cabette (2018) estão apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11: Resultados do ensaio de Proctor Normal. (Cabette, 2018).

Pontos	Camada	Peso Específico Aparente Seco Ótimo (kN/m ³)	Teor em Água Ótimo (%)
1	1	20,1	9,2
	2	18,2	13,0
3	1	19,3	9,7
	2	17,3	14,0
14	1	18,6	13,5
	2	18,2	12,5
21	1	19,0	10,5
	2	17,0	14,0
31	1	18,2	13,0
	2	18,9	10,2

O peso específico aparente seco determinado em laboratório apresentou valores, em sua maioria, muito semelhantes nos diferentes pontos representativos de estudo. Este fato pode ser observado também para os valores do teor em água ótimo. Isto indica que as amostras de solos coletadas apresentam um comportamento similar.

Tabela 12: Resultado do ensaio de Carga em Placa. (Cabette, 2018).

Pontos	EV1 (MPa)	EV2 (MPa)	EV2/EV1
1	108,6	157,2	1,448
3	124,9	142,6	1,142
14	37,9	63,0	1,662
21	124,5	101,8	0,818
31	67,1	99,6	1,484

De todos os pontos analisados, o ponto 14 foi o que apresentou menor módulo de deformabilidade o que indica, juntamente um baixo valor de CBR, uma menor resistência do solo quando comparado com os demais pontos.

É possível observar na Tabela 13 que os valores do peso específico aparente seco determinado em laboratório pelo ensaio Proctor Normal e os valores do peso específico seco determinado em campo pela célula de carga radioativa (gamadensímetro) possuem valores semelhantes.

Tabela 13: Resultado do ensaio do Gamadensímetro. (Cabette, 2018).

Pontos	Peso Específico Aparente Seco Lab. (kN/m ³)	Peso Específico Seco "in situ" (kN/m ³)	Grau de Compactação (%)
1	20,1	20,3	100,98
3	19,3	20,5	105,89
14	18,6	18,4	98,63
21	19	18,1	94,95
31	18,2	17,7	97,04

O grau de compactação do solo é a razão entre o valor do peso específico aparente seco determinado em “*in situ*” e o peso específico seco laboratorial. Com os resultados encontrados pode-se concluir que o solo do local se encontra bem compactado.

3.2.1 Método Austroads (2009)

Para o dimensionamento segundo o manual da Austroads (2009) o tipo de tráfego a ser considerado será o de acesso local sem ônibus – para um período de dimensionamento de 20 anos - que corresponde a um tráfego diário de 400 veículos. A classe de tráfego escolhida está de acordo com o indicado por Jorge (2014) o que justifica a não utilização de classes inferiores presentes no manual no presente dimensionamento. Em relação à resistência do subleito, será utilizado o menor valor de CBR encontrado em laboratório, correspondendo ao ponto 14 com 18%.

Assim, as variáveis de entrada para a aplicação do método são:

- Tráfego: 4×10^4 ;
- CBR: 18%.

Aplicando esses valores no ábaco da Figura 5, o método Austroads (2009) determina uma camada de base com espessura de 10 cm, obtendo a seguinte configuração da estrutura da estrada como mostra a Figura 15.

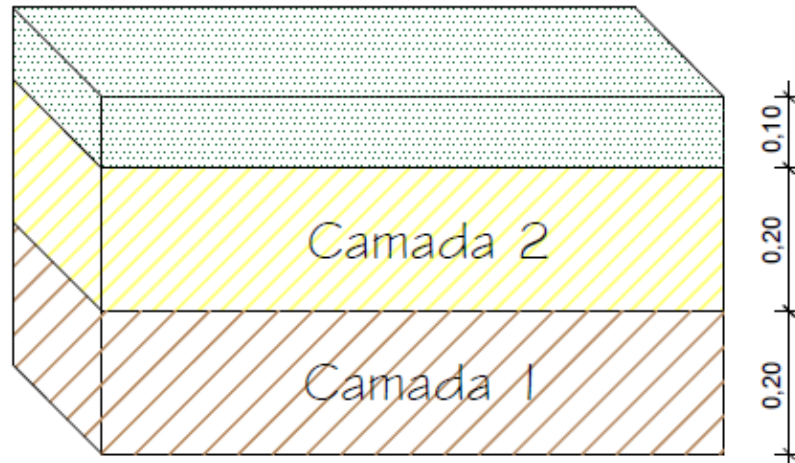


Figura 15: Dimensionamento (cm) Método Austroads (2009). (Cabette, 2018).

O manual sugere incluir uma camada “de sacrifício” ao pavimento, além da camada de base dimensionada, visto que a camada de desgaste tende a perder material ao decorrer de sua vida útil com a ação do tráfego e das intempéries.

3.2.2 Método FCE (Brito, 2011)

Já para o dimensionamento segundo o Manual FCE (Brito, 2011) apenas a classificação do solo e o seu respectivo valor de CBR é usado para o dimensionamento da estrada não pavimentada. Assim como para o dimensionamento anterior, também será considerado o ponto representativo com menor valor de CBR laboratorial, ou seja, o ponto 14 com o valor de CBR de 18%. O ponto 14, com base no ensaio de granulometria, corresponde a seguinte classificação de solo: areia siltosa com pedregulho.

As variáveis de entrada para o dimensionamento são:

- Tipo de solo: areia siltosa com pedregulho;
- CBR: 18%.

Utilizando a Tabela 8, o Manual FCE (Brito, 2011) determina uma camada de base com espessura de 15 cm como ilustra a Figura 16.

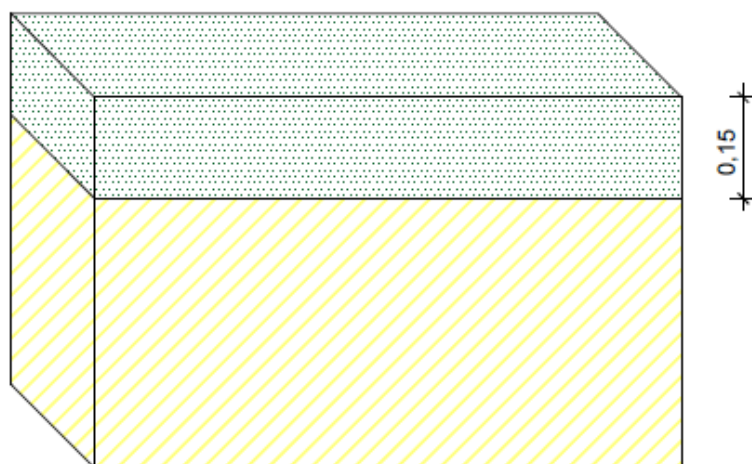


Figura 16: Dimensionamento (cm) Método FCE (Brito, 2011). (Cabette, 2018).

3.3 Estudos de Freitas (2019)

Para a determinação das seções homogêneas e dos pontos representativos de cada seção, Freitas (2019) fez um procedimento similar ao de Cabette (2018). A via foi dividida em 31 sub-trechos espaçados de 100 em 100 m, entretanto, os pontos 1 e 31 foram desconsiderados pela autora na análise das seções homogêneas. A partir dos resultados do ensaio *Light Falling Weight Deflectometer* (LFWD) e com a utilização do Método das Diferenças Acumuladas proposta pelo AASHTO foi determinado as seções homogêneas do trecho de estudo.

Freitas (2019) determinou seis seções homogêneas e a partir delas coletou amostras do solo para a realização de ensaios a fim de determinar as características geotécnicas do solo que compõe a estrada. Os pontos representativos de cada seção homogênea são: 3 (200m), 9 (796m), 12 (1103m), 17 (1623m), 24 (2319m) e 28 (2719m) (distância à origem).

Determinados os pontos representativos de cada seção, os seguintes ensaios foram realizados para a avaliação geotécnica:

- a) Análise Granulométrica – norma LNEC E 239-1970;
- b) Proctor Normal – norma ASTM D-698-07. Determinação da umidade ótima de compactação;
- c) California Bearing Ratio (CBR) – norma ASTM D-1883-07. Avaliação da resistência dos materiais;
- d) *Light Falling Weight Deflectometer* (LFWD) – norma ASTM E-2835-11. Determinação da deformação do pavimento, do módulo de elasticidade dinâmico. Este foi realizado em todos os pontos de ensaio.

Por meio dos ensaios de identificação do solo, foi possível determinar a classificação do solo e os valores de CBR presentes nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Classificação do solo nos pontos representativos. (Adaptado Freitas, 2019).

Pontos Representativos	Tipo de Solo
Ponto 3 (200 m)	Areia bem graduada com silte
Ponto 9 (796 m)	Areia bem graduada com silte
Ponto 12 (1103 m)	Areia bem graduada com silte
Ponto 17 (1623 m)	Areia bem graduada com silte
Ponto 24 (2319 m)	Areia siltosa
Ponto 28 (2719 m)	Areia bem graduada com silte

Tabela 15: Valores de CBR nos pontos representativos. (Adaptado Freitas, 2019).

Pontos Representativos	CBR Laboratorial (%)
Ponto 3 (200 m)	37
Ponto 9 (796 m)	36
Ponto 12 (1103 m)	34
Ponto 17 (1623 m)	34
Ponto 24 (2319 m)	20
Ponto 28 (2719 m)	25

Os pontos 3 e 9 apresentam valores próximos de CBR assim como os pontos 12 e 17. Os pontos 24 e 28 são os que apresentam valores mais baixos quando comparado com os demais. Para efeito de cálculo e considerando a segurança de projeto, o valor de CBR do ponto 24 será usado para o dimensionamento da EBVT.

Os resultados obtidos por Freitas (2019) nos demais ensaios realizados estão apresentados nas Tabelas 16, 17, 18 e 19.

Tabela 16: Resultados do ensaio de Proctor Normal. (Freitas, 2019).

Pontos	Peso Específico Aparente Seco (kN/m³)	Teor em Água Ótimo (%)
3	19,4	9,7
9	18,7	11,5
12	18,7	11,5
17	18,9	12,0
24	17,0	16,5
28	18,4	12,5

Os valores obtidos do ensaio de Proctor Normal permitiram determinar o peso específico aparente seco e o teor em água ótimo dos pontos representativos. Ambos os parâmetros possuem, em sua maioria, similaridades nos seus resultados, isso implica que o solo que compõe a estrada apresenta uma certa linearidade em relação ao seu comportamento.

Tabela 17: Resultados do ensaio LFWD. (Freitas, 2019).

Pontos	Evd (MPa)
3	20,27
9	24,85
12	21,9
17	20,11
24	12,44
28	21,56

O ensaio LFWD fornece o valor do módulo de deformabilidade dinâmico do solo. Os valores encontrados são relativamente próximos, com exceção do ponto 24 que apresenta um módulo significativamente menor em relação aos outros.

O manual do equipamento utilizado para realizar o ensaio do *Light Falling Weight Deflectometer* apresenta uma tabela com a relação entre o valor do módulo de deformabilidade e o grau de compactação do solo. A Tabela 18 apresenta a relação entre eles.

Tabela 18: Relação do módulo Evd com a compactação do solo (Zorn, 2016).

Tipo de Solos (DIN 18 196)	Taxa de Compactação (%)	Módulo de Elasticidade Estático (EV2) (MPa)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (Evd) (MPa)
GW, GI	≥ 103	≥ 120	≥ 60
	≥ 100	≥ 100	≥ 50
	≥ 98	≥ 80	≥ 40
	≥ 97	≥ 70	≥ 35
GE, SE, SW, SI	≥ 100	≥ 80	≥ 40
	≥ 98	≥ 70	≥ 35
	≥ 97	≥ 60	≥ 32
Solos Mistos e Granulosos Finos	≥ 100	≥ 45	≥ 25
	≥ 97	≥ 30	≥ 15
	≥ 95	≥ 20	≥ 10

Tabela 19: Relação Evd e Grau de Compactação. (Freitas, 2019).

Pontos	Evd (MPa)	Grau de Compactação (%)
3	20,27	≥ 97
9	24,85	≥ 97
12	21,9	≥ 97
17	20,11	≥ 97
24	12,44	< 95
28	21,56	≥ 97

A partir desta relação o grau de compactação dos pontos representativos de cada seção homogênea foi estimado. Em geral, o solo apresenta uma boa compactação.

3.3.1 Método Austroads (2009)

Para a metodologia proposta pelo manual Austroads (2009) será considerado o menor valor de CBR correspondendo ao ponto 24 com valor de 20%. A classe de tráfego a ser adotada será de acesso local sem ônibus – para um período de dimensionamento de 20 anos - que corresponde a um tráfego diário de 400 veículo.

Assim, as variáveis de entrada para a aplicação do método são:

- Tráfego: 4×10^4 ;
- CBR: 20%.

Aplicando esses valores no ábaco da Figura 5, uma camada de base com 10 cm de espessura é proposta pelo método Austroads (2009). A Figura 17 mostra a camada dimensionada.

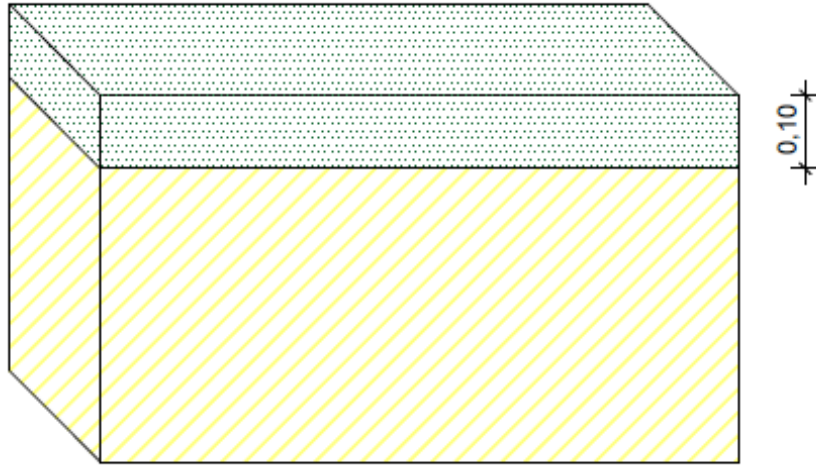


Figura 17: Dimensionamento (cm) Método Austroads (2009). (Freitas, 2019).

O manual sugere incluir uma camada “de sacrifício” ao pavimento, além da camada de base dimensionada, visto que a camada de desgaste tende a perder material ao decorrer de sua vida útil com a ação do tráfego e das intempéries.

3.3.2 Método FCE (Brito, 2011)

Para o dimensionamento segundo o Manual FCE (Brito, 2011) será considerado as características geotécnicas referentes ao ponto 24, composto por um solo classificado como areia siltosa com um CBR laboratorial correspondente a 20%.

As variáveis de entrada para o dimensionamento da camada de base são:

- Tipo de solo: areia siltosa;
- CBR: 20%.

Utilizando esses valores na Tabela 8, o Manual FCE (Brito, 2011) determina uma camada de base com espessura de 15 cm como mostra a Figura 18.

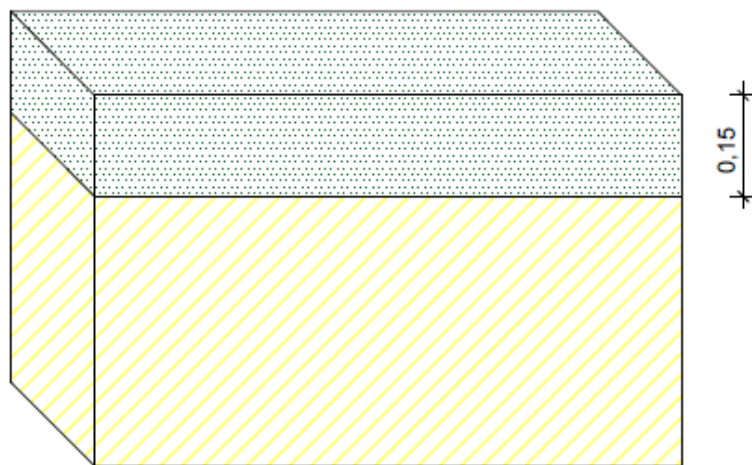


Figura 18: Dimensionamento (cm) FCE (Brito, 2011). (Freitas, 2019).

CAPÍTULO 4

4 Análise Comparativa

Existem vários manuais e guias que orientam os projetistas no momento de realizar o dimensionamento de uma estrada de baixo volume de tráfego não pavimentada, manuais que especificam desde a escolha do local e material, tipo do sistema de drenagem até o dimensionamento final da estrada.

Este trabalho aborda de forma mais aprofundada o dimensionamento estrutural dessas estradas, de forma a auxiliar na escolha da melhor metodologia a ser aplicada no local de estudo.

Foram apresentados dois métodos principais de dimensionamento sendo um australiano e outro britânico. O objetivo deste capítulo é realizar uma comparação entre os métodos apresentados, os resultados dos estudos anteriores e realizar um estudo de sensibilidade dos métodos de dimensionamento.

4.1 Análise Comparativa dos Ensaios

Embora Cabette (2018) e Freitas (2019) tenham realizados ensaios diferentes na caracterização do solo, alguns dos parâmetros estabelecidos são iguais. A análise comparativa será realizada para avaliar como a ação do tráfego e das intempéries assim como uma intervenção realizada pela Câmara Municipal de Bragança influenciou nos resultados.

Vale ressaltar que os pontos representativos determinados são diferentes nos dois estudos, devendo assim, realizar uma análise comparativa mais sensível, levando em consideração o sub-trecho da seção homogênea que o ponto representa.

4.1.1 Seções Homogêneas

Cabette (2018) e Freitas (2019) determinaram as seções homogêneas por meio do Método das Diferenças Acumuladas proposta pela AASHTO. Cabette (2018) usou os resultados dos ensaios de PDL e CP para a determinação das seções homogêneas enquanto Freitas (2019) utilizou os resultados do ensaio LFWD. As Figuras 19, 20 e 21 apresentam as seções homogêneas no perfil topográfico da estrada.



Figura 19: Seções homogêneas pelo ensaio PDL - Cabette. (Freitas, 2019).

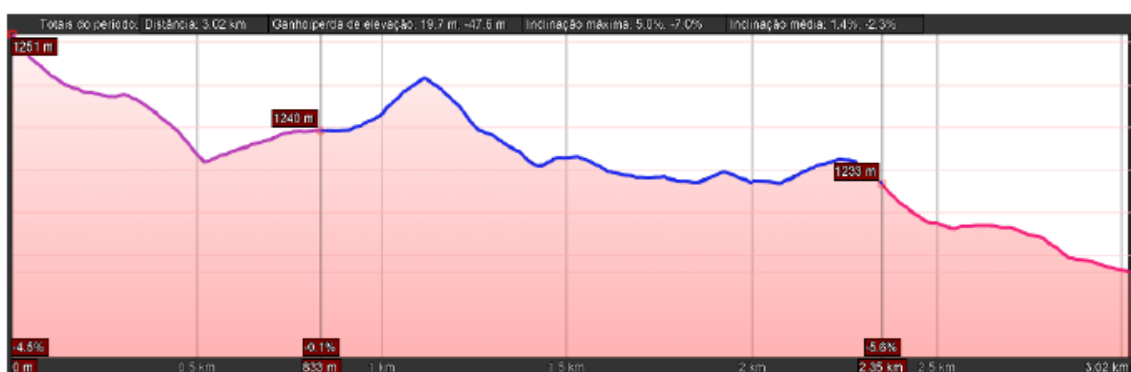


Figura 20: Seções homogêneas pelo ensaio CP - Cabette. (Freitas, 2019).

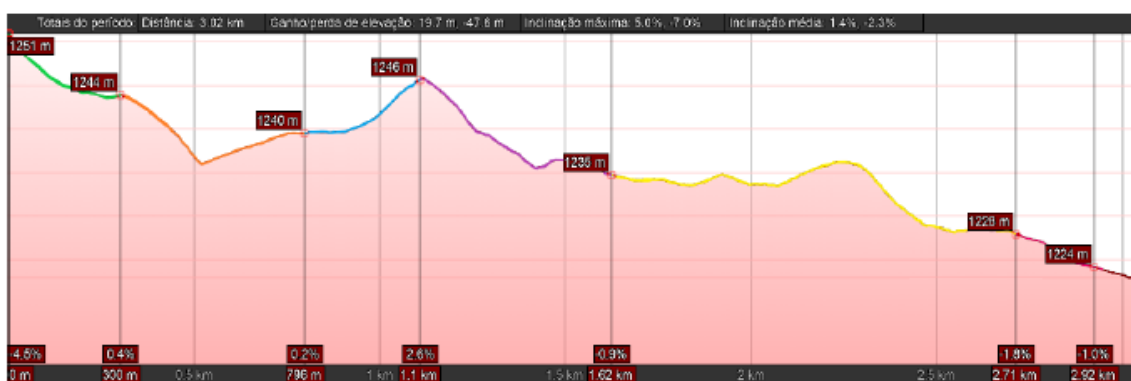


Figura 21: Seções homogêneas pelo ensaio LFWD - Freitas. (Freitas, 2019).

Embora o método tenha sido o mesmo e a estrada de estudo a mesma, as seções homogêneas definidas apresentam diferenças. Isto pode ter ocorrido por diversos fatores como o intervalo de tempo de realização entre os estudos, ação do tráfego e das intempéries, diferente tipo de ensaio usado para a determinação das seções homogêneas e/ou intervenção realizada.

Nota-se que Freitas (2019) definiu uma quantidade maior de subtrechos, entretanto as seções apresentam semelhanças nas três figuras. Isto significa que a estrada

se manteve, ou seja, apresenta comportamentos similares aos do estudo anterior. Além disso, o ensaio LFWD permitiu segmentar melhor o trecho da estrada em estudo.

4.1.2 Valor de CBR

O ensaio de CBR laboratorial foi realizado nos dois estudos referidos e apenas Cabette (2018) realizou o ensaio de CBR “*in situ*”. Para a comparação dos resultados obtidos será utilizado o valor de CBR determinado em laboratório. A Tabela 20 apresenta a respectiva comparação.

Tabela 20: Comparação dos valores de CBR.

CABETTE (2018)			FREITAS (2019)	
Pontos Representativos	Camadas	CBR Laboratorial (%)	Pontos Representativos	CBR Laboratorial (%)
Ponto 1	1	39	Ponto 3	37
	2	30		
Ponto 3	1	37	Ponto 9	36
	2	23		
Ponto 14	1	18	Ponto 12	34
	2	38		
Ponto 21	1	29	Ponto 17	34
	2	21		
Ponto 31	1	30	Ponto 24	20
	2	40		
			Ponto 28	25

Quando comparado os valores de CBR nota-se que os valores não diferem muito. O ponto 3, que é comum aos dois estudos, apresentou o mesmo valor de CBR. A estrada permaneceu apresentando valores relativamente altos de CBR, o que indica uma boa resistência do subleito.

4.1.3 Peso Específico Seco e Teor em Água Ótimo

O ensaio de Proctor Normal foi realizado para determinar o peso específico seco e o teor em água ótimo do solo, a fim de conhecer a quantidade de água necessária para obter uma ótima compactação do solo. A Tabela 21 apresenta a comparação dos valores do peso específico aparente seco ótimo, enquanto a Tabela 22 apresenta a comparação entre os valores do teor em água ótimo.

Tabela 21: Comparação do peso específico aparente seco.

CABETTE (2018)			FREITAS (2019)	
Pontos	Camada	Peso Específico Aparente Seco Ótimo (kN/m ³)	Pontos	Peso Específico Aparente Seco Ótimo (kN/m ³)
1	1	20,1	3	19,4
	2	18,2	9	18,7
3	1	19,3	12	18,7
	2	17,3	17	18,9
14	1	18,6	24	17,0
	2	18,2	28	18,4
21	1	19,0		
	2	17,0		
31	1	18,2		
	2	18,9		

Tantos os valores do peso específico aparente seco quanto o teor em água ótimo, apresentam valores aproximados entre os estudos. Para o ponto 3, o valor do peso específico seco e do teor em água ótimo foram idênticos.

Tabela 22: Comparação do teor em água ótimo.

CABETTE (2018)			FREITAS (2019)	
Pontos	Camada	Teor em Água Ótimo (%)	Pontos	Teor em Água Ótimo (%)
1	1	9,2	3	9,7
	2	13,0	9	11,5
3	1	9,7	12	11,5
	2	14,0	17	12,0
14	1	13,5	24	16,5
	2	12,5	28	12,5
21	1	10,5		
	2	14,0		
31	1	13,0		
	2	10,2		

4.1.4 Módulo de Deformabilidade

Para a determinação do módulo de deformabilidade os ensaios de carga em placa e LFWD foram realizados. A Tabela 23 mostra os resultados encontrados por Cabette (2018) e Freitas (2019).

Tabela 23: Comparação do módulo de deformabilidade.

CABETTE (2018)			FREITAS (2019)	
Pontos	EV1 (MPa)	EV2 (MPa)	Pontos	Evd (MPa)
1	108,6	157,2	3	20,27
3	124,9	142,6	9	24,85
14	37,9	63,0	12	21,9
21	124,5	101,8	17	20,11
31	67,1	99,6	24	12,44
			28	21,56

O ensaio de carga em placa determinou os valores de EV1 e EV2 que correspondem ao módulo de deformabilidade estático do solo, enquanto o ensaio LFWD determinou o valor de Evd que corresponde ao módulo de deformabilidade dinâmico do solo.

Segundo Moraes (2018), nos ensaios estáticos, o módulo de deformabilidade é obtido a partir do comportamento tensão-deformação do material submetido a processos de aplicação de carga de forma gradual, induzindo uma sucessão de estados de equilíbrio. Enquanto os ensaios dinâmicos estimam o valor da constante de deformabilidade por meio da resposta contínua e dinâmica do material a uma solicitação aplicada de forma rápida e cíclica.

Visto que os módulos de deformabilidade estático e dinâmico são diferentes, não é possível comparar os resultados. Freitas (2019) não conseguiu determinar uma correlação entre os valores de EV2 e Evd devido à grande dispersão dos dados dos ensaios, a provável causa desta discrepância é em decorrência do intervalo de tempo em que foram realizados os ensaios e devido à intervenção realizada no trecho em estudo.

O manual Zorn (2016) apresenta uma correlação entre os valores dos módulos de deformabilidade EV2 e Evd, conforme a equação abaixo:

$$E_{V2} = 2E_{vd} \quad (2)$$

Aplicando essa formulação nos valores de Evd encontrados, tem-se os seguintes valores apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Relação Evd e Ev2

FREITAS (2019)		
Pontos	Evd (MPa)	Ev2 (MPa)
3	20,27	40,54
9	24,85	49,7
12	21,9	43,8
17	20,11	40,22
24	12,44	24,88
28	21,56	43,12

Nota-se que os valores estimados de EV2 por meio da relação proposta por Zorn (2016), foram consideravelmente inferiores se comparados com os valores encontrados por Cabette (2018) no ensaio de carga em placa. Este fato pode ser justificado por se ter passado quase um ano de utilização da estrada, pela intervenção realizada, por se tratar de ensaios diferentes realizados em pontos diferentes e sob condições diferentes. Desta forma não é interessante realizar uma comparação entre os valores de EV2.

Para avaliar a validade da formulação apresentada é interessante que os ensaios de carga em placa e LFWD sejam realizados no mesmo dia e no mesmo ponto, sob as mesmas condições para que o resultado encontrado seja mais confiável.

4.1.5 Compactação do Solo

Cabette (2018) determinou o grau de compactação do solo por meio da razão entre o peso específico aparente seco “*in situ*” e o peso específico seco determinado em laboratório. Já Freitas (2019) obteve o grau de compactação do solo por meio da relação entre o valor de Evd e o grau de compactação presente na tabela do manual do equipamento do LFWD. A Tabela 25 apresenta a comparação dos resultados encontrados pelos autores referidos.

Tabela 25: Compactação do solo

CABETTE (2018)		FREITAS (2019)	
Pontos	Grau de Compactação (%)	Pontos	Grau de Compactação (%)
1	100,98	3	≥ 97
3	105,89	9	≥ 97
14	98,63	12	≥ 97
21	94,95	17	≥ 97
31	97,04	24	< 95
		28	≥ 97

Para o grau de compactação estimado por Cabette (2018) e por Freitas (2019) pode-se concluir que o solo nos dois estudos se encontrava com uma boa compactação.

4.2 Análise Comparativa das Metodologias

A análise do dimensionamento da estrutura do pavimento será feita comparando os resultados encontrados por Cabette (2018) e Freitas (2019) com os valores encontrados no capítulo anterior.

Em 2018, no seu estudo, Cabette (2018) utilizou o método proposto pelo Manual da Etiópia – Manual ERA (2011) - e obteve o dimensionamento ilustrado na Figura 22.

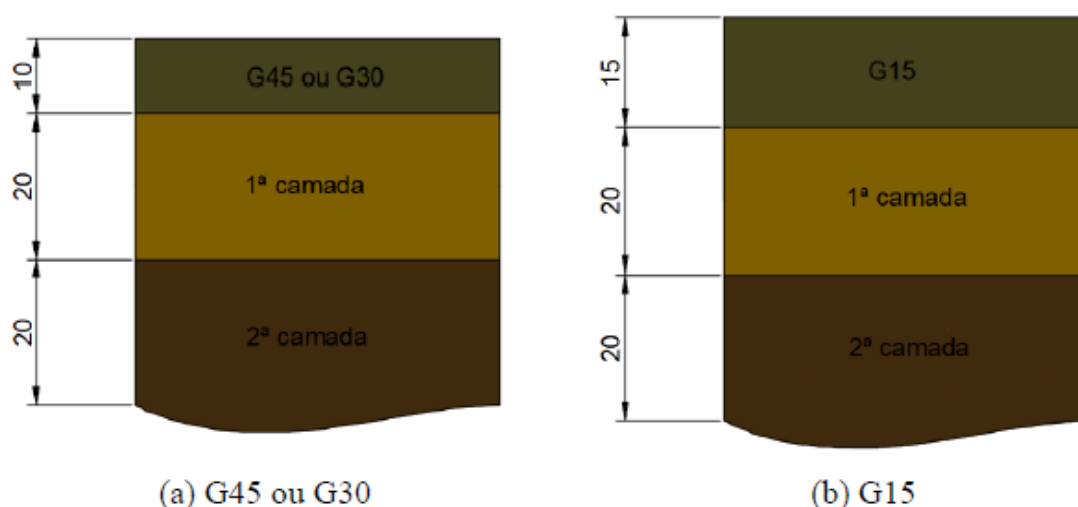


Figura 22: Dimensionamento (cm) da EBVT – Cabette (2018).

O Manual ERA (2011) considera no dimensionamento da camada de base o valor de CBR do cascalho que irá compor a camada. O método considera um cascalho tipo G45 e G30 como cascalhos naturais que apresentam valores de CBR de 45% e 30%, respectivamente. Enquanto o tipo G15 corresponde a um solo/brita que possui um CBR de 15%.

Para o valor estimado de CBR do subleito, Cabette (2018) chegou ao dimensionamento de uma camada de base de cascalho de 10 cm de espessura para cascalhos com CBR de 45% e 30 %, e 15 cm de espessura para cascalhos com CBR de 15%.

As espessuras dimensionadas por Cabette (2018) segundo o Manual ERA (2011) não são diferentes das encontradas utilizando os métodos da Austroads (2009) e do FCE (Brito, 2011). Para o solo de subleito, classificado como areia siltosa com pedregulho com valor de CBR laboratorial igual à 18%, a espessura da camada de base está entre 10 e 15 cm como ilustra a Tabela 26.

Tabela 26: Comparativo – Cabette (2018).

Comparativo - Cabette (2018)			Espessura da Camada de Base (cm)		
Ponto 24	Solo	CBR (%)	Manual ERA	Manual Austroads	Manual FCE
		Areia siltosa com pedregulho	18	10 - 15	10

Freitas (2019) também optou por utilizar a metodologia usada na Etiópia proposta pelo Manual ERA (2011), porém já havia passado quase um ano de utilização da estrada desde que Cabette (2018) havia feito a coleta de dados. Devido a ação do tráfego, das intempéries e de uma intervenção feita pela Câmara Municipal de Bragança, os valores encontrados por Freitas (2019) são diferentes do encontrado por Cabette (2018).

Em 2019, Freitas obteve o dimensionamento ilustrado na Figura 23.

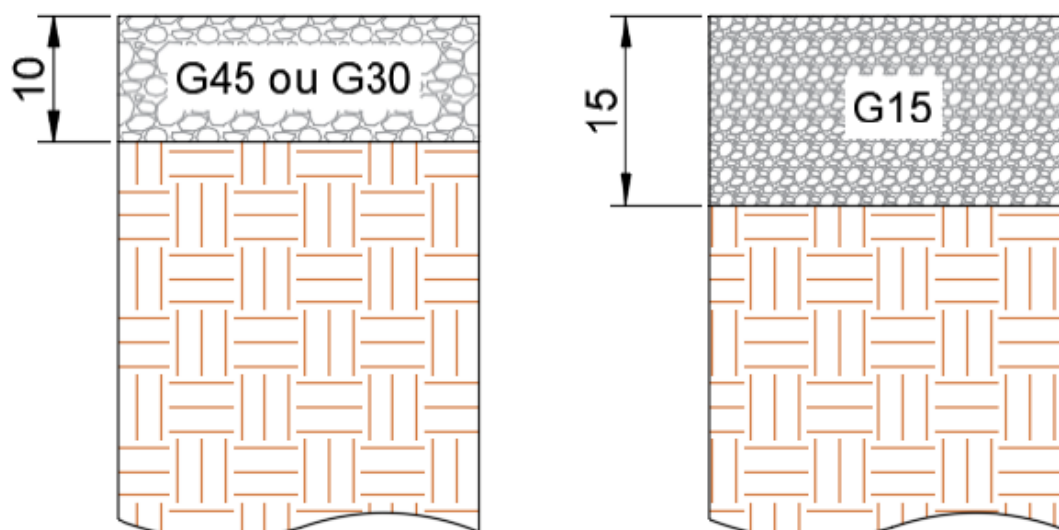


Figura 23: Dimensionamento (cm) da EBVT – Freitas (2019).

As variáveis de entrada para o dimensionamento conforme o Manual ERA (2011) foram um CBR com valor de 20% e um solo classificado como areia siltosa. Embora os dados de entrada sejam diferentes, a espessura determinada foi a mesma, isso se dá pela pequena variação que se teve no valor do CBR e por ter utilizado a mesma classe de tráfego para o dimensionamento.

A Tabela 27 mostra o comparativo dos resultados encontrados por Freitas (2018) e os encontrados no estudo atual.

Tabela 27: Comparativo – Freitas (2019).

Comparativo - Freitas (2019)		Espessura da Camada de Base (cm)			
	Solo	CBR (%)	Manual ERA	Manual Austroads	Manual FCE
Ponto 24	Areia siltosa	20	10 - 15	10	15

Os valores para as espessuras das camadas de base dimensionada, tanto para os dados de Cabette (2018) quanto para os dados de Freitas (2019), foram iguais. Este fator, junto com as demais comparações realizadas neste capítulo, mostra que o estado da estrada se manteve, ou seja, a estrada, após um ano de utilização e após uma intervenção da Câmara Municipal de Bragança, apresentou um comportamento similar ao comportamento do ano anterior a realização dos novos ensaios.

4.3 Estudo de Sensibilidade

O estudo de sensibilidade das variáveis presentes nas diferentes metodologias será feito adotando-se valores arbitrários para as variáveis de entrada a fim de observar o seu comportamento no dimensionamento de uma EBVT não pavimentada.

4.3.1 Manual ERA (2011)

As principais variáveis utilizadas para o dimensionamento usando o Manual ERA (2011) são a classe de tráfego e a classificação do solo do subleito. Os gráficos das Figuras 24, 25 e 26 mostram como a espessura da camada é influenciada pelas variáveis de entrada.

A espessura também é influenciada pela resistência do cascalho a ser utilizado no dimensionamento. O Manual ERA (2011) considera três classes de cascalho a ser usado na camada dimensionada, sendo eles G45, G30 e G15 que apresentam um valor de CBR igual a 45 %, 30% e 15% respectivamente.

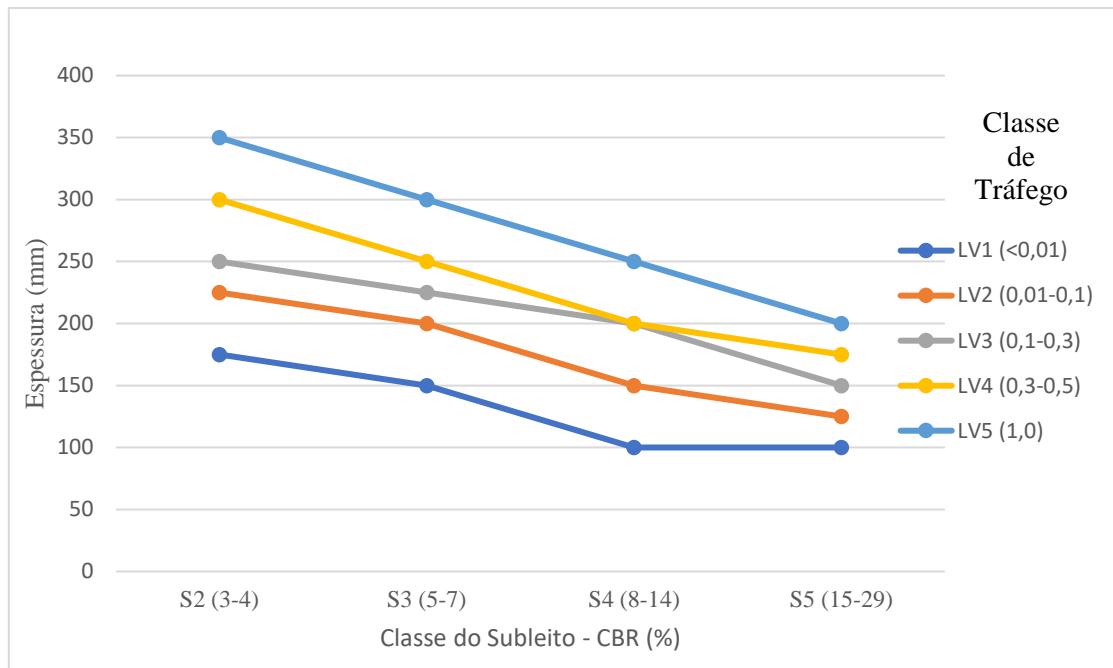


Figura 24: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Manual ERA (2011) CBR 45%.

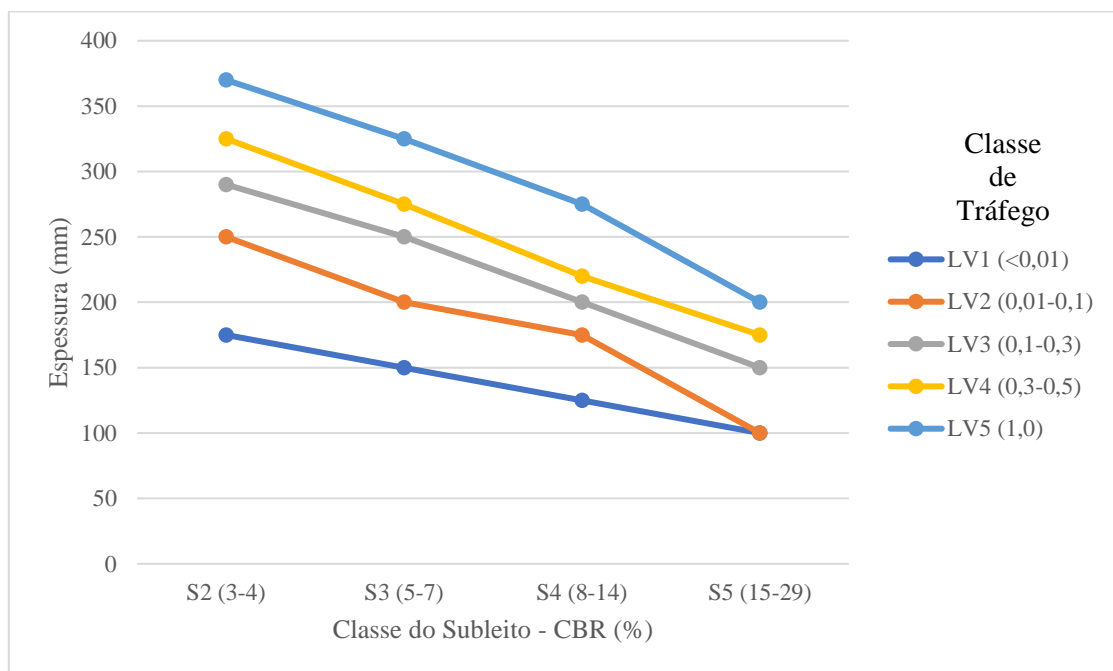


Figura 25: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Manual ERA (2011) CBR 30%.

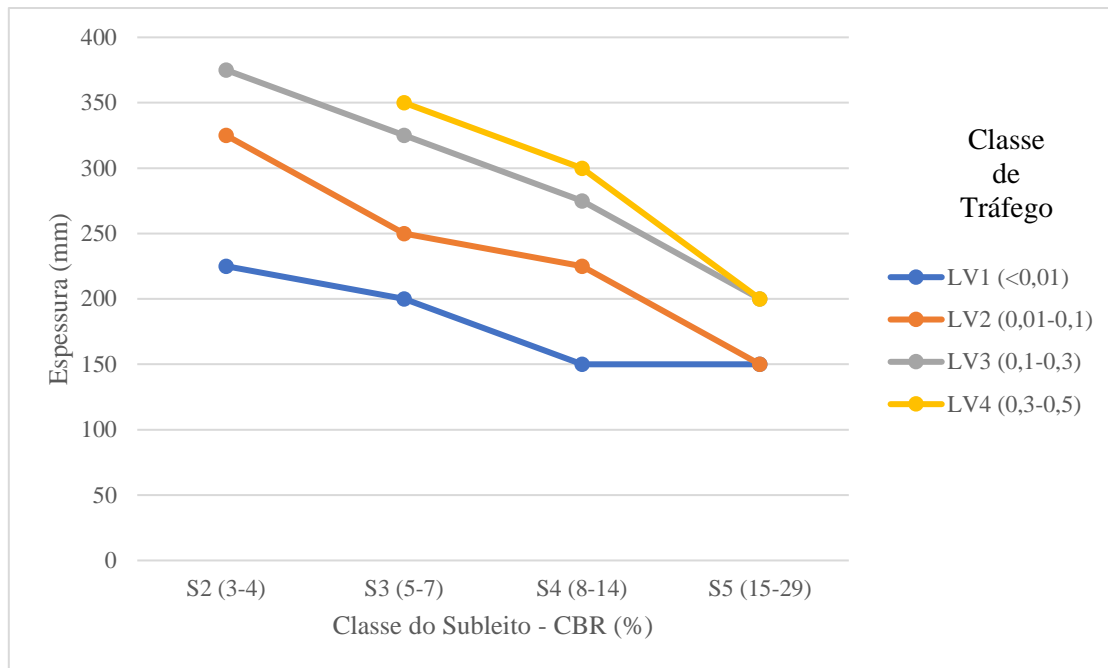


Figura 26: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Manual ERA (2011) – CBR 15%.

A primeira observação que se pode fazer ao analisar os gráficos acima é que quanto maior a resistência do cascalho a ser utilizado, menor será a espessura da camada dimensionada. Para uma camada de cascalho com valor de CBR igual a 15% não é possível dimensionar uma estrada com a classe de tráfego LV5, isso se dá pelo fato de apresentar uma resistência inferior, não sendo capaz de minimizar o suficiente as tensões transmitidas para o subleito podendo resultar no rompimento do pavimento.

A segunda observação é que quanto maior a classe de tráfego considerada, maior será a espessura da camada dimensionada. O inverso acontece com o valor de CBR, quanto maior o valor de CBR do subleito, menor será a espessura da camada dimensionada.

Analisando a variação da espessura da camada de base para o cascalho tipo G45, obteve-se o seguinte resultado, ver Figura 27.

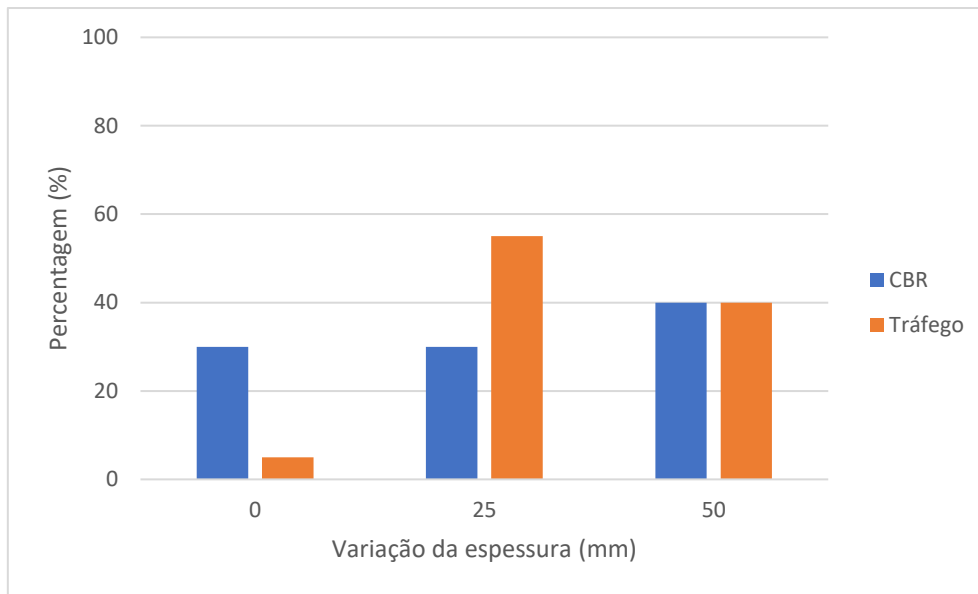


Figura 27: Variação da espessura (%) da camada de base – Manual ERA (2011) – CBR 45%.

Para a variação do valor de CBR, 70% dos resultados apresentaram variação da espessura da camada dimensionada, enquanto isso para a variação da classe de tráfego, 95% dos resultados apresentaram variação.

Para a camada de base com cascalho tipo G30, tem-se a seguinte variação da espessura da camada, ver Figura 28.

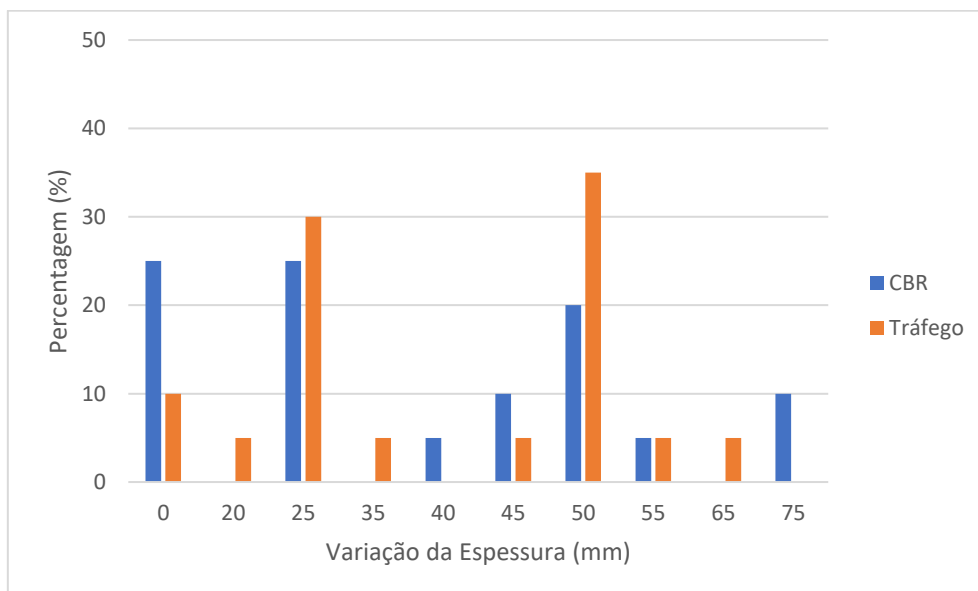


Figura 28: Variação da espessura (%) da camada de base – Manual ERA (2011) – CBR 30%.

Quando há variação do valor de CBR, 75% dos resultados apresentam uma variação na espessura da camada de base, entretanto, quando há variação da classe de tráfego 90% dos valores variam a espessura da camada.

Enfim, para a camada de base com cascalho tipo G15, a Figura 29 apresenta a variação da espessura da camada de base.

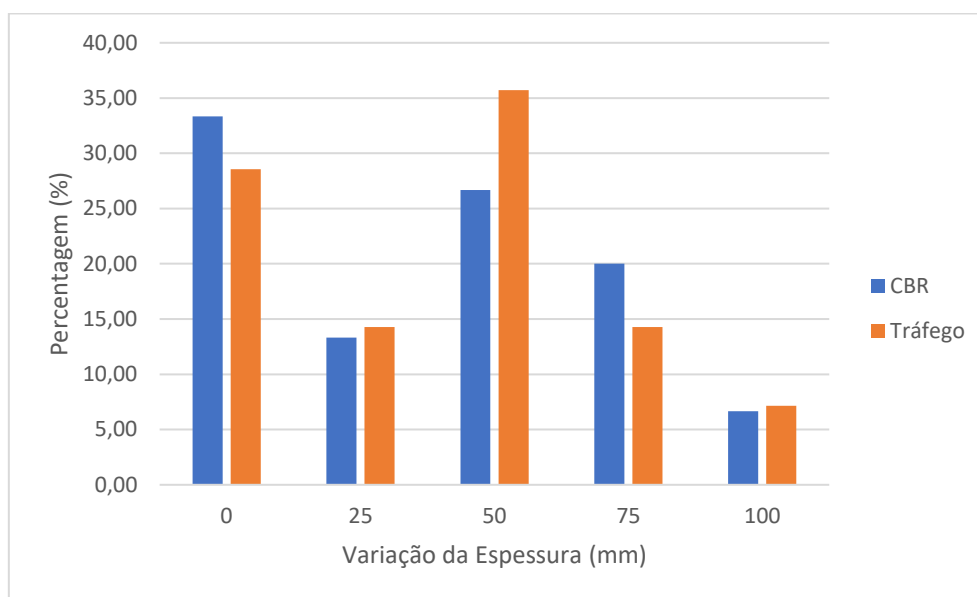


Figura 29: Variação da espessura (%) da camada de base – Manual ERA (2011) CBR 15%.

Para o cascalho tipo G15, quando se varia o valor de CBR, 66,6% dos resultados apresentam uma variação da espessura da camada, enquanto isso, para a variação do valor da classe de tráfego, 71,4% dos resultados apresentam variação.

Nota-se que há uma maior variação da estimativa da espessura da camada dimensionada quando se varia a classe de tráfego se comparado com a variação do valor de CBR. Assim, pode-se concluir que, para este método, a variável mais sensível é a classe de tráfego.

4.3.2 Austroads (2009)

Assim como a metodologia indicada no Manual ERA (2011), as principais variáveis que influenciam na espessura da camada a ser dimensionada segundo o Manual Austroads (2009) são a resistência da fundação, valor de CBR, e a classe de tráfego. A Figura 30 ilustra o comportamento da curva quando se varia o valor de CBR e o tráfego.

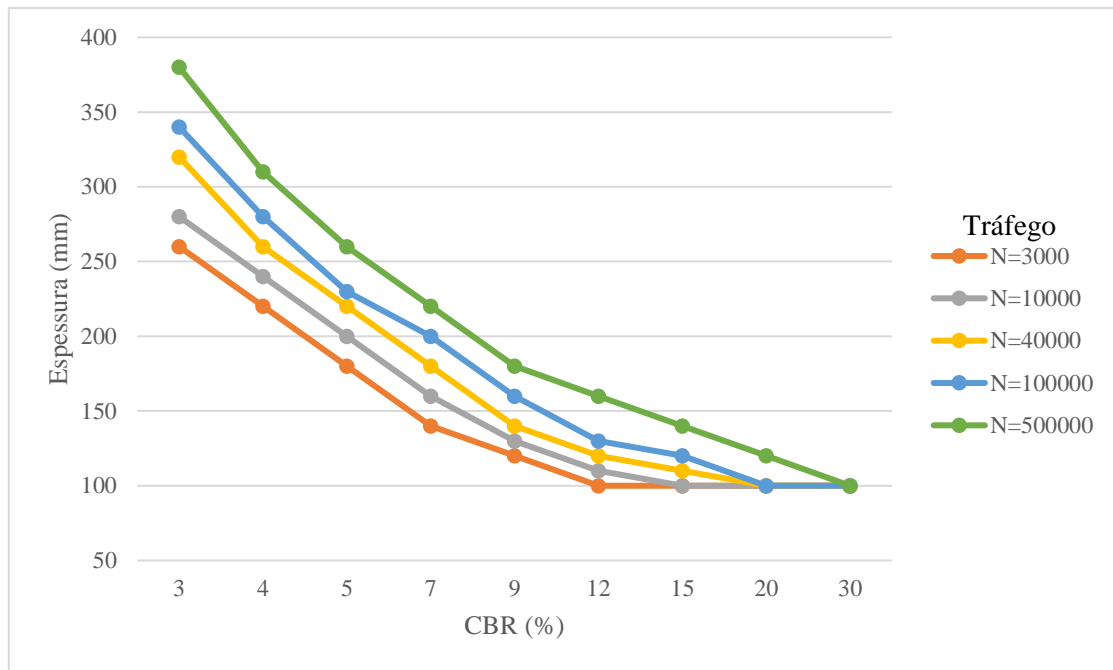


Figura 30: Influência do CBR e do tráfego na espessura do pavimento – Austroads (2009).

Nota-se que as curvas tendem para o mesmo valor de espessura de 100 mm, correspondendo à espessura mínima de dimensionamento para a camada de base de EBVT conforme o Manual Austroads (2009).

Avaliando a influência da variação do valor de CBR e do tráfego no valor dimensionado da espessura da camada de base, obtém-se o gráfico abaixo, ver Figura 31.

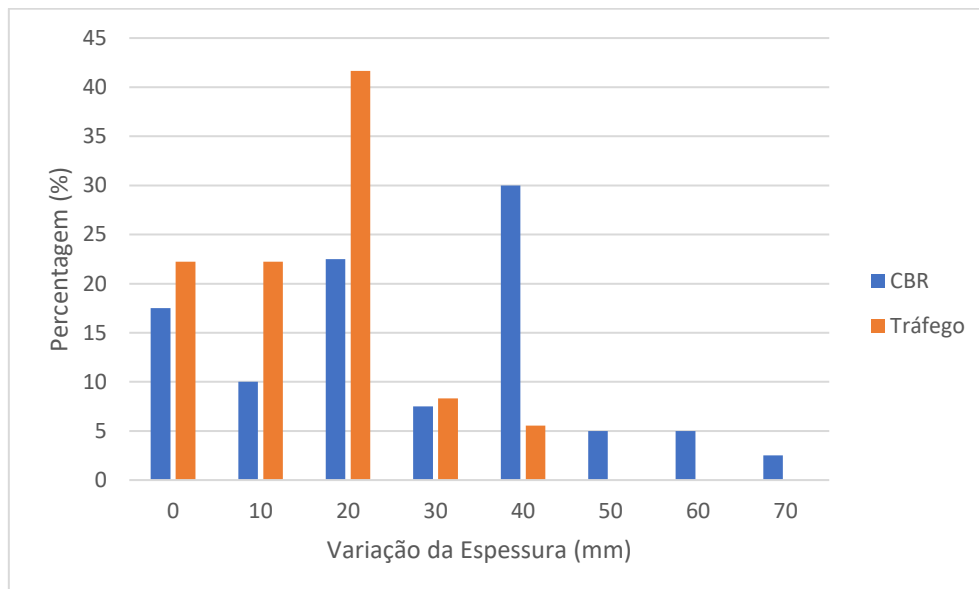


Figura 31: Variação da espessura (%) da camada de base – Austroads (2009).

Para a variação do valor do CBR, 82,5% dos resultados apresentam variação da espessura da camada de base, entretanto, para a variação do volume de tráfego, 77,8% dos resultados apresentaram variação da espessura.

Assim, pode-se concluir que a espessura da camada de base varia relativamente menos quando se altera o tráfego se comparado com o valor de CBR. Esse fator implica que o valor da resistência do subleito é a variável mais sensível para essa metodologia, tal como constata no Livro de Atas (2015).

4.3.3 FCE (Brito, 2011)

O método de dimensionamento britânico representado na Figura 32 possui apenas a variável de resistência do subleito e o tipo de solo como fatores que influenciam na espessura da camada dimensionada. Assim como nas demais metodologias, quanto maior o valor de CBR do solo que compõe a fundação, menor a espessura da camada de base necessária. Desta forma, a resistência do material específico no subleito e o valor de CBR são as variáveis mais sensíveis dessa metodologia.

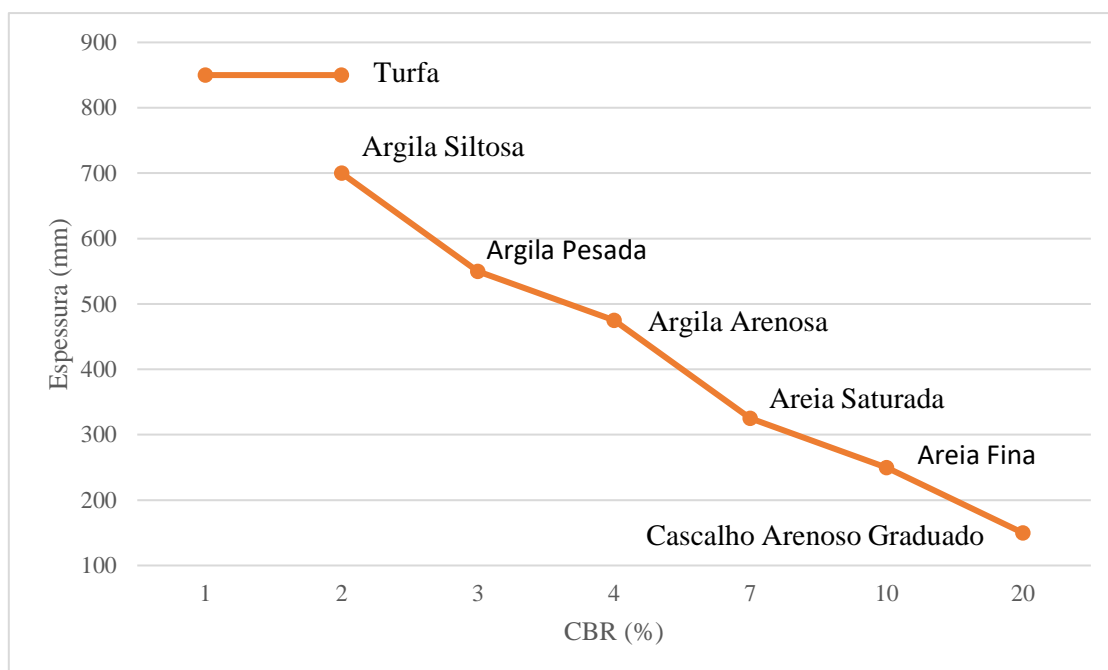


Figura 32: Influência do CBR e do tipo de material na espessura do pavimento – FCE (Brito, 2011).

CAPÍTULO 5

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho pretendeu mostrar a importância das estradas não pavimentadas de baixo volume de tráfego no desenvolvimento e na movimentação de pessoas e produtos na malha rodoviária de um país. Tendo em mente a importância das EBVTs, entende-se também a importância da construção da estrada de forma adequada e eficiente e que cumpra o seu papel estrutural proporcionando maior segurança e conforto para o usuário durante seu período de vida útil.

Existem diversos estudos e manuais que auxiliam os engenheiros no desenvolvimento de projetos e execução de estradas não pavimentadas. São muitos os fatores que podem influenciar a qualidade da estrada, por isso a necessidade de realizar ensaios e estudos mais aprofundados das tecnologias de construção e manutenção e dos fatores que são mais sensíveis no dimensionamento de uma EBVT.

Embora os ensaios laboratoriais e “*in situ*” não tenham sido realizados, foi possível realizar um comparativo entre três metodologias existentes para analisar o quanto elas diferem entre si.

O resultado encontrado foi o esperado, as três metodologias apresentam resultados similares quanto à espessura da camada de base. A variável comum aos três métodos foi o valor de CBR, ou seja, a resistência do subleito, isto mostra a importância que a fundação e sua respectiva resistência tem no comportamento da estrada. Quanto maior for a resistência do subleito, menor será a espessura da camada de base exigida.

Um aspecto negativo nos métodos propostos pelo Manual Austroads (2009) e pelo Manual FCE (Brito, 2011) é a inexistência de uma especificação do tipo de solo a ser utilizado para a construção da camada de base. Ambos os métodos apresentam apenas sugestões da curva granulométrica da camada de base e da camada de desgaste, mas não apresentam um valor de CBR para a camada de base como o Manual ERA (2011).

Uma vantagem dos métodos apresentados é que são relativamente simples de serem aplicados e são de fácil entendimento.

O comparativo realizado entre os parâmetros determinados nos estudos de Cabette (2018) e Freitas (2019) apresentam valores aproximados, o que indica que a estrada possui comportamento similar mesmo após quase um ano de utilização e após uma intervenção da Câmara Municipal de Bragança. Este fato implica que a estrada se

manteve durante esse intervalo de tempo entre os estudos, ou seja, a estrada não apresentou piora ou melhora significativa nas suas condições.

Um dos fatores mais importantes no desenvolvimento de estradas não pavimentadas é o tipo de material que se pode achar no local, geralmente esse tipo de estrada é construída com os solos já existentes.

Uma análise funcional e estrutural deve ser realizada para que haja mais dados sobre o estado da estrada de tal forma que seja possível identificar os defeitos e suas causas prováveis e, assim, adotar o melhor meio de intervenção necessário.

Ainda há muito o que analisar no caso de estudo, quanto maior a coleta de dados da estrada, mais informações se tem sobre ela, mais parâmetros podem ser utilizados para entender o comportamento da via além de proporcionar um histórico da estrada para futuros trabalhos.

Como recomendações para trabalhos futuros:

- Adotar uma metodologia diferente na determinação das seções homogêneas;
- Realizar a coleta de dados dos defeitos na determinação das seções homogêneas;
- Realizar novos ensaios para a caracterização física e mecânica da estrada como o CBR dinâmico;
- Buscar dados sobre os períodos de chuva para a avaliação do sistema de drenagem;
- Realizar um estudo e propor um dimensionamento para o sistema de drenagem;
- Fazer um comparativo para validar a relação proposta por Zorn (2016) entre os valores de EV2, CBR e E_{vd}.

Referências Bibliográficas

Austroroads (2006) - Pavement design for light traffic: a supplement to Austroroads pavement design guide. Austroroads Technical Report. Austrália.

Austroroads (2009) - Guide to pavement technology part 6: unsealed pavements. Austrália.

Benevides, S. A. de Sá (2006) - Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Bernucci, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., Soares, J. B. (2008) - Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, PETROBRAS: ABEDA.

Brito, L. A. T. (2011) - Design methods for low volume roads. Universidade de Nottingham. 2011.

Cabette, M. M. (2018) - Caracterização geotécnica de estradas não pavimentadas de baixo volume de tráfego: estudo de caso. Dissertação (Mestrado). Instituto Politécnico de Bragança - IPB.

CIA. Central Intelligence Agency. 2020. Página Inicial. Disponível em: < <https://www.cia.gov/index.html> >. Acesso em: 08 de Setembro de 2020.

DER (2006) - Avaliação funcional e estrutural de pavimento. Departamento de Estradas de Rodagem. IP-DE-P00/003.

ERA (2011) – Ethiopian Roads Authority, Design manual for low volume roads, Part A, Part B and Part C. Ethiopia.

ERA (2013) - Pavement design manual. Flexible pavements. Volume I. Ethiopian Roads Authority. Etiópia.

Ferreira, F. M. (2004) - Uma aplicação comparativa de métodos de avaliação das condições superficiais de estrada não-pavimentada. Dissertação (Mestrado). Universidade de Campinas, Campinas – Brasil.

Freitas, B. T. (2019) - Avaliação e caracterização geotécnica de uma estrada de baixo volume de tráfego. Dissertação (Mestrado). Instituto Politécnico de Bragança – IPB.

Guedes, A. R. A. (2018) - Estudo do comportamento de solo tratado em estradas não pavimentadas. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Huntington, G. Ksaibati, K. (2010) - Gravel roads management: implementation guide. Volume 2. Wyoming Technology Transfer Center, University of Wyoming. Laramie, Wyoming – EUA.

Jorge, L. da C. D. L. (2014) - Constituição, dimensionamento e conservação de pavimentos para baixos volumes de tráfego. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Keller, G., Sherar, J. (2003) - Low volume roads engineering: best management practices field guide. US Agency for International Development (USAID). Estados Unidos.

Livro de ATAS (2015) - III Congresso de Ciência e Desenvolvimento dos Açores & 8º Congresso de Gestão e Conservação da Natureza. Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo.

Moraes, V. P. P. (2018) – Proposta de metodologia de correlação entre módulos de elasticidade estático e dinâmico para litologias típicas do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

Mota, M. V. F. (2009) - Pavimento de baixo volume de tráfego: estudo comparativo da vida útil estimada e após abertura ao tráfego. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.

MTPW (2013) – Ministry of Transport and Public Works. Design manual for low volume sealed roads using the DCP method. República do Malawi.

Rodrigues, N. C. M. (2015) - Reforço de estradas não pavimentadas. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra.

SATCC (2003) - Guideline low-volume sealed roads. Botswana: Southern Africa Transport and Communications Commission.

Schall, J. D., Richardson, E. V., Morris, J. L. – Introduction to Highway hydraulics – Hydraulic design series No. 4.

Tembe, F. B. (2017) - Contribuição geotécnica para estradas de baixo volume de tráfego. Dissertação (Mestrado). Instituto Politécnico de Bragança.

Walker, D. (2002) - Pavement surface evaluation and rating: Gravel PASER Manual. Transportation Information Center, University of Wisconsin – Madison. EUA.

Zoccal, J. C., Silva, P. A. R. (2016) - Adequação de erosões em estradas rurais: causas, consequências e problemas na manutenção e conservação de estrada rural. CODASP – Companhia de Desenvolvimento Agrícola de São Paulo.

Zorn, (2016) – Supplementary user manual for the dynamic field CBR extension. Zorn Instruments. Stendal – Germany.

Zorn (2016) – User manual for the light weight deflectometer (LWD) ZFG 3.0. Stendal – Germany.