



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

CONTRIBUIÇÃO GEOTÉCNICA PARA ESTRADAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

Fernando Brazão Tembe

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

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Novembro, 2017



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

CONTRIBUIÇÃO GEOTÉCNICA PARA ESTRADAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

Fernando Brazão Tembe

Relatório Final de Projeto apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia da Construção

Orientadores:

Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto

Professor Doutor António Miguel Verdelho Paula

Novembro, 2017

AGRADECIMENTOS

Desejo a minha profunda gratidão à todos que direta ou indiretamente contribuíram para a materialização deste trabalho. Quero agradecer em particular:

- Todos professores e colegas do mestrado em engenharia da construção e em especial:
- ao Prof. Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto, pela paciência, disponibilidade; correção do texto e toda orientação;
- ao Prof. Doutor António Miguel Verdelho Paula, pela disponibilidade e orientação, tanto na parte científica como na parte prática deste trabalho;
- à Eng^a. Hermínia Morais pelo apoio nos trabalhos do campo e na documentação dos resultados;
- aos Sr. João Pires e ao Sr. Octávio Pereira, técnicos do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção da ESTIG, pela paciência e rigor demonstrado durante a realização dos ensaios;
- à Direção da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, pelas condições, equipamentos e meios laboratoriais disponibilizados
- à Camara Municipal de Bragança, por ter autorizado o acesso as obras no troço da antiga linha ferroviária que liga Bragança e Macedo, pelo pessoal técnico e equipamentos disponibilizados para a realização de ensaios;
- ao meu pais, irmãos e especialmente às minhas filhas pelo encorajamento e todo apoio
- aos meus colegas do curso e especialmente ao Ivan Spínola pelo apoio e encorajamento

RESUMO

Nos países em via de desenvolvimento, as estradas de baixo volume de tráfego (EBVT), têm um impacto muito importante no cumprimento dos requisitos estratégicos de desenvolvimento das zonas rurais e na aceleração do desenvolvimento global. As EBVT são construídas por materiais locais muitas vezes não padronizados e suscetíveis à humidade, o fator ambiental que governa o mecanismo de degradação de EBVT. É nesse sentido que surge a necessidade de se avaliar o contributo geotécnico para estradas de baixo volume de tráfego. Para a materialização deste objetivo, realizou-se uma campanha de ensaios de campo e do laboratório, que contribuirão para o desenvolvimento das correlações entre os parâmetros geotécnicos relacionados com a caracterização do pavimento; fez-se uma análise das metodologias mais correntes do dimensionamento de EBVT, envolvendo a avaliação geotécnica e a aplicação destas metodologias em um caso de estudo envolvendo a caracterização “*in situ*”.

Este trabalho, estudou um pequeno troço da antiga linha ferroviária do Tua que liga os concelhos de Bragança e Macedo de Cavaleiros, no âmbito da sua requalificação para ecopista. Nesse troço foram realizados ensaios de caracterização geotécnica do pavimento em cinco pontos com diferentes características geométricas e geotécnicas. Foram realizados no troço em estudo os seguintes ensaios: a análise granulométrica; o ensaio Proctor; o ensaio de índice californiano de capacidade de suporte (CBR); o ensaio de carga em placa (ECP); o ensaio de penetração com Penetrómetro dinâmico ligeiro (PDL) e o ensaio de controlo de compactação com a célula radioativa (Gamadensímetro). Quanto à granulometria o solo predominante é classificado como areia siltosa com cascalho (SM), conforme o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS) e relativo ao teor em água nos solos estudados varia de 5.5% a 9.5% e o índice californiano de capacidade de suporte está no intervalo de 12.2% a 26.4%. Em relação ao ensaio de penetração com Penetrómetro dinâmico ligeiro apresenta uma taxa de penetração (N_{10}) que varia de 9.8 a 46.5 e quanto ao ensaio de controlo de compactação com célula radioativa, o grau de compactação (GC) varia de 93% a 98% e o módulo de deformabilidade do solo (EV_2) obtido do ensaio de carga em placa (ECP) está no intervalo entre 61.43 MPa a 173.23 MPa. Com os resultados obtidos dos ensaios de caracterização, primeiro procedeu-se à realização de correlações entre todos parâmetros ensaiados com a taxa de penetração (N_{10}) e posteriormente correlacionou-se o índice CBR com o grau de compactação GC; o índice CBR com o módulo de deformabilidade do solo (EV_2) e por fim o módulo de

deformabilidade do solo (EV_2) com o grau de compactação GC. Do desenvolvimento das correlações, verificou-se a ausência de uma correlação linear entre os parâmetros estudados na exceção da correlação entre índice californiano de capacidade de suporte (CBR) e o grau de compactação (GC) que apresentou um coeficiente de correlação de 0.67, o que mostra haver uma tendência de correlação.

Após o desenvolvimento das correlações, procedeu-se a aplicação dos métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos betuminosos abordados neste trabalho e a comparação dos resultados em termo de estruturas de pavimentos obtidos com estes métodos. Os métodos de dimensionamento aplicados são: métodos de “*Transport and Research Laboratory for Southern Africa Development Community*” (TRL/SADC 1999); método de “*South Africa Transportation and Commuication Comission*”(SATCC 1997); método de Catálogo de Road Note 31 e o método de Catálogo de Moçambique. Todos métodos tem como parâmetro de base de dimensionamento a classe de fundação, determinada em termos de índice californiano de capacidade de suporte (CBR). A classe de fundação do troço estudado classifica-se em S4 e S5. Os métodos de dimensionamentos usam catálogos para determinar a estrutura dos pavimentos e todos métodos privilegiam o uso de um revestimento superficial fino (5 a 8cm) em mistura betuminosa, para impedir a entrada da água na estrutura de pavimento. O método de catálogo de Moçambique é o que exige maior espessura da camada, o que aparentemente pode ser o que demanda maiores custos na fase de construção quando comparado como outros métodos.

ALAVRAS-CHAVE

Estradas de Baixo Volume de Tráfego (EBVT);

Métodos de Dimensionamento de EBVT;

Materiais Naturais;

Fundação;

Ensaio de Caracterização do Solo;

Correlações entre Ensaio.

ABSTRACT

In developing countries, low volume traffic roads (LVTRs) has a very important impact on meeting the strategic development requirements of rural areas and accelerating overall development. LVTRs are constructed of local materials often non-standardized and susceptible to moisture, the environmental factor that governs the LVTRs degradation mechanism. It is in this sense that the need arises to evaluate the geotechnical contribution to roads with low volume traffic. To achieve this objective, a field and laboratory tests campaign was carried out, which will contribute to the development of correlations between the geotechnical parameters related to the characterization of the pavement; an analysis of the most current methodologies of the design of LVTRs was carried out, involving the geotechnical evaluation and the application of these methodologies in a case study involving the in situ characterization. This work, studied a small section of the old railway line of the Tua that connects Bragança and Macedo de Cavaleiros, within the scope of its requalification for ecopist. In this section, geotechnical characteristics of the pavement were carried out in five points with different geometric and geotechnical characteristics. The following tests were carried out in the section under study: granulometric analysis; the Proctor test; the California bearing Ratio (CBR) test; the plate loading test (ECP); the Penetration with Dynamic Light Penetrometer (DLP) test and the control compaction of soil with the radioactive cell test. As for the granulometry, the predominant soil is classified as silt sand with gravel (SM), according to the unified soil classification system (SUCS) and relate to the water content in the soils studied it is in the range of 5.5% to 9.5% and the Californian capacity index is in the range of 12.2% to 26.4%. regard to the penetration test with Dynamic Light Penetrometer shows a penetration rate (N10) ranging from 9.8 to 46.5 and for the control of compaction with radioactive cell test, the degree of compaction (DC) ranges from 93% to 98% and the soil deformability modulus (EV2) obtained from the plate loading test (ECP) is in the range of 61.43 MPa to 173.23 MPa. With the results obtained from the characterization tests, we first performed correlations between all the parameters tested with the penetration rate (N10) and later correlated the CBR index with the degree of compaction (DC); the CBR index with the soil deformability modulus (EV2) and finally the soil deformability modulus (EV2) with the degree of compaction (DC). From the development of the correlations, it was verified the absence of a linear correlation between the studied parameters in the exception of the correlation between the California bearing Ratio (CBR)

test and the degree of compaction (DC) that presented a correlation coefficient of 0.67, which shows a tendency of correlation.

After the development of the correlations, we applied the empirical design methods of bituminous pavements discussed in this work and the comparison of the results in term of pavement structures obtained from these methods. The design methods applied are: methods of "Transport and Research Laboratory for Southern Africa Development Community" (TRL / SADC 1999); method of "South Africa Transportation and Commuication Commission" (SATCC 1997); Road Note 31 Catalog method and the Mozambique Catalog method. All methods have as base parameter of design the foundation class, determined in terms of the California bearing Ratio (CBR). The foundation class of the studied section is classified as S4 and S5. The design methods use catalogs to determine pavement structure and all methods favor the use of a thin surface coating (5 to 8cm) in bituminous mixture to prevent water from entering the pavement structure. The Mozambican catalog method requires the highest thickness of the layer, which apparently may be the one that demands higher costs in the construction phase when compared to other methods.

EYWORDS

Low Volume Traffic Roads (LVTR);

Design Methods of Low Volume Traffic Roads;

Natural Materials;

Foundation;

Soil Characterization Tests;

Tests Correlation.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento Temático	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ESTRADAS DE BAIXO TRÁFEGO	4
2.1. Aspetos Gerais	4
2.2. Classificação de EBVT.....	5
2.3. Ambiente Rodoviário em EBVT	7
2.4. Estruturas de pavimento em EBVT	9
2.4.1. Tipos de Pavimentos em EBVT	10
2.4.2. Camadas Superficiais de Pavimentos de EBVT	12
2.5. Materiais dos Pavimentos das EBVT	16
2.5.1. Seleção e Uso de Materiais Local	17
2.5.2. Especificações de Materiais	18
2.5.3. Comportamento Mecânico dos Materiais	19
2.6. Drenagem do Pavimento em EBVT	20
2.6.1. Drenagem Longitudinal.....	21
2.6.2. Drenagem Transversal.....	21
2.6.3. Classificação da Drenagem em EBVT.....	21
2.7. Manutenção em EBVT	22
2.7.1. Patologias mais Comuns em EBVT	23
2.7.2. Tipos de Manutenção	24
3. DIMENSIONAMENTO DE EBVT.....	25
3.1. Tráfego.....	25
3.2. Fundação de Pavimentos em EBVT	30
3.3. Métodos de Dimensionamento de EBVT	32
3.3.1. Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Revestidos.....	33
3.3.2. Método de Dimensionamento de Pavimentos não Revestidos.....	45
3.3.3. Considerações Finais.....	49
4. ABORDAGEM GEOTÉCNICA ÀS ESTRADAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO.....	50
4.1. Ensaio de Laboratório	51
4.1.1. Ensaio de índice Californiano de Capacidade de Suporte (CBR).....	51
4.1.2. Ensaio de Compactação -Proctor	52

4.1.3. Análise Granulométrica.....	54
4.2. Ensaios “ <i>In Situ</i> ”	56
4.2.1. Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (PDL).....	57
4.2.2. Ensaio de Carga em Placa (ECP)	57
4.2.3. Controlo de Compactação com Célula Radioativa	59
4.4. Programas de Trabalhos e ensaios – “Caso de Estudo”.....	60
4.4.1. Descrição da Área de Estudo	60
4.4.2. Características do Traçado	62
4.4.3. Trabalhos Desenvolvidos	63
5. RESULTADOS DOS ENSAIOS E CORRELAÇÕES	65
5.1. Considerações Iniciais	65
5.2. Resultados da Análise Granulométrica.....	66
5.3. Resultados de Ensaio Proctor.....	68
5.4. Resultados de Ensaio California Bearing Ratio (CBR)	69
5.5. Resultados de Ensaio de Controlo de Compactação com Célula Radioativa	70
5.6. Resultados de Ensaio com o Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (PDL)	70
5.7. Resultados de Ensaio de Carga em Placa (ECP)	71
5.8. Correlações entre Ensaios	76
6. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS.....	90
6.1.Caso de Estudo.....	90
6.2.Comparação de estruturas de pavimentos.....	93
7. CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO I.....	101
ANEXO II	104
ANEXO III	106
ANEXO IV	109
ANEXO V	111
APÊNDICE A.6	112
APÊNDICE B.6.....	114
APÊNDICE C.6.....	117
APÊNDICE D.6	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Impactos relativos de tráfego e outros fatores de ambiente rodoviário na degradação de EBVT (Adaptado MRB,2013b).....	7
Figura 2- Fatores de ambiente rodoviário (Extraído de Jorge,2014).....	8
Figura 3- (a)-Estrutura de estradas não revestidas; (b) - Estrutura de estradas revestidas (adaptado de Jorge,2014).....	10
Figura 4- Exemplo de pavimento com revestimento em solo (Adaptado ERA,2011b).....	13
Figura 5- Exemplo de pavimento com revestimento de cascalho (Adaptado ERA,2011b).....	13
Figura 6- Exemplo de revestimentos betuminosos (Extraído de Jorge, 2014).....	16
Figura 7- perfil esquemático do pavimento (a) EMVT e (b) EBVT (Extraído de Jorge,2014).....	20
Figura 8- Exemplo de boa drenagem em EBVT (Adaptado MTPW,2013).....	22
Figura 9- Vida útil da estrutura de pavimento (Adaptado ERA,2013b).....	27
Figura 10- Crescimento de tráfego em EBVT (Adaptado SATCC,2003).....	28
Figura 11- Procedimento de projeto para estradas revestidas (adaptado de Gourley et al, 1999.....	35
Figura 12-Relação entre o produto de retração, coeficiente granulométrico e desempenho ao desgaste de cascalhos grossos.....	47
Figura 13- Projeto para pavimentos granulares (80% de confiança) - (adaptado de Brito,2011).....	49
Figura 14- Realização do ensaio CBR.....	52
Figura 15- Realização do ensaio Proctor.....	53
Figura 16- Curva de compactação adaptado do (J.Santos,2008).....	54
Figura 17- Análise granulométrica (Adaptado de M. Fernandes, 2015).....	55
Figura 18- Análise Granulométrica.....	56
Figura 19- Equipamento de Ensaio PDL.....	57
Figura 20- Ensaio de Carga em Placa.....	59
Figura 21- célula radioativa.....	60
Figura 22- Área de ensaios (imagem tirada do Google Earth).....	62
Figura 23- problemas relacionados com drenagem.....	63
Figura 24- Organograma de ensaios realizados.....	64
Figura 25- Análise Granulométrica por Peneiração Húmida-02/06/2017.....	66
Figura 26- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P1.....	72
Figura 27- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P2.1.....	72
Figura 28- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P2.2.....	73
Figura 29- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P3.....	73
Figura 30- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P4.....	74
Figura 31- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P5.....	74
Figura 32- Correlação entre CBR e N10 em solos de classe SM GM.....	78
Figura 33- Correlação entre CBR e N10 em solos de classe SM GM com início à origem.....	79
Figura 34- Correlação entre GC e N10 em Solos SM e GM.....	80
Figura 35- Correlação entre GC e N10 no Solo SM e GM com início à origem.....	81
Figura 36- Correlação entre EV2 e N10 em Solo SM e GM.....	82
Figura 37- Correlação entre N10 e Módulo de deformabilidade do Solo SM e GM com início à origem.....	83
Figura 38- Correlação entre CBR e GC em solos SM e GM com início à origem.....	85
Figura 39- Correlação entre CBR e EV2 em solos SM e GM.....	86
Figura 40- Correlação entre CBR e EV2 em solos SM e GM com início à origem.....	86
Figura 41- Correlação entre EV2 e GC em solos SM e GM.....	87
Figura 42- Correlação entre EV2 e GC em solos SM e GM com início à origem.....	88
Figura 43- Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas usada nos catálogos de projeto de ,2003 (SATCC).....	101
Figura 44- Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas usada nos catálogos de projeto de Road Note3 1 (TRL,1993).....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação de EBVT adaptado de era, 2013.....	6
Tabela 2- Fatores de ambiente rodoviário que influenciam o comportamento das de EBVT (Adaptado de ERA,2011 ^a)	8
Tabela 3- Fatores de ambiente rodoviário que influenciam o comportamento das de EBVT (Adaptado de ERA,2011 ^a) (continuação).....	9
Tabela 4- Características de estruturas de EBVT	10
Tabela 5- Classificação da drenagem em EBVT (Adaptado ERA,2013b)	22
Tabela 6- Guia para seleção de vida útil de projeto (Adaptado SATCC,1998).....	27
Tabela 7- Classe de tráfego (Adaptado MRB,2013c).....	30
Tabela 8- Classe de Fundação (Adaptado ERA,2011b)	31
Tabela 9- Métodos de conceção de pavimentos aplicados na África Austral-SADC (adaptado de SATCC,2003).....	33
Tabela 10- Classes de tráfego de projeto (adaptado de Gourley et al., 1999)	36
Tabela 11- Classes de fundação (adaptado de Gourley et al, 1999)	36
Tabela 12- Classe de tráfego (Adaptado da SATCC, 1998).....	39
Tabela 13- Reclassificação de condições climáticas para regiões nominalmente húmidas (adaptado de SATCC, 1998).....	40
Tabela 14- Tipologias de estruturas previstas no catálogo de estruturas (adaptado de SATCC, 1998)	41
Tabela 15- Classes de tráfego de projeto (adaptado deTRL,1993).....	42
Tabela 16- Classe de fundação (adaptado da Khadka, 1993)	43
Tabela 17- Espessura da base em cascalho de boa resistência (G45) (adaptados de MTPW,2013a)	46
Tabela 18- Espessura da base em cascalho de resistência média (G30) (adaptados de MTPW,2013a)	46
Tabela 19- Espessura da base em cascalho de baixa resistência (G15) (adaptado do MTPW,2013a).....	47
Tabela 20- perda de cascalho tipicamente padronizada (adaptado do MTPW,2013).....	47
Tabela 21- Coordenadas dos pontos ensaiado	61
Tabela 22- Classificação do Solo segundo Sistema Unificado (ASTM-25) -02/06/2017	68
Tabela 23- Resultados de Ensaio Proctor - 05/06/2017.....	69
Tabela 24- Ensaio CBR - 16/06/2017.....	70
Tabela 25 - Ensaio de Controlo de Compactação com Célula Radioativa - 14/06/2017	70
Tabela 26- -Ensaio PDL - 14/06/2017.....	71
Tabela 27-Resultados do Ensaio de Carga em Placa (22/06/2017)	75
Tabela 28-Resumo de resultados dos ensaios.....	76
Tabela 29-Resumo de resultados das correlações feita	88
Tabela 30-Estruturas de pavimentos de todas as secções pelo método TRL/SADC:	91
Tabela 31-Estruturas de pavimento de todas as secções pelo método SATCC	92
Tabela 32-Estruturas do pavimento obtidos pelo método de catálogo de Road Note 31.....	93
Tabela 33-Estruturas do pavimento obtidos pelo método de catálogo de Moçambique.....	93
Tabela 34-Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados no Método do Catálogo para projeto de estradas com pavimentos revestidos e não revestidos (adaptado de Jorge, 2014).....	110
Tabela 35-Estruturas de pavimentos de todas as secções pelo método TRL/SADC:	113
Tabela 36-Estruturas de pavimento de todas as secções pelo método SATCC	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Catalogo 1-Estruturas consideradas para projeto de pavimentos para $N < 1$ (SATCC,2003) ...	102
Quadro 2-Catalogo 2- estruturas consideradas para projeto de pavimento para $N > 4$ (SATCC,2003)	103
Quadro 3-Catalogo D1 para regiões secas (SATCC, 1998)	104
Quadro 4-Catalogo D2 para regiões secas (SATCC, 1998)	105
Quadro 5-Catalogo 1- para camada de base e de sub-base em material granular usado no Road Note31 (TRL,1993).....	107
Quadro 6-Catalogo 2- para camada de base e de desgaste em material granular usado no Road Note31 (TRL,1993).....	108
Quadro 7-Catálogo 1-Projeto de pavimento betuminoso (Extraído de Jorge,2014).....	109
Quadro 8-Catalogo 2-Projeto de pavimento betuminoso (adaptado de Jorge,2014)	109
Quadro 9-Especificações recomendadas para estradas não pavimentadas (adaptado de I.Santos,2013)..	111
Quadro 10-Catalogo 2- estruturas consideradas para projeto de pavimento para $N > 4$ (SATCC,2003) ..	112
Quadro 11-Catalogo D1 para regiões secas (SATCC, 1998)	116
Quadro 12-Catalogo 1- para camada de base e de sub-base em material granular usado no Road Note31 (TRL,1993).....	118

LISTA DE ABREVIATURAS

ANE	Administração Nacional de Estradas
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
CBR	<i>Californian Bearing Ratio</i>
CP	Caminhos de Ferro de Portugal
DCP	Dynamic Cone Penetrometer
ECP	Ensaio de carga em placa
Esf	Módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa)
ESAs	Equivalent Standard Axles
EBVT	Estradas de baixo volume de tráfego
EMVT	Estradas de maior volume de tráfego
Ev	Módulo de deformabilidade
Ev1	Módulo de deformabilidade no primeiro ciclo de carga (MPa)
Ev2	Módulo de deformabilidade no segundo ciclo de carga (MPa)
E _{sf}	Módulo de deformabilidade do solo de fundação
GC	Grau de compactação (%)
IP	Infraestruturas de Portugal
Ic	Índice de consistência
JAE	Junta Autónoma de Estradas
Kg	Quilograma
kN	Quilo Newton
K	Relação entre módulos de deformabilidade
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVTR	Low Volume Traffic Roads
M	Metro
MPa	Mega Pascals
N	Índice Climático
NP	Norma Portuguesa
PDL	Penetrómetro Dinâmico Ligeiro

SATCC	Southern Africa Transport and Communication Comission
SADC	Southern Africa Development Community
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TMDAP	Tráfego médio diário anual de veículos pesados
TMDA	Tráfego Médio Diário Anual
TRL	Transport Research Laboratory
qd	Resistência a penetração dinâmica de ponta
rd	Resistência a penetração dinâmica
w	Teor em água (%)
wopt	Teor em água ótimo (%)
v	Coeficiente de Poisson
γ	Peso específico (kN/m ³)
γ_d	Peso volúmico seco do solo (kN/m ³)
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	Peso volúmico seco máximo
σ	Tensão normal na placa (KPa)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Temático

A rede rodoviária de um país constitui um património vital para o seu desenvolvimento socioeconómico e, em particular, as estradas de baixo volume de tráfego (EBVT), têm desempenhado um papel muito importante no cumprimento dos requisitos estratégicos de desenvolvimento das zonas rurais e na aceleração do desenvolvimento global.

A situação típica na maioria dos países em desenvolvimento é caracterizada por maior densidade populacional na área rural, cuja economia é baseada na agricultura, onde o imperativo é proporcionar a essa comunidade rural um acesso seguro e sustentável aos serviços básicos. Nesses países, uma alta percentagem da rede rodoviária rural é constituída por trechos de estrada sem revestimento.

As estradas com revestimento em cascalho geralmente constituem cerca de 70 a 90 por cento duma rede rodoviária típica dos países em desenvolvimento, enquanto estradas de terra dominam a rede não designada classificada. Essas estradas, que geralmente ligam as áreas de produção agrícolas à rede rodoviária primária, desempenham um papel social e económico vital no desenvolvimento das áreas rurais onde a maioria das populações vivem. (Cook, Gourley, & UK, 2002)

Um sistema de EBVT bem projetado, construído e mantido é essencial para o desenvolvimento económico e social de muitas comunidades rurais. O seu estudo deve proporcionar soluções apropriadas à envolvente à estrada a um custo mínimo ao longo do seu ciclo de vida, mantendo um nível ideal de serviço.

As especificações atuais em países mais desenvolvidos, tendem a excluir o uso de muitos materiais naturais na sua composição, em favor de materiais britados mais caros. No entanto tem-se constatado que os materiais naturais podem, muitas vezes, ser usados com sucesso e de forma rentável em pavimentos de EBVT, desde que sejam tomadas precauções adequadas, desde a fase de projeto, construção e manutenção, (ERA, 2011).

Corresponde à fase de projeto, avaliar fatores como tráfego, aspetos climáticos e aspetos geotécnicos, sendo este último o maior enfoque neste estudo. Os aspetos geotécnicos desempenham um papel fundamental neste tipo de infra-estruturas, dado que os seus parâmetros, por um lado, são usados como “inputs” em alguns métodos de

dimensionamento, e por outro lado como indicadores de qualidade durante as fases de construção e manutenção, respetivamente. Esta é uma razão mais do que suficiente para se estudar minuciosamente o seu contributo nas abordagens mais usadas para o dimensionamento de EBVT.

Ainda na fase de projeto, importa referir que a metodologia para projetar este tipo de estruturas de pavimento deve ser suficientemente precisa para que a principal causa de ruína das EBVT - deformação permanente ou rodeiras ser evitada e tornar o nível de manutenção sustentável. Por esse motivo, um dos parâmetros fundamentais a ser estudado cuidadosamente, no contexto da análise baseado num método de conceção de EBVT consiste no estudo das camadas onde possa ocorrer o "desenvolvimento de deformação permanente".(Brito, 2011)

É pois essencial que, na fase de projeto, sejam adotadas características adequadas para a fundação dos pavimentos. Tais características dependerão, naturalmente, dos solos de fundação existentes na linha e dos materiais utilizados para a execução dos aterros, e das medidas que se adotarem com vista à execução do leito do pavimento.(Antunes, 1993)

Na fase de construção é necessário garantir a utilização de materiais adequados, a execução de sistemas de drenagem apropriados e uma geometria de acordo com o projecto e durante a utilização, garantir uma manutenção sistemática e para tal, existem métodos de avaliação e inspeção visual que identificam possíveis problemas bem como métodos para os solucionar.

1.2. Objetivos

Objetivo geral

Avaliar o contributo geotécnico para estradas de baixo volume de tráfego

Objetivos específicos

Analisar as metodologias correntes de dimensionamento de EBVT, envolvendo a avaliação geotécnica;

Aplicar as metodologias a um caso de estudo, envolvendo caracterização geotécnica “in situ”;

Contribuir para o desenvolvimento de relações entre parâmetros geotécnicos relacionados com a caracterização geotécnica de fundações de EBVT.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada fundamentalmente em sete principais capítulos, que descrevem os aspetos fundamentais para o desenvolvimento e compreensão dos objetivos supracitados, nos quais:

O primeiro CAPÍTULO, aborda uma breve introdução ao tema em estudo, apresentação dos objetivos e estrutura da dissertação;

O segundo CAPÍTULO, consiste em apresentar síntese de características gerais de EBVT, com ênfase na classificação; ambiente rodoviários e pavimentos;

No terceiro CAPÍTULO, aborda o dimensionamento de EBVT, com ênfase nos métodos de dimensionamento mais correntes;

No quarto CAPÍTULO, faz-se uma abordagem geotécnica às EBVT, apresentando uma descrição dos principais ensaios de caracterização inerentes ao dimensionamento de EBVT e o programa de trabalhos e ensaios (caso de estudo) -intervenção na requalificação da antiga linha ferroviária do Tua no troço que liga Bragança e Macedo (estrada de terra);

No quinto CAPÍTULO, apresentação dos resultados dos ensaios (ensaios de campo e laboratoriais). Estudo da correlação entre os resultados de ensaios obtidos no capítulo 4. Discussão dos resultados, conclusões e proposta de prosseguimento de trabalhos;

No sexto CAPÍTULO, faz-se a comparação de métodos de dimensionamento de EBVT (com maior destaque ao contributo geotécnico) ao traçado em estudo. Apresentação de resultados e discussão, inerente aos métodos aplicados no capítulo 3.

Sétimo CAPÍTULO, refere-se à apresentação de conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ESTRADAS DE BAIXO TRÁFEGO

2.1. Aspectos Gerais

As estradas de baixo volume de tráfego (EBVT) são definidas como as estradas nas quais circulam menos de cerca de 300 veículos por dia e cerca de um número acumulado eixos padrão de 1 milhão ao longo da sua vida útil. (MWTC, 2016a)

Segundo (MWTC, 2016a), além do volume de tráfego e das características de carga do tráfego há uma série de outras características específicas de EBVT que afetam o modo de comportamento e que precisam ser plenamente apreciadas, tais como:

Elas são construídas principalmente por materiais que ocorrem naturalmente, muitas vezes "não-padronizados", sensíveis à humidade;

A degradação do pavimento é provocada principalmente por fatores ambientais, particularmente a humidade, sendo as cargas do tráfego um fator com influência relativamente menor, e enquanto a drenagem assume grande importância;

As características do traçado, vertical ou horizontal, podem não ser totalmente "projetadas/dimensionadas", especialmente para níveis de tráfego muito baixos, "com a maioria das seções seguindo o alinhamento existente para o qual deve haver uma atenção especial à segurança rodoviária;

A abordagem geral do dimensionamento de pavimentos de EBVT difere em vários aspectos dos de estradas de maior volume de tráfego (EMVT). Por exemplo, os projetos de pavimentos convencionais (ou com volumes de tráfego consideráveis) geralmente são direcionados para níveis de serviço relativamente altos, exigindo várias camadas de materiais selecionados. Contudo, há reduções significativas no custo. O pavimento para EBVT, pode ser conseguido reduzindo o número de camadas de pavimento e / ou espessuras de camada, usando materiais locais de forma mais extensa, bem como a menor custo, e opções de revestimento e técnicas de construção mais apropriadas. (MRB, 2013c)

Uma apreciação holística dos atributos que caracterizam as EBVT permite que os engenheiros desenvolvam projetos mais apropriados, em conformidade com as abordagens mais usadas na concepção deste tipo de estruturas de pavimento, com ênfase nos aspectos geotécnicos e a sua otimização durante a fase de construção. Esta abordagem permitirá ao engenheiro conceber uma estrada a preços acessíveis que atenda ao nível de

serviço esperado durante o ciclo de vida, com base em uma compreensão completa do ambiente local e suas exigências.

As características únicas das EBVT, conforme descrito acima, desafiam, na prática, os engenheiros em vários aspectos concretamente, quanto aos materiais, ao projeto de pavimentos, ao projeto geométrico, drenagem, segurança rodoviária e manutenção. Neste capítulo serão abordados aspectos como: a classificação de EBVT; o ambiente rodoviário; a estrutura dos pavimentos; os materiais; a drenagem e aspectos ligados a manutenção de EVBT.

2.2. Classificação de EBVT

Não existe uma classificação universal de estradas de baixo volume de tráfego, desenvolvendo os países, de forma isolada, em associação, ou adotando critérios de classificação que melhor satisfaz as suas necessidades, (A. Fernandes, 2016).

A Classificação adequada das EBVT, constitui um passo primário para selecionar as opções de pavimento baseadas em recursos locais. Em muitos países, a classificação das estradas rurais baseia-se em critérios administrativos ou políticos e não nas características do tráfego que a circula. No entanto, do ponto de vista técnico, de desempenho, as EBVT devem ser projetadas para a tarefa que elas devem realizar, nomeadamente a circulação de veículos, seu volume e número de usuários não motorizados. No entanto também é necessária uma classificação administrativa para permitir a atribuição de responsabilidades, recursos e gestão, mas essa classificação não deve ser a base do projeto de engenharia.(Cook, Rolt, & Petts, 2013).

Em países desenvolvidos como os EUA, estradas de baixo volume são definidas como estradas onde circulam, em média, 400 veículos por dia. Nos países africanos, são definidas como estradas onde circulam, em média, aproximadamente 300 veículos por dia, cujo número equivalente de eixos padrão é cerca de 1 milhão.

De modo a evidenciar a falta de consenso generalizado sobre quais as vias a considerar como EBVT, no parágrafo seguinte, na Tabela 1 apresenta-se a classificação adotada em diversos países e por vários organismos. As estradas podem ser classificadas como sendo de maior volume de tráfego e de baixo volume de tráfego, não existindo um critério único para aquelas classificações.

Tabela 1- Classificação de EBVT adaptado de era, 2013

Referências	País	Classe	TMDA	Tipo de Superfície	Função
SATCC,2003	SADC	A	>2000	Pavimentadas	Estrutural
		B	500 - 2000	Pavimentadas	Primárias
		C	200 - 500	Pav/não Pav.	Secundárias
		D	50 - 200	Não Pavimentadas	Terciárias
		E	<50	Não Pavimentadas	
AASHTO,1993	EUA	I	<50	Não Pavimentadas	
		II	50 - 400	Pavimentadas	

Segundo (MRB, 2013a) , É evidentemente reconhecido que o desempenho de EBVT, ao longo da sua vida útil, é influenciado em grande medida pelos impactos rodoviários, contrariamente as estradas de maior volume de tráfego (EMVT). A Figura1 ilustra este aspecto de forma esquemática, indicando o peso relativo do impacto do tráfego, em oposição com outros fatores do ambiente rodoviário, sobre o desempenho do pavimento em função do nível de tráfego solicitante. Em termos gerais, a interseção das duas tendências define um limite, abaixo do qual pode ser considerado como um ambiente rodoviário onde o tráfego deixa de ser o fator dominante na degradação do pavimento. Na maioria das situações considera-se apropriado um limite superior de 150 a 300 veículos motorizados por dia. Em EBVT solicitado por veículos comerciais, a abordagem tráfego de até 1 milhão de eixos padrões equivalentes (ESAL) durante a vida útil do pavimento rodoviário. Esta recomendação deve ser avaliada e adaptada conforme as especificações de cada região.

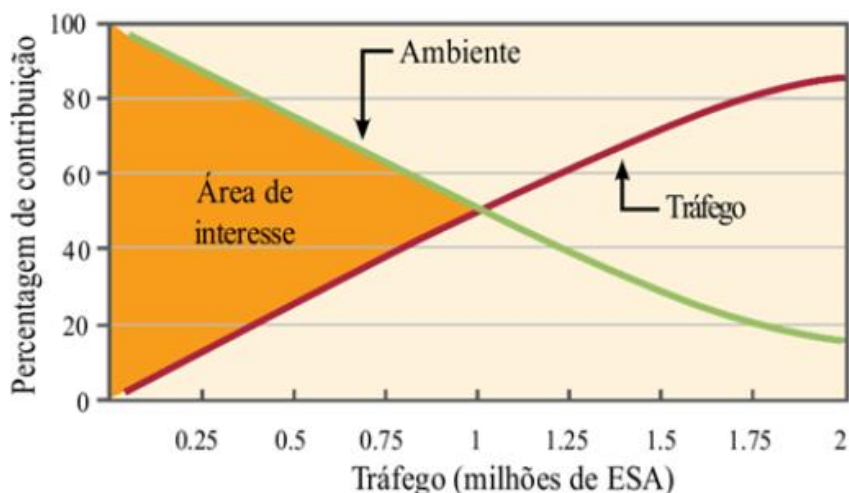


Figura 1 - Impactos relativos de tráfego e outros fatores de ambiente rodoviário na degradação de EBVT (Adaptado MRB,2013b)

2.3. Ambiente Rodoviário em EBVT

O termo "ambiente rodoviário" é abrangente e inclui a interação entre os diferentes fatores ambientais e a estrutura rodoviária. Alguns desses fatores são incontrolláveis, como os que são atribuídos ao ambiente natural, incluindo a influência interativa do clima (por exemplo, vento e precipitação), geologia, hidrologia e drenagem, terreno e gradiente térmico. Em conjunto, estes fatores influenciarão o desempenho da estrada, pelo que a abordagem de projeto precisa reconhecer tal influência ao fornecer opções que minimizem os efeitos negativos. Outros fatores, como o processo de construção e manutenção, as exigências de segurança e ambientais e a extensão e o tipo de tráfego, são amplamente controláveis e podem ser mais facilmente incorporados na abordagem de projeto,(MWTC, 2016a).

Diversa bibliografia (Brito, 2011; Jorge,2014) indica que os mecanismos de deterioração de estradas de baixo volume de tráfego (EBVT), são significativamente diferentes dos de estradas de maior volume de tráfego (EMVT). Uma das implicações disso é que as opções de dimensionamento do pavimento devem ser plenamente preceptivas a uma série de fatores que podem ser designados coletivamente como o “ambiente rodoviário”. Esta abordagem tem em consideração a realidade da do contexto ambiental, variável, da estrada, (ERA, 2011).

Os fatores típicos do meio rodoviário que afetam o processo de concepção de EBVT são apresentados na Figura 2, relevando-se os seguintes: materiais e suas propriedades; tráfego; clima, fundação e manutenção.

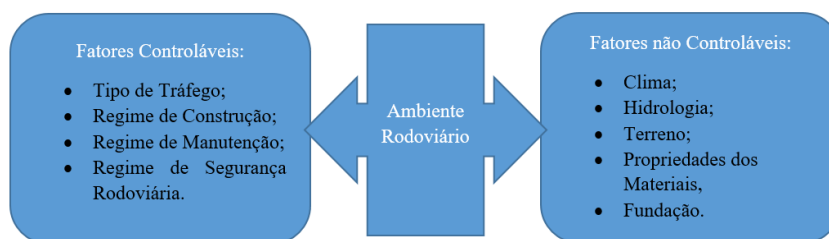


Figura 2- Fatores de ambiente rodoviário (adaptado de Jorge, 2014)

Tabela 2- Fatores de ambiente rodoviário que influenciam o comportamento das de EBVT (Adaptado de ERA, 2011^a)

Fator	Descrição
Materiais de construção	A natureza, e a localização dos materiais de construção são aspetos fundamentais da avaliação do meio rodoviário.
Clima	O clima predominante influenciará o movimento da água e impactará sobre a estrada em termos de erosão direta através do escoamento e influenciará o regime das águas subterrâneas. Cada vez mais, uma avaliação dos impactos das mudanças climáticas é considerada vital. A combinação entre temperatura e a evaporação, traduz-se no índice climático (N)*, parâmetro usado em vários métodos de dimensionamento de pavimentos usados na África Austral (SADC). Se o valor de $N < 4$ (zona climática húmida) e $N > 4$ (zona climática moderado a seca).
Hidrologia superficial e subterrânea	Muitas vezes, é a interação da água, ou mais especificamente o seu movimento, dentro e adjacente à estrutura rodoviária que tem um impacto geral sobre o desempenho rodoviário
Terreno	O terreno reflete a história geológica e geomorfológica, além da sua influência sobre a geometria da estrada e dos requisitos de terraplanagem, as suas características influenciam a disponibilidade de materiais e outros recursos.

Tabela 3- Fatores de ambiente rodoviário que influenciam o comportamento das de EBVT (Adaptado de ERA,2011^a) (continuação)

Fundação	A fundação é essencialmente a camada de suporte para o pavimento e a avaliação de sua condição é fundamental para o projeto da estrada.
Tráfego	Embora pesquisas recentes indiquem que a influência relativa do tráfego em EBVT é menor que a de outros parâmetros do meio rodoviário, ainda é necessário considerar a influência do tráfego e, em particular, o risco de eixo Sobrecarga.
Regime de Construção	O regime de construção governa se o projeto rodoviário é ou não aplicado de forma adequada. Os principais elementos incluem: Uso apropriado da planta Seleção e colocação de materiais Garantia da Qualidade Conformidade com as especificações Supervisão técnica
Regime de Manutenção	Em todas as estradas é necessário garantir uma manutenção regular para garantir que a sua função básica seja mantida ao longo da vida útil.
* $N=12Ej/Pa$ onde: E,-é a evaporação do mês mais quente e Pa-é a precipitação anual	

2.4. Estruturas de pavimento em EBVT

O Pavimento rodoviário, em geral, consiste numa estrutura estratificada construída sobre a superfície obtida pelos trabalhos de terraplanagem, cuja função principal é de assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação de veículos rodoviários com comodidade e segurança durante um período de vida, sujeito à acção do tráfego e das ações climáticas, (Minhoto, 2016).

A estrutura de uma estrada pavimentada consiste tipicamente em uma ou mais camadas de material com diferentes características de resistência, cada camada com o objetivo de distribuir a carga que recebe no seu topo sobre uma área mais ampla na parte inferior. As camadas na parte superior da estrutura são submetidas a níveis de tensões mais altos do que aquelas mais baixas e, portanto, precisam ser construídos a partir de material mais forte. O revestimento pode ser estrutural ou não estrutural em termos de contribuição para comportamento geral do pavimento rodoviário, (ERA, 2013a).

Para as estradas de baixo volume de tráfego vários autores sugerem a utilização de um pavimento constituído por três camadas. Sendo assim, acima da fundação podemos encontrar a camada de sub-base, seguida da camada de base e por fim a camada de desgaste., (A. Fernandes, 2016).

Na Figura 3 apresenta-se um esquema típico das estradas de baixo tráfego

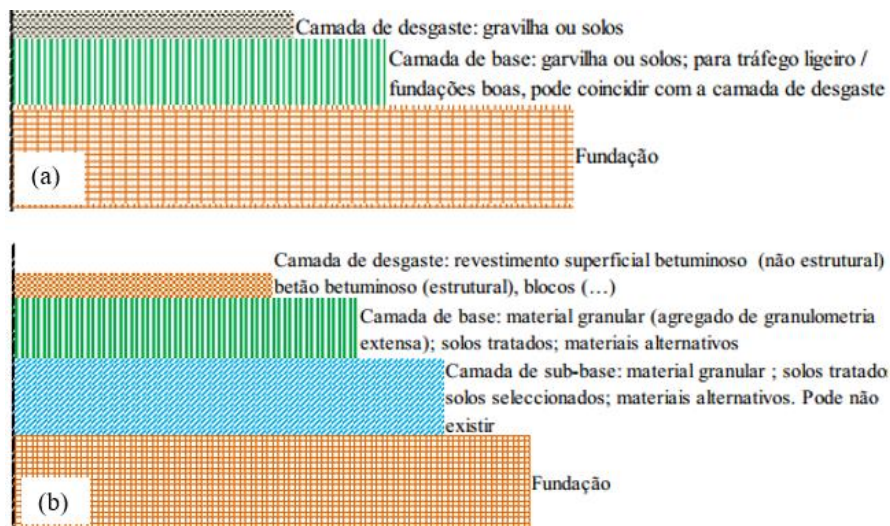


Figura 3- (a)-Estrutura de estradas não revestidas; (b) - Estrutura de estradas revestidas (adaptado de Jorge,2014)

Por causa das diferentes funções da estrutura do pavimento e revestimento, estes componentes básicos de uma estrada são frequentemente independentes uns dos outros, sendo possível um grande número de combinações. No entanto, em termos de conceção, alguns revestimentos, como por exemplo, tratamentos superficiais betuminosos, não contribuem para a resistência estrutural global do pavimento, enquanto outros, como por exemplo, macadame por penetração, o fazem. No caso de pavimentos não revestidos, o solo natural ou cascalho é o principal componente estrutural, (Jorge, 2014).

As principais funções das camadas do pavimento são apresentadas na tabela 4

Tabela 4- Características de estruturas de EBVT

Componentes	Funções
Revestimento	Fornecer uma superfície de circulação segura, economia, duradoura e adequada às diversas condições atmosféricas;
	Reduzir a infiltração de água no pavimento
Base	Fornecer a maior parte da capacidade estrutural, em termos de degradação de tensões através da resistência ao corte e coesão;
	Reduz a variação de tensões ao longo de tempo por baixa suscetibilidade à humidade;
	Reduz a entrada de água no pavimento.
Sub-Base	Fornecer uma plataforma estável para a construção de base e revestimento e auxilia no desempenho da estrutura de pavimento.
Fundação	Constitui um suporte para as camadas de pavimento

2.4.1. Tipos de Pavimentos em EBVT

Segundo o manual da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2003), no seu quarto capítulo, que versa sobre projeto de estradas

de baixo volume de tráfego, considera três categorias de estruturas de pavimentos de baixo volume de tráfego, nomeadamente:

- Pavimentos Flexíveis;
- Pavimentos Rígidos e
- Pavimentos não Revestidos.

Geralmente ao discutir sobre pavimentos rodoviários em EBVT, é comum distinguir entre pavimentos flexíveis e rígidos, sendo que os pavimentos de cascalho e betuminosos são comumente referidas como "flexíveis", enquanto os pavimentos de betão são referidos como "rígidos", (Asare, 2013).

Pavimentos Flexíveis - os pavimentos flexíveis têm uma constituição bastante diversa, que depende da intensidade do tráfego, da capacidade de suporte do solo de fundação e das características dos materiais disponíveis. A evolução apresentada por um pavimento flexível, ao longo da sua vida traduz-se muitas vezes nas degradações que reduzem a qualidade do mesmo, (Jorge, 2014).

Pavimento rígido – pavimento cuja camada de ligada é constituída por um betão de cimento de elevada resistência. As camadas granulares são não tratadas, (Minhoto, 2016).

Pavimento não revestido - Um pavimento não revestido é caracterizada pela sua superfície permeável, pela suscetibilidade de arrastamento de materiais em períodos de elevada precipitação, pela maior dificuldade de escoamento de águas superficiais e pela utilização de maiores inclinações transversais. Portanto, na conceção de uma estrada é necessário atender aos aspetos relacionados com a sua geometria, analisando as condições locais, por forma a adotar o melhor traçado possível, (ERA, 2013a).

De acordo com os aspetos referidos, o traçado da estrada terá um perfil longitudinal o mais adaptado possível ao relevo da região, mas sem utilizar elevadas pendentes longitudinais, assegurando boas condições de visibilidade, enquadramento no meio ambiente, sistema de drenagem adequado e tendo sempre especial atenção aos custos de construção e manutenção. No que concerne ao cascalho, este não deve ser colocado quando a estrada tem inclinação longitudinal superior a 6% em zonas onde há abundante precipitação, pois a água da chuva poderá causar a erosão da superfície da estrada, (I. Santos, 2013).

No contexto deste trabalho abordar-se-iam pavimentos flexíveis e pavimentos não revestidos conforme a categorização da AASHTO, pois representam o tipo de pavimento dominante para EBVT.

2.4.2. Camadas Superficiais de Pavimentos de EBVT

A superfície de qualquer estrada tem um papel fundamental no seu desempenho a longo prazo. Evita a perda de cascalho, elimina a poeira, melhora a resistência ao deslizamento e reduz a entrada de água no pavimento. O último atributo é especialmente importante para EBVT onde os materiais sensíveis à humidade são frequentemente utilizados, (MWTC, 2016b).

O manual de estradas de baixo volume de tráfego do Sudão de Sul, fornece uma visão geral dos vários tipos de pavimentos e superfícies disponíveis e apropriadas para uso EBVT em relação a uma variedade de fatores locais (MRB, 2013c).

Nesta seção é fornecida informação sobre os constituintes e as características de desempenho dos revestimentos, os fatores que afetam sua escolha e a abordagem geral do seu projeto.

2.4.2.1. Camada Básica (não-betuminosa)

Camada superficial em solo ou material granular

O revestimento com solo é uma superfície natural obtida pela utilização de solo compactado para formar uma área de circulação para o tráfego, como mostra a Figura 4. Nestes casos, é fundamental construir pavimentos com cerca de 3 a 6% de pendente transversal e um sistema de drenagem eficaz. Considera-se geralmente que solos com um CBR mínimo de 15 % garantem uma superfície que permite a circulação de tráfego leve durante um ano. Nos troços de estrada com inclinações acentuadas, ou pavimentos construídos com solos fracos ou problemáticos, podem melhorar-se os solos *in situ*, (MRB, 2013c).



Figura 4- Exemplo de pavimento com revestimento em solo (Adaptado ERA,2011b)

Camada Superficial em Cascalho Natural

O pavimento em cascalho é uma estrutura constituída por uma ou mais camadas de cascalho natural colocado diretamente sobre a fundação existente, compactada e moldada com uma pendente transversal adequada (tipicamente de 3 a 6%). As camadas podem ser estabilizadas ou misturadas com outros materiais para melhorar as propriedades mecanicamente, como se vê na Figura 5, (MRB, 2013c).



Figura 5- Exemplo de pavimento com revestimento de cascalho (Adaptado ERA,2011b)

2.4.2.2. Camadas Betuminosas

O termo "superfícies betuminosas" aplica-se a uma grande variedade de diferentes tipos de superfícies rodoviárias, que geralmente são constituídas por uma mistura de proporções variadas de areia, agregado, ar e betume. Essas superfícies podem ser produzidas em uma variedade de formas, dependendo dos requisitos funcionais e de manutenção específicas - simples / múltiplas, finas / grossas, flexíveis / rígidas, colocadas em máquina / planta processadas, etc. Alguns tipos, como por exemplo: tratamentos de superfície em betão asfáltico fino (<30 mm), não adiciona nenhuma resistência estrutural ao pavimento, enquanto outros, por exemplo, betão asfalto grosso (> 30 mm) fornece um componente estrutural para a estrutura do pavimento. Em última análise, o tipo de revestimento escolhido deve ser cuidadosamente combinado com a especificações circunstâncias,(MWTC, 2016b).

Os principais tipos de revestimentos betuminosos delgados normalmente utilizados em EBVT e que apresentam um custo relativamente baixo são apresentados em forma de síntese e com as principais características (MWTC, 2016b).

Revestimentos Superficiais Simples (*Single Surface Dressing*):

Este revestimento não-estrutural (simples ou duplo) consiste numa pulverização de ligante betuminoso, seguida da aplicação de uma camada de agregado (gravilha). O aglutinante confere impermeabilidade ao pavimento impedindo a entrada de água para a estrutura do pavimento a partir da superfície, enquanto a gravilha protege o filme de ligante dos danos causados pelos pneus dos veículos.

Cape Seal:

Consiste em uma única camada de 13mm ou 19mm de dimensão nominal, penetrado com um aglutinante betuminoso e coberta com uma lama asfáltica. Se for usado agregado de 19 mm, a pasta é aplicada em duas camadas. A função da lama asfáltica fornecer um enchimento de vazio denso para aumentar a estabilidade da camada de agregado grosso de granulometria uniforme. O agregado grosso é colocado de forma a fornecer a textura necessária para garantir resistência à derrapagem.

Otta Seal;

Este revestimento betuminoso obtém-se pela pulverização, “*in situ*”, com ligante betuminoso de baixa viscosidade de uma camada de agregado de granulometria contínua de cascalho natural ou agregado britado, com ou sem posterior aplicação de areia (ensaibramento). Este tipo de revestimento distingue-se dos revestimentos superficiais que utilizam agregado britado de dimensão uniforme e betume relativamente duro (alta viscosidade).

Misturas betuminosas à frio (*Cold Mix Asphalt*);

Trata-se de uma mistura aplicada à temperatura ambiente, constituída por agregado grosso, similar ao do *Otta Seal*, mas que utiliza emulsão betuminosa em vez de betume quente como aglutinante. É particularmente adequado para aplicações em locais com escassos recursos, e pode ser construído inteiramente com ferramentas manuais, equipamentos simples e um rolo de compactação. O comportamento depende mais da ligação conferida pelo ligante e do imbricamento entre partículas que da resistência intrínseca dos agregados. Devido à sua natureza porosa, a durabilidade do revestimento pode ser uma preocupação.

Lama asfáltica (*Slurry seal*);

A lama asfáltica consiste numa mistura homogénea de materiais pré-misturados que compreendem agregados finos, emulsão betuminosa (aniónica ou catiónica) ou uma emulsão modificada, água e filer (cal ou cimento). A produção pode ser realizada em centrais de mistura ou máquinas mais sofisticadas concebidas para o efeito, que misturam e espalham a mistura. O revestimento é utilizado para tratar vários defeitos sobre uma superfície de pavimento existente, tal como reduzir a perda de gravilha e restabelecer a textura da superfície.

Sand Seal

Este revestimento é constituído por ligante aplicado por pulverização sobre a superfície existente, seguido da aplicação de areia limpa grossa, ou pó de pedra britado. Este revestimento é utilizado em EBVT, especialmente em regiões mais secas, mas também pode ser utilizada para revestimentos de manutenção. Para a construção nova são geralmente utilizadas duas camadas, uma vez que camadas individuais tendem a ser pouco duráveis. Existe um período prolongado de cura, tipicamente entre 8 e 12 semanas,

entre a primeira aplicação do revestimento e a segunda, de modo a assegurar a completa evaporação dos materiais voláteis.

Uma ligação efetiva entre superfície tratada e a superfície da base da estrada é essencial para um bom desempenho. Isto pode ser conseguido através da utilização de um grau apropriado de betume, antes do início da construção do tratamento superficial. Alguns tipos típicos de tratamento de superfície betuminosa são mostrados na Figura 6. Nos casos em que os materiais têm um uso pouco divulgado ou nulo em Portugal, utilizou-se a designação em inglês para facilitar a consulta de bibliografia internacional.

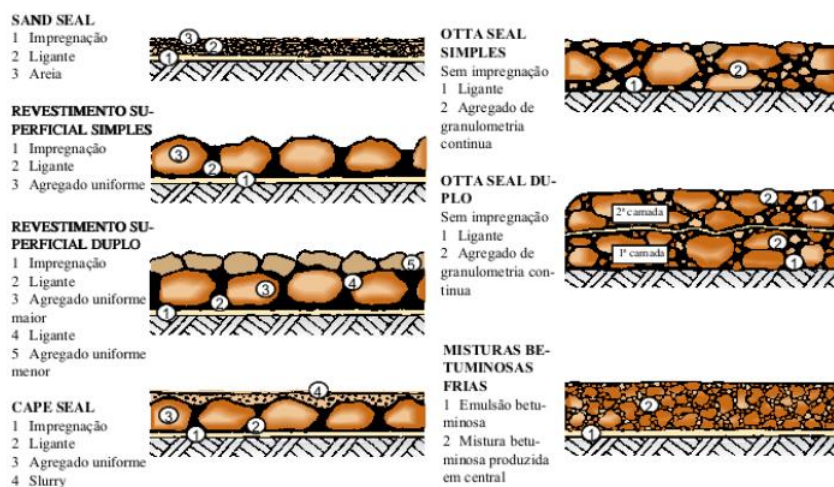


Figura 6- Exemplo de revestimentos betuminosos (Extraído de Jorge, 2014)

2.5. Materiais dos Pavimentos das EBVT

O uso máximo de materiais não processados de ocorrência natural é um pilar central da filosofia de projeto EBVT. As especificações atuais tendem a excluir o uso de muitos materiais naturais, não processados (solos naturais, misturas de cascalho e cascalho), em camadas de pavimento a favor de rochas britadas mais caras, porque muitas vezes não cumprem os requisitos tradicionais orientados para EMVT. (ERA, 2011).

Os solos e os cascalhos que ocorrem naturalmente são uma fonte importante de material para uso na construção de EBVT, Isso porque esses materiais são relativamente baratos para explorar em comparação com materiais processados como a rocha britada. Além disso, em muitos países em desenvolvimento, esses materiais são muitas vezes a única fonte de material dentro de uma razoável distância do traçado, (SATCC, 2003).

A natureza e a localização dos materiais de construção são aspectos fundamentais para EBVT, visto que o uso de material local é uma prioridade, o que exige do projetista um conhecimento de suas propriedades e comportamento por um lado e o conhecimento sobre a carga de tráfego, e suas interações por outro lado.

A questão principal deve ser; "Quais as opções de dimensionamento compatíveis com os materiais disponíveis?", Em vez de procurar material para atender às especificações padrão, como é o caso das estradas de maior volume de tráfego. As especificações precisam ser apropriadas para o ambiente local juntamente com a qualidade da construção que atenda a essas especificações,(TRL, 2016).

2.5.1. Seleção e Uso de Materiais Local

A seleção de materiais para um projeto de pavimento rodoviário baseia-se em uma combinação de disponibilidade de materiais adequados, considerações ambientais, método de construção, economia e experiências anteriores. Esses fatores precisam ser avaliados durante o projeto tendo em consideração a vida útil da estrada, a fim de selecionar os materiais que melhor atendam às condições, (SATCC, 2003).

As especificações para EBVT não precisam ser tão rigorosas como as de estradas de maior volume, o que significa que materiais locais à uma distância razoável do traçado e de menores custos podem ser usados em detrimento de materiais padronizados. O desafio é reconhecer quais materiais são apropriados para o crescimento do tráfego projetado e para as condições ambientais,(TRL, 2016).

Segundo (MTPW, 2013b), Para otimizar o uso de materiais naturais, é necessária que seja dada uma atenção à compatibilidade entre a estrutura do pavimento, os materiais utilizados, o tipo de revestimento, os processos de construção e, acima de tudo, o controle da humidade através da efetiva drenagem. No entanto, esse uso de materiais naturais exige uma atenção especial a três fatores como:

- Princípios básicos de engenharia - deve haver uma avaliação cuidadosa do ambiente em serviço e uma garantia razoável de que será fornecida drenagem interna e externa adequada;

- Densidade compactada - deve haver um controle de qualidade de construção muito bom;
- Probabilidade de falha - deve haver uma aceitação realista do maior risco de menor desempenho.

2.5.2. Especificações de Materiais

Nesta secção apresenta-se os específicos dos materiais usados para as camadas de base; camada de sub-base e camada de desgaste, conforme o manual de “*Low Volume Rural Road Standards and Specifications, Part II*”, (SEACAP3, 2008).

Camada de Base

Geralmente, é necessário um CBR de 80% para o material da base do pavimento, mas se o material desta qualidade não estiver disponível, então CBR de 50% pode ser usado para um tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDA_P) menor que 150 e um número equivalente de eixos padrão (mesa) de 10.000. Um CBR inferior a 50% não é aconselhável na base rodoviária de pavimento revestido porque haveria um risco de ruína por corte da base da estrada.

Um material com CBR de 25% e que satisfaça os outros requisitos de uma superfície de cascalho pode ser usado desde que, essa camada seja de brita graduada com um tamanho de partícula máximo nominal superior a 25mm e menor que 38mm seja colocada e compactada. Para obter a resistência e as características desejadas dos materiais naturais disponíveis, espera-se que a qualidade dos cascalhos naturais possa ser melhorada através da triagem e remistura dos componentes do material e ou a adição de agregados britados.

Sub-base

O requisito mínimo de resistência da sub-base para EBVT é uma resistência embebida de CBR de 25%.

Camada de Desgaste

De forma semelhante à sub-base, a camada de desgaste fornece uma plataforma de construção sobre solos mais fracos e é uma camada essencial para proteger a fundação de tensões excessivas. É necessário um CBR de 10% para a camada de desgaste, exceto onde

os solos de fundação são muito fracos. É necessário um cuidado especial na colocação e compactação de materiais em fundações muito fracas, de CBR igual a 2% ou 3%.

2.5.3. Comportamento Mecânico dos Materiais

Estrutura de pavimento de uma EBVT pode ser constituída apenas por solo local ou, adicionalmente, ser formada por camadas de materiais granulares não ligados, construídas sobre o solo existente. Além disso, pode ser utilizado um revestimento betuminoso, ou de outro tipo, para aumentar a capacidade de carga e/ou a qualidade superficial do pavimento. Pela ação do tráfego, os materiais granulares não ligados no pavimento ficam sujeitos a tensões de compressão e de corte. Os materiais ligados, tais como os betuminosos, quando são colocados em camadas de espessura considerável podem ficar sujeitos também a tensões de tração por flexão,(Brito, 2011).

Segundo o mesmo autor, os materiais granulares não ligados e os solos apresentam dois modos de deformação principais quando sujeitos a cargas cíclicas: deformação elástica e deformação permanente (plástica). A deformação permanente é uma consequência da pequena contribuição causada por cada ciclo de passagem de uma roda. Apesar de num ciclo de carregamento a deformação elástica (recuperável) ser quase sempre maior que a deformação permanente (não recuperável), depois de muitos ciclos a componente plástica pode tornar-se importante e pode conduzir a uma eventual ruína do pavimento devido à deformação excessiva. O método de dimensionamento deve permitir avaliar se o tráfego previsto na vida do pavimento irá causar uma acumulação total de deformação inferior ao limite máximo de deformação estabelecido, de modo a garantir um nível de serviço adequado ao longo da vida do pavimento. Não sendo possível garantir este nível de desempenho, será necessário realizar intervenções de manutenção para garantir um determinado estado do pavimento.

A deformação elástica sofrida pelo material granular devido a uma passagem da roda não é prejudicial à estrutura do pavimento, embora possa interferir nos custos operacionais, causando maior consumo de combustível devido à energia dissipada na deflexão da camada [Douglas & Valsangkar 1992]. A deformação plástica, no entanto, pode levar à falha da estrutura se continuar acumulando com cada ciclo de carregamento. É o raciocínio de um guia de dimensionamento de pavimento para explicar isso e orientar os

projetistas para uma solução que o impeça de acontecer. O método de dimensionamento deve ser capaz de determinar se o tráfego projetado causará uma acumulação total de deformação plástica que se enquadra no nível operacional máximo, garantindo a manutenção da estrada durante toda a sua vida ou, se for necessário Para estabelecer intervenções de manutenção,(Brito, 2011).

Os agregados pétreos são o principal material estrutural constituinte dos pavimentos de uma EBVT. Em contraste com os pavimentos flexíveis usados em estradas de maior volume de tráfego, nas EBVT são os agregados os responsáveis pela degradação de tensões, como mostra esquematicamente a Figura 7. É, portanto, imprescindível que os agregados sejam corretamente caracterizados para efeitos de utilização. Isto é particularmente importante devido ao frequente emprego de materiais locais, de qualidade inferior, na construção de EBVT, por motivos económicos, (Jorge, 2014).

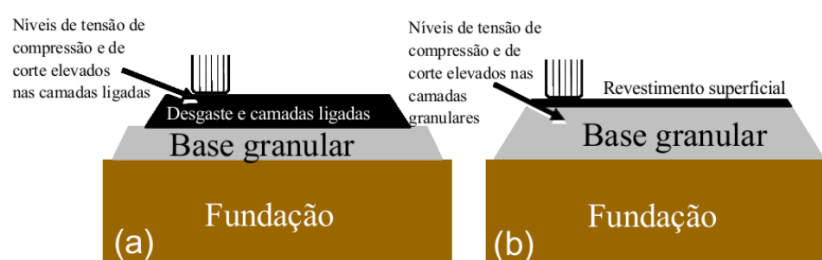


Figura 7- perfil esquemático do pavimento (a) EMVT e (b) EBVT (Extraído de Jorge,2014)

2.6. Drenagem do Pavimento em EBVT

A água tem um papel fundamental quando se discute o desempenho mecânico e a vida útil de qualquer infra-estrutura de tráfego. O fato, conhecido a séculos, é que, enquanto as estruturas rodoviárias e solo de fundação não têm excesso de água a estrada vai funcionar bem. Mas o aumento do teor de água reduz a capacidade de carga de um solo, o que aumentará a taxa de degradação e encurtará a vida útil da estrada. Nesses casos, a estrada terá de ser reabilitada com mais frequência do que uma estrutura de estrada bem drenada, (ERA, 2013a).

Assim, um dos desafios significativos enfrentados pelo projetista é conceber uma estrutura de pavimento em que os efeitos prejudiciais da humidade estejam contidos em limites aceitáveis em relação ao carregamento de tráfego, à natureza dos materiais usados na construção / manutenção e ao grau de risco aceitável. Este desafio é acentuado pelo

fato de que a maioria das estradas de baixo volume são construídas a partir de materiais naturais, muitas vezes não processados, que tendem a ser sensíveis à humidade, isso coloca uma ênfase adicional na drenagem e controle de humidade para alcançar uma vida de pavimento satisfatória.

2.6.1. Drenagem Longitudinal

Os dispositivos de drenagem superficial longitudinal devem ser dimensionados de forma a garantir a sua eficiência hidráulica através da captação e escoamento da água proveniente da via e zonas adjacentes sem a afetar, a facilidade de manutenção e o seu enquadramento estético no meio ambiente. Os dispositivos geralmente utilizados são valas, valetas e canais que poderão ser revestidos ou não revestidos, (I. Santos, 2013).

Em caso de revestimento, poderão ser utilizados revestimentos tais como cobertura vegetal, enrocamento, gabião, ou revestimento rígido como por exemplo o betão. O recurso ao revestimento em betão pode constituir a solução técnica mais eficiente do ponto de vista hidráulica mas é menos utilizada em EBVT, devido aos custos associados, (ERA, 2013a).

2.6.2. Drenagem Transversal

Os dispositivos de drenagem superficial transversal utilizados são as condutas e passagens hidráulicas que permitem recolher as águas provenientes da drenagem longitudinal, conduzindo-as para pontos de descarga final, e estabelecer o escoamento natural dos cursos de água, (I. Santos, 2013).

2.6.3. Classificação da Drenagem em EBVT

Na Tabela 5 apresenta-se a natureza crítica da altura da coroa que se correlaciona bem com a vida útil real dos pavimentos construídos a partir de cascalhos naturais. Um valor mínimo, h , de 0,75 m é recomendado como ilustrado na Figura 8.

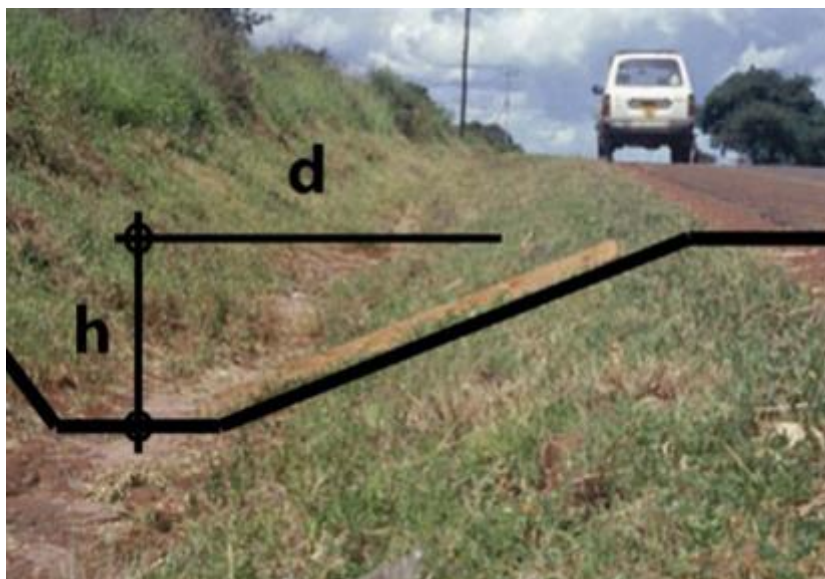


Figura 8- Exemplo de boa drenagem em EBVT (Adaptado MTPW,2013)

Independentemente da região climática, se o local tiver drenagens laterais efetivas e altura da coroa adequada, então a resistência “*in situ*” da fundação fica acima do valor de projeto. Se a drenagem for fraca, a resistência “*in situ*” cairão abaixo do valor de projeto.(ERA, 2013a).

Tabela 5- Classificação da drenagem em EBVT (Adaptado ERA,2013b)

Fator de Drenagem ($D=d.h$)	Classificação
<2.5	Muito pobre
6.6 - 5.0	Pobre
5.1 - 7.5	Moderado
>7.5 ou drenagem livre	Bom

2.7. Manutenção em EBVT

A manutenção é a gama de atividades necessárias para manter uma estrada e estruturas associadas em condições aceitáveis para os usuários da estrada, conforme pretendido quando foi projetado e construído, (MRB, 2013b).

2.7.1. Patologias mais Comuns em EBVT

As estradas não pavimentadas estão mais vulneráveis aos fatores externos como o tráfego e as condições climáticas que as estradas pavimentadas. Esses fatores, juntamente com o tipo de solo selecionado, o sistema de drenagem e a geometria da estrada, poderão causar problemas tanto estruturais como funcionais na superfície da estrada, afetando as condições de circulação. Os problemas estruturais referem-se à incapacidade da estrutura para suportar o tráfego em condições adequadas enquanto os problemas funcionais são essencialmente defeitos superficiais resultantes da má seleção de materiais e de processos construtivos. Esses problemas estão relacionados com deformações, com a diminuição da capacidade de suporte do solo e com a modificação dos perfis longitudinais e transversais. Os tipos de defeitos mais comuns são:(I. Santos, 2013)

Cremalheira

A formação de cremalheiras também consiste num defeito funcional que, à semelhança das rodeiras, se identificam pela formação de ondas na direção transversal, resultantes da passagem de veículos. O baixo índice de plasticidade do material ou até mesmo da falta de compactação, contribuem para a formação de cremalheira.

Covas:

As covas, também designadas por buracos, desenvolvem-se quando há libertação de partículas sólidas do leito, devido à contínua passagem de veículos em locais onde existe acumulação de água na via.

Rodeiras

A rodeira, classificada como um problema funcional, é caracterizada pela formação de depressões longitudinais ao longo da via, resultando na deformação permanente da camada devido a passagens sucessivas das rodas dos veículos. A baixa capacidade de suporte do material que constitui a estrada ou a ineficiência do sistema de drenagem ou a falta de manutenção podem também estar na origem da formação de rodeiras. Perda de agregados.

Perda de Agregados

A perda de agregados consiste na formação de cordões laterais e no centro da via provocada pela ação do tráfego. Esses cordões são compostos por partículas granulares

soltas, que foram criados fora da zona de passagem das rodas dos veículos. Este tipo de defeito funcional ocorre, normalmente, em zonas de solo muito argiloso, com rampas acentuadas, em que foi acrescentado material granular sem compactação adequada, mas, também pode ocorrer em terrenos planos onde há falta de material fino ligante.

2.7.2. Tipos de Manutenção

Para efeitos de gestão de manutenção, a forma mais usual de classificar as atividades de manutenção é em termos de sua frequência, podendo distinguir-se quatro categorias,(Jorge, 2014).

Manutenção Regular (rotina)

A manutenção de rotina, por definição, tem de ser realizada numa base regular: a sua frequência não depende da natureza da estrada ou do volume de tráfego, embora possa ser dependente de condições climáticas e meteorológicas. Por esta razão, este tipo de manutenção é tratado como um item de custo fixo no orçamento de manutenção,

Manutenção Recorrente

Efetua-se em intervalos de tempo durante o ano, com uma frequência que depende do volume de tráfego que utiliza a estrada. A manutenção recorrente é tratada como atividade de custo variável, pois a frequência é dependente das características e do tráfego de cada estrada.

Manutenção Periódica

É geralmente efetuada apenas em intervalos de vários anos. A manutenção periódica é tratada como uma atividade de custo variável e, geralmente, exige equipamentos de maior dimensão e mão-de-obra mais qualificada.

Manutenção Urgente

É necessária para lidar com emergências e problemas que exigem ação imediata quando uma estrada está intransitável. Pode envolver a remoção de detritos e outros obstáculos, a colocação de sinais de alerta e a execução de obras de desvio.

3. DIMENSIONAMENTO DE EBVT

Os pavimentos rodoviários são projetados para limitar as tensões transmitidas no solo de fundação pelo tráfego que circula no pavimento, de modo que a fundação não esteja sujeita a deformações significativas. O pavimento distribui as cargas concentradas das rodas do veículo sobre uma área suficientemente grande ao nível da fundação. Ao mesmo tempo, os materiais do pavimento não se devem degradar de forma acelerada dentro de um período de tempo especificado, (ERA, 2013b).

A capacidade de carga do pavimento é função da espessura e rigidez dos materiais utilizados nas suas camadas e da deformabilidade da fundação. Por conseguinte, um bom conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais que constituem as camadas de pavimento e da fundação é importante para a conceção da estrutura. As condições climáticas, bem como os fatores de drenagem, também afetam criticamente o desempenho da estrutura do pavimento, principalmente se é duma EBVT, e devem ser tomados em consideração no processo de dimensionamento, (Jorge, 2014).

Os principais fatores que devem ser considerados no projeto de um pavimento podem ser resumidos da seguinte forma:

1. As solicitações do tráfego;
2. As características dos solos de fundação e demais materiais disponíveis, que constituirão as camadas;
3. Os métodos de dimensionamento e
4. Os custos das diversas soluções alternativas possíveis. Esse fator não será discutido neste trabalho.

3.1. Tráfego

A agressividade do tráfego que passa numa dada estrada está relacionada com o número e tipo de veículos que a utilizam. Embora possa ser difícil prever com precisão a carga de tráfego num pavimento de baixo volume, uma classificação geral é normalmente possível e adequada, são estradas que têm baixa utilização (um Tráfego Médio Diário Anual - TMDA inferior a 300 veículos por dia), baixas velocidades base (normalmente menos de 80 km/h), e características geométricas correspondentes à baixa velocidade base

considerada e a espessura do pavimento assume um papel preponderante neste tipo de abordagem (MRB, 2013b)

Em estradas pavimentadas, a degradação causada pelo tráfego resulta tanto da amplitude das cargas individuais da roda quanto do número de vezes que essas cargas são aplicadas. É necessário considerar não apenas o número total de veículos que irão circular na estrada, mas também as cargas das rodas (ou, por conveniência, as cargas do eixo) desses veículos. Os fatores de equivalência são usados para converter volumes de tráfego em cargas de eixo padrão cumulativas. Para estradas pavimentadas, as classes de tráfego são definidas por intervalos de número acumulado de eixos padrão equivalentes “Equivalent Standard Axles” (ESAs),(SATCC, 2003).

O processo através do qual o tráfego é avaliado segue as seguintes etapas:

- Período de dimensionamento;
- Volume de Tráfego Inicial (TMDAp);
- Avaliação do Número Acumulado Equivalente de Eixos Padrão por categoria de veículos (ESA);
- Obtenção da Classe de Tráfego para projeto de pavimento

De seguida descreve-se as etapas indicadas no parágrafo anterior.

Período de Dimensionamento (etapa 1)

A determinação do período de dimensionamento apropriado é o primeiro passo para a concepção do pavimento. Diversos fatores podem influenciar essa decisão, incluindo restrições orçamentais. No entanto, o projetista deve seguir certas diretrizes na escolha de um período de dimensionamento adequado, levando em consideração as condições que regem a concepção. Alguns dos pontos a considerar incluem: (ERA, 2013b).

- Importância estratégica da estrada (sua classificação);
- Volume de tráfego;
- Localização e terreno de projeto;
- Constrangimentos financeiros;
- Dificuldade de prever o tráfego;
- Estratégias de manutenção;
- Período previsto para a reabilitação da estrutura de estrada.

Na Tabela 6 apresenta-se o guião para a seleção da vida útil de projeto em função da fiabilidade dos dados do projeto.

Tabela 6- Guia para seleção de vida útil de projeto (Adaptado SATCC,1998)

Fiabilidade de dados do Projeto	Importância/nível de Serviço	
	Baixo	Alto
Baixo	10 anos	10 - 15 anos
Alto	10 - 15 anos	15 - 20 anos

Este período é definido como o intervalo de tempo, em anos, considerado apropriado para o pavimento da estrada desempenhar as suas funções adequadamente antes de atingir um nível de degradação considerado terminal, após o qual será necessário realizar operações de reabilitação ou de reconstrução significativas como mostra a Figura 9, (Jorge, 2014).

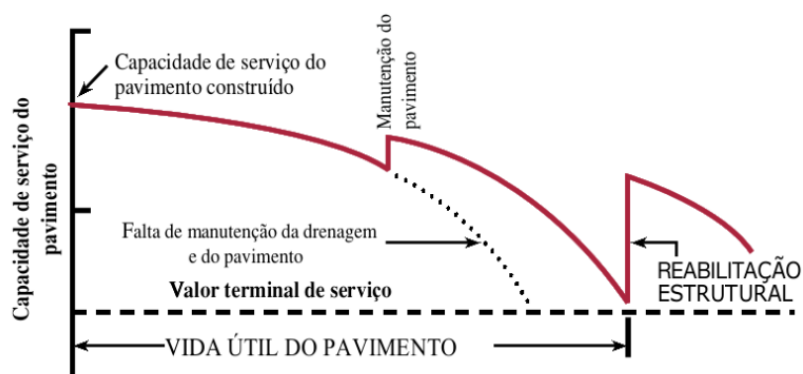


Figura 9- Vida útil da estrutura de pavimento (Adaptado ERA,2013b)

Volume de Tráfego Inicial (etapa 2)

A estimativa do tráfego inicial é determinada com base em contagens de tráfego na estrada para a qual se pretende dimensionar o pavimento ou, caso esta ainda não exista, a partir da dedução do tráfego de estradas existentes na região. Os valores registados servem de base ao cálculo do Tráfego Médio Diário Anual de Pesados (TMDAp), no ano de abertura da estrada, (Jorge, 2014).

Após o estabelecimento do tráfego de base, são necessárias análises adicionais para estabelecer o tráfego de projeto total com base numa previsão do crescimento do tráfego em termos de tráfego normal, desviado e gerado. Tais previsões são muito sensíveis às condições económicas nos países em desenvolvimento. Além disso, para estratégias de

projeto de prazo relativamente curto (tráfego <0,1 milhão de ESA), uma análise de tráfego mais elaborada é menos impactante, pois os fatores ambientais geralmente determinam o desempenho das EBVT, em vez da carga do tráfego, (SATCC, 2003).

Segundo (SATCC, 2003), tráfego de obra também pode ser uma parte significativa do tráfego total numa EBVT (às vezes 20 a 40% do tráfego total) e deve ser levado em conta no dimensionamento do pavimento como mostrado na Figura 10.

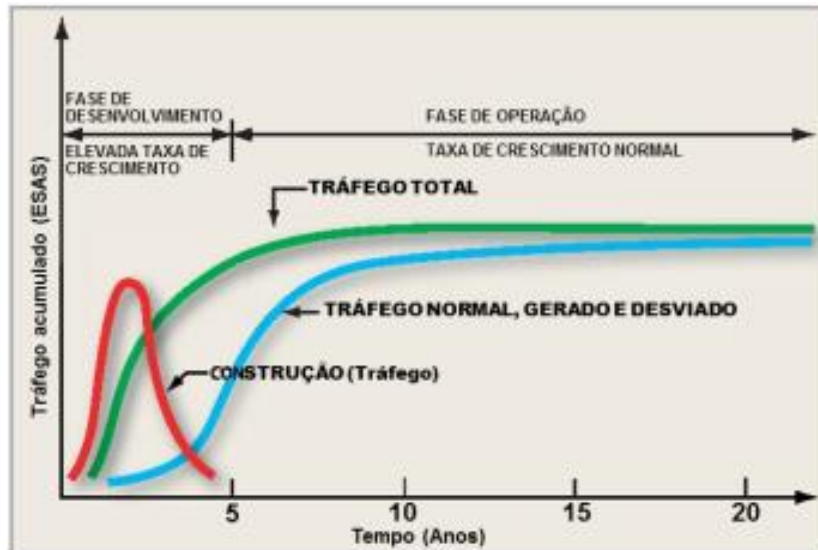


Figura 10- Crescimento de tráfego em EBVT (Adaptado SATCC,2003)

Eixos Padrão Equivalente - (etapa 3)

O dano que os veículos causam numa estrada pavimentada é altamente dependente das cargas do eixo dos veículos. O poder de degradação de uma determinada carga de eixo é geralmente expresso em termos de "eixo padrão" equivalente - um conceito que efetivamente reduz a natureza variada das cargas de tráfego para um único parâmetro em termos de danos estruturais a um pavimento. A expressão que é usada para definir o fator de equivalência de qualquer carga de eixo é:(ERA, 2011).

$$EF = (P/80)^n \text{ (carga em kN)} \quad (1)$$

Onde:

EF- Coeficiente de equivalência de uma carga P em número de eixos padrão;

P- Carga por eixo, em kN (eixo simples);

n- Expoente de dano relativo

Para fins de projeto, o expoente de dano relativo (n), geralmente é suposto estar na faixa de 4 a 4.5 (tipicamente tomado como 4.2. Vale ressaltar, no entanto, que o valor de n é fortemente influenciado pelo tipo de pavimento (granular, cimentado, etc.) e pelo modo ruína (rodeira, fadiga, deformação de fundação, etc.), resistência do fundação e rigidez, (SATCC, 2003).

Número Médio Diário de Eixos Padrão (DESA) - (etapa 4)

A estimativa do número médio diário de eixos padrão (DESA) é obtida a partir dos dados de tráfego obtidos na Etapa 2 e dos EF calculados na Etapa 3 da seguinte forma:

$$DESA = TMDA \cdot EF \quad (2)$$

Estimativa do crescimento do tráfego (etapa 5)

Após o estabelecimento do tráfego no ano de entrada ao serviço, é necessário estabelecer o tráfego total a considerar no dimensionamento com base nas previsões de crescimento do tráfego. Para prever esse crescimento, é necessário avaliar o tráfego nas seguintes categorias, (Jorge, 2014).

- Tráfego normal - Tráfego que iria passar ao longo da estrada existente mesmo sem a melhoria no pavimento da estrada;
- Tráfego desviado - Tráfego que muda de uma outra rota (ou modo de transporte) para a estrada por causa da melhoria do pavimento, mas que ainda viaja entre a mesma origem e destino;
- Tráfego gerado - Tráfego que ocorre em resposta à melhoria no pavimento da estrada.

Eixos Padrão Equivalente para todas classes de veículos (CESA) - (etapa 6)

O número acumulado esperado de eixos padrão na via mais solicitada – CESA (*cumulative equivalent standard axles*) durante a vida útil do pavimento é o valor a utilizar para efeitos de dimensionamento do pavimento. Pode ser obtido a partir da Equação (II), (Jorge, 2014).

$$CESA = 365 \cdot DESA \cdot [(1 + r)^N - 1] / r \quad (3)$$

Onde:

DESA- número médio diário de eixos padrão no ano de abertura ao tráfego, na via de projeto;

r- Taxa de crescimento anual, expressa como uma fração decimal;

N- Período de dimensionamento, em anos

Classe de Tráfego para projeto de pavimento (etapa 7)

Para fins de dimensionamento do pavimento é necessário determinar a classe de tráfego de projeto. As classes de tráfego variam consoante o método de dimensionamento que se utiliza. Para o dimensionamento de pavimentos pelo método de catálogo a classe de tráfego é baseada na Tabela 7

Tabela 7- Classe de tráfego (Adaptado MRB,2013c)

Faixa de Tráfego (ESA em milhões)	LV1	LV2	LV3	LV4	LV5*
	<0.01	0.01 - 0.1	0.1 - 0.3	0.3 - 0.5	0.5 - 1.0
* é a zona de transição de tráfego entre estradas de baixo volume de maior volume					

Na estrada que se espera que circulem mais de 1,0 milhão de eixos padrão durante a vida útil devem ser projetadas como EMVT, (MRB, 2013c).

3.2. Fundação de Pavimentos em EBVT

A fundação é definida como 300 mm do topo de terreno existente ou preparado, no qual a camada de cobertura (conforme necessário) ou a sub-base será colocada,(SEACAP 3, 2008).

Sendo o elemento que serve de apoio à estrutura do pavimento, a definição do tipo de fundação de um pavimento a nível da sua capacidade é um dos principais fatores. As fundações podem ter as mais variadas características e mostram uma grande variedade de

condições de geologia, topografia, tipo de solo, drenagem e clima de cada região. Além disso, a fundação de um pavimento também influencia a sua espessura, (Jorge, 2014).

Em EBVT, a superfície dos terraplenos pode ser, e é frequentemente usada como superfície de rolamento de veículos. Se os solos que ai ocorrem forem bem graduados e com uma plasticidade média, essas estradas podem suportar o tráfego com êxito em tempo seco e por vezes até em tempo chuvoso. Todavia, os solos resistem mal a ação tangencial dos pneus, e com o aumento de teor em água perdem resistência e são suscetíveis a erosão. A ação combinada de clima e do tráfego, potencia a ocorrência de deformações e outras degradações a curto período de tempo, o que afeta em grandes proporções as condições de circulação e obrigam a ações de manutenção mais ou menos frequente,(Branco, Ferreira, & Santos, 2011).

A capacidade de suporte da fundação em EBVT é comumente avaliada em termos de “*Califórnia Bearing Ratio*” (CBR), e isso é dependente do tipo de solo, sua densidade e seu teor de humidade. (ERA, 2011).

Classe da Fundação

As fundações são classificadas com base nos ensaios de CBR em amostras embebidas por quatro dias, para 95% de compactação usando a norma (AASHTO T180). Nesta base, o CBR embebido é usado para atribuir uma classe de fundação de projeto.

Tabela 8- Classe de Fundação (Adaptado ERA,2011b)

Classe de Fundação					
CBR (%)	S2	S3	S4	S5	S6
	3 a 4	5 a 8	9 a 14	15 a 29	>30

Complementarmente ao que se indicou na Tabela8, deve seguir-se as seguintes indicações: (ERA, 2011).

Não é considerada uma classe de fundação para valores de CBR inferiores a 3% porque, tanto do ponto de vista técnico como económico, seria inapropriado colocar um pavimento sobre solos com uma capacidade de carga tão baixa. Além disso, a avaliação da capacidade de carga desses solos moles é geralmente mais incerta. Para esses materiais é necessário um tratamento especial, por exemplo, através de estabilização do solo;

O uso de solos da classe S2 como apoio direto ao pavimento deve ser evitado. Sempre que possível, tais solos relativamente fracos devem ser escavados e substituídos, ou cobertos com uma camada melhorada;

A classe S6 abrange todos os materiais de fundação com um CBR > 30% e que cumpram os requisitos de plasticidade para sub-base natural. Em tais casos, a sub-base não é necessária.

3.3. Métodos de Dimensionamento de EBVT

As estradas de baixo volume de tráfego, envolvem tipicamente dois tipos de pavimentos: pavimentos revestidos (camadas betuminosas) e pavimentos não revestidos (camadas de terra ou cascalho). Nos dois casos o processo de dimensionamento deve abordar a possibilidade de resolver casos de pavimentos novos ou pavimentos existentes, e pode basear-se no uso de diferentes parâmetros e metodologias, (MWTC, 2016b).

Existem vários métodos que foram desenvolvidos para projetos de estradas de baixo volume de tráfego, que vão desde os mais simples aos mais complexos e com base em abordagem empírica e mecanicistas/analíticos, (MWTC, 2016b).

Os métodos de dimensionamento de EBVT, podem ser classificados em duas categorias:

- Métodos empíricos
- Métodos empíricos-analíticos

Os métodos de dimensionamento puramente empíricos são limitados na sua aplicação a condições semelhantes àquelas para as quais foram desenvolvidas. Esses métodos desenvolvem gráficos de projeto ou catálogo, que são os mais fáceis de usar porque todos os trabalhos práticos e teóricos foram realizados e diferentes estruturas são apresentadas em forma de gráfico ou catálogos para várias combinações de tráfego, efeitos ambientais, materiais de pavimento e opções de projeto, (MWTC, 2016b).

No que diz respeito aos métodos mecanicistas, estes são baseados nas propriedades mecânicas dos materiais, as quais são obtidas para condições de solicitação mais representativas da ação do tráfego e do meio ambiente. A vida útil pode ser estimada considerando-se valores críticos de tensão e de extensão em pontos específicos da estrutura do pavimento, (SATCC, 2003).

Os métodos de dimensionamento aplicados neste trabalho, são baseados em abordagens empíricas, adequados para o uso nos países de África Austral (Comunidade para o Desenvolvimento da África Austral-SADC), como se apresenta na Tabela 9:

Tabela 9- Métodos de conceção de pavimentos aplicados na África Austral-SADC (adaptado de SATCC,2003)

Método Empírico-Mecanicista*	Métodos Empíricos
Método S-N (AASHTO, 1993)	TRL/SADC pavement Design Guide (Gourley et al, 2009)
TRH4 (CSIR,1981)	SATCC pavement Design Guide (SATCC, 1998)
	Road Note 31 (TRL, 1993)
	Catálogo de Moçambique
* Os métodos empíricos-mecanicista não serão aplicados neste trabalho	

3.3.1. Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Revestidos

A estrutura de pavimento revestido consiste em uma ou mais camadas com diferentes características de resistência, cada camada tem a função de distribuir as cargas recebida na parte superior para a parte inferior. A camada de rolamento está sujeita a altas tensões em relação as camadas subsequentes, por isso é necessário ser construído com material de boa resistência. A Tabela anexo IV ilustra diferentes tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos catálogos de projeto,(MTPW, 2013a).

Os principais métodos de base empírica, que melhor servem para o dimensionamento de pavimentos revestidos (camadas betuminosas) são:

- Métodos de TRL/SADC (1999)
- Método da SATCC (1997)
- Método de Catalogo da Road Note 31
- Método de Catálogo de Moçambique

De seguida descreve-se os métodos referidos no parágrafo anterior.

3.3.1.1. Método de TRL/SADC (1999)

O método desenvolvido pelo Transport Research Laboratory (TRL) para a região da SADC, aplica-se a EBVT que tipicamente têm menos de 200 veículos por dia, e que ao longo de um período de 20 anos, mesmo com altas taxas de crescimento, é improvável

que alcancem um número acumulado superior a um milhão de número equivalente de eixos padrão (ESA), (Jorge, 2014).

Este método foi elaborado com base nos dados obtidos no estudo de seções selecionadas nas estradas existentes no Botswana, Malawi, Zâmbia e Zimbábue, abrangendo uma variedade de climas, classificados amplamente como áridos a semiáridos, sazonalmente húmidos e molhados. A pesquisa centrou-se em medir o desempenho dos pavimentos rodoviários com o tempo e em diferentes condições climáticas e de tráfego. Também identificou características que precisam ser incluídas no projeto da estrada para minimizar riscos, incluindo influências ambientais, o desempenho de materiais "não padronizados" e os modos reais de degradação. O resultado da pesquisa foi o desenvolvimento de um conjunto de novos gráficos de projeto estrutural e um procedimento de projeto de materiais para estradas de baixo volume na região, com base em uma ampla gama de níveis de tráfego, classes de fundação de projeto, tipos de materiais e condições geoclimáticas, (SATCC, 2003).

De seguida apresenta-se as principais etapas para o dimensionamento de pavimento, como se pode observar no organograma da Figura 11.

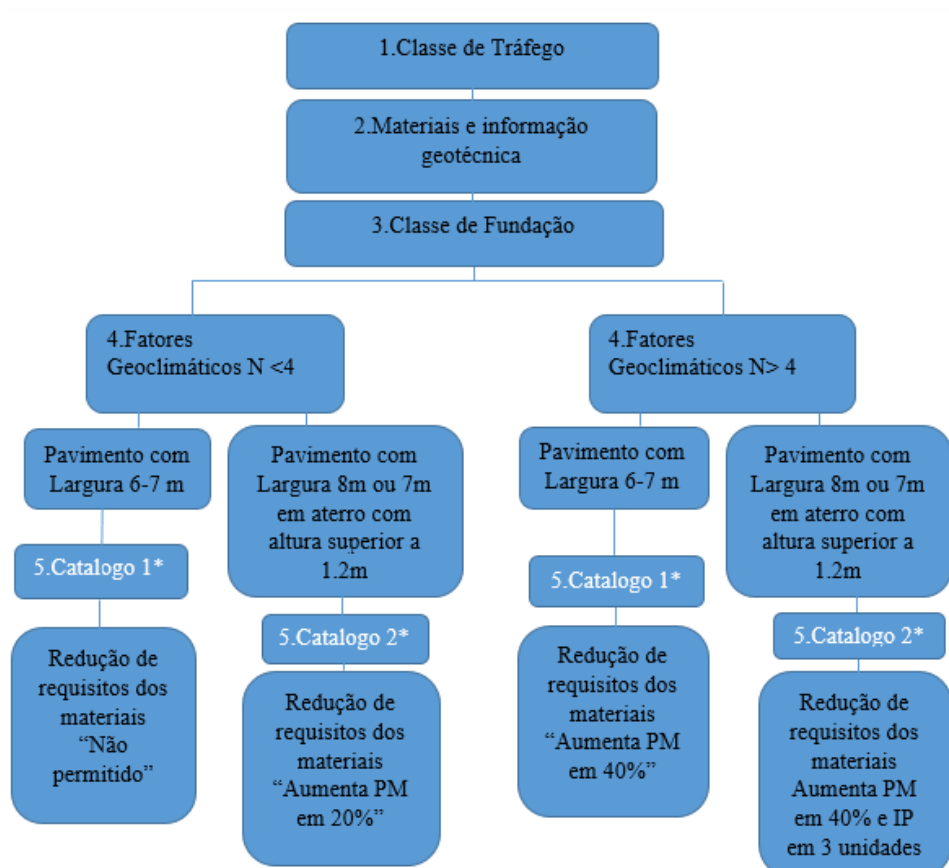


Figura 11- Procedimento de projeto para estradas revestidas (adaptado de Gourley et al, 1999
* Vêr nos Anexos

De seguida descreve-se os procedimentos exposto na Figura 11

Classe de Tráfego

As classes de tráfego são estabelecidas na forma de intervalos para o número acumulado de ESA, tal como se mostra na Tabela 10

Tabela 10- Classes de tráfego de projeto (adaptado de Gourley et al., 1999)

Classe de Tráfego	Intervalo de número acumulado de eixos padrão
0.01 M	10 000
0.05 M	10 000 - 50 000
0.10 M	50 000 - 100 000
0.30 M	100 000 - 300 000
0.50 M	300 000 - 500 000
1.00 M	500 000 - 1 Milhão
3.00 M	1 - 3 Milhões

Materiais e informação geotécnica

Os materiais e suas especificações encontram-se na Tabela1 no anexo IV. Quanto à informação geotécnica, considera-se o valor da capacidade de suporte de fundação, expresso em termos de índice CBR.

Classes de fundação

As fundações são classificadas com base em ensaios CBR, determinados no laboratório, sendo consideradas as classes constantes na Tabela 11

Tabela 11- Classes de fundação (adaptado de Gourley et al, 1999)

Classe de Fundação	CBR de Projecto	Notas
S2	3 a 4	Pode ser usado em todos os aterros que não excedam 2 metros de altura
S3	5 a 8	Pode ser usado em todos os aterros
S4	9 a 14	Pode ser usado em todos os aterros
S5	15 a 29	Pode ser usado em aterros e como camada de preenchimento selecionada, a camada selecionada geralmente é compactada a 95 % (compactação pesada)
S6	>30	Pode ser utilizado em todos os aterros e como camada de sub-base, se a parte superior da camada de 150 milímetros ou a camada de sub-base for compactada a 95% (compactação pesada)

Seleção de estrutura de pavimento

Depois de se conhecer a classe do trafego, a classe de fundação, as características dos materiais, segue-se a escolha das combinações de estruturas de pavimento despostos nos catálogos apresentados nos Quadros 1 e 2 no anexo I. Para o uso destes catálogos, é necessário conhecer o valor do índice climático (N) calculado através da expressão (4),

ou seja deve-se conhecer o tipo de clima predominante na região onde se insere o traçado. Neste método considera-se duas situações em que o valor de $N < 4$ ou $N > 4$.

$$N = 12 \cdot E_i / P_a \quad (4)$$

Onde:

E_i -evaporação;

P_a -precipitação;

N -índice climático

$N < 4$ (climáticas húmidas)

- Quando a largura do pavimento revestido é ≤ 8 m, deverá ser usado o catálogo 1. Não é feito qualquer ajuste às exigências dos materiais da base do pavimento;
- Quando a largura do pavimento revestido ≥ 8 m, deverá ser usado o catálogo 2. O limite para o módulo de plasticidade da base do pavimento pode ser aumentado em 20 %;
- Se o projetista considerar que outros fatores de risco são muito elevados, por exemplo, manutenção e/ou qualidade de construção deficiente, deverá ser usado o catálogo 1.

$N > 4$ (Zonas climáticas moderadas a secas)

- Em climas moderados deve ser usado o catálogo 2.
- Quando a largura do pavimento revestido ≤ 8 m, O limite para o módulo de plasticidade da base do pavimento pode ser aumentado em 40 %;
- Quando a largura do pavimento revestido ≤ 8 m, mas o pavimento é sobre um aterro com altura superior a 1,2 m, o módulo de plasticidade da base do pavimento pode ser aumentado até 40% e o índice de plasticidade em 3 unidades.

3.3.1.2. Método da SATCC (1997)

O manual da Southern Africa Transport and Communication Commission (SATCC), é um guia de dimensionamento de pavimentos rodoviários novos que inclui um catálogo de estruturas com soluções de pavimentos alternativas (de tipologias diferentes). As estruturas são dimensionadas em função do tráfego, da classe de fundação e das condições

climáticas. Os catálogos de dimensionamento da SATCC são usados para estradas com tráfego menor que 30 milhões de ESA. (SATCC, 1998).

O processo de dimensionamento neste guia desenvolve-se em quatro etapas:

1. Estimativa do tráfego acumulado esperado durante a vida do pavimento;
2. Definição da resistência da fundação, solo sobre a qual o pavimento será construído;
3. Definição do clima operacional (seco ou molhado);
4. Seleção de possíveis estruturas de pavimento.

Das estruturas alternativas equivalentes propostas para o pavimento, a seleção final é normalmente realizada com base em critérios económicos e de disponibilidade dos materiais.

Classe de Tráfego

No manual da SATCC, a ação do tráfego traduz-se no número acumulado de eixos padrão de 80 kN. Para calcular o número de eixos padrão, o manual apresenta uma metodologia na qual se faz a divisão do tráfego por categoria de veículos. Para cada categoria, estabelecida em termos do intervalo de carga por eixo simples, calcula-se o tráfego total ao longo da vida útil de projeto através da Equação:

$$DT = T \times 365 \frac{(1 + r/100)^N - 1}{r/100} \quad (5)$$

Onde:

DT- Tráfego total acumulado de projeto para cada categoria de veículo, por sentido;

T- Tráfego médio para cada categoria de veículo, por sentido;

r- Taxa média de crescimento anual, em percentagem;

N- Vida útil de projeto, em anos.

Conhecendo o número acumulado de eixos padrão por categoria de veículos determina-se o número total de eixos padrão de todo o espectro de cargas do tráfego que irá solicitar o pavimento durante a sua vida útil e que é classificado nas classes indicadas na Tabela 12.

Tabela 12- Classe de tráfego (Adaptado da SATCC, 1998)

Intervalo de tráfego (milhões de eixos padrão de 80 kN)	Classe de Tráfego							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	<0.3	0.3 a 0.7	0.7 a 1.5	1.5 a 3.0	3.0 a 6.0	6.0 a 10	10 a 17	17 a 30

Classe de Fundação

A classe de fundação é um dado “*input*” no catálogo de estruturas de pavimento e sua descrição foi discutida na secção (3.2)

Condições Climáticas

As condições climáticas influenciam a seleção da estrutura proposta no catálogo para cada situação, mesmo para condições iguais de tráfego e fundação, pois o catálogo de projeto do manual da SATCC prevê estruturas diferentes para situações consideradas “húmidas” e situações consideradas “secas”. As regiões designadas por “secas” caracterizam-se por uma precipitação média anual inferior a 250 mm e pela inexistência de probabilidade de aparecimento de humidade devido a situações de cheias ou de nascentes subterrâneas. É altamente improvável que regiões com precipitação média anual superior a 500 mm possam ser consideradas nominalmente secas. Todas as situações que não possam classificar-se como secas, com base nos critérios indicados anteriormente, devem ser consideradas regiões nominalmente húmidas. Apesar disso, existem alguns fatores que podem ajudar a reduzir o efeito de se estar na presença de uma região húmida, nomeadamente a existência de um bom sistema de drenagem e a previsão de uma boa manutenção do pavimento. Dependendo destes trabalhos, as condições nominalmente húmidas podem ser reclassificadas de acordo com as indicações da Tabela 13, (Jorge, 2014).

Tipologia das estruturas

Após definição da classe de tráfego, da classe de fundação e das condições climáticas da região onde será construído o pavimento, define-se a tipologia de estrutura pretendida, ou seja, o tipo de materiais que constituirão as camadas do pavimento. Esta escolha será sempre condicionada pela disponibilidade e adequabilidade dos materiais, mas importa referir que, de acordo com o manual da SATCC, nem todos os tipos de materiais podem ser aplicados para todas as classes de tráfego. A Tabela 14, apresenta as tipologias de

estruturas (camada de base e camada de sub-base) previstas e alguns comentários relativos à sua utilização, (SATCC, 1998).

Os catálogos de projeto estão dispostos no Anexo II (Quadro 3-catalogo D1 e Quadro 4 - catalogo D2) e compreende dois conjuntos distintos de estruturas para condições nominalmente secas e nominalmente húmidas (catálogos D1 a D5 e W1 a W5, respetivamente), porém neste trabalho só serão usados os catálogos D1 e D2.

Tabela 13- Reclassificação de condições climáticas para regiões nominalmente húmidas (adaptado de SATCC, 1998)

Níveis de manutenção previsto				
Drenagem prevista	Bom, programado, com problemas resolvidos a tempo		Manutenção deficiente	
Boa, bem planeada e bem executada	D		Níveis de tráfego	
			Baixo ($\leq T2$)	Alto ($\geq T3$)
			D	W
Drenagem deficiente	Níveis de tráfego		W	
	Baixo ($\leq T2$)	Alto ($\geq T3$)		
	D	W		
Legenda: D = Condições nominalmente secas (<i>Dry</i>); W = Condições nominalmente húmidas (<i>Wet</i>)				

Tabela 14- Tipologias de estruturas previstas no catálogo de estruturas (adaptado de SATCC, 1998)

Catálogo	Estrutura do pavimento ¹	Comentários
D1 & W1	3 - 4	Normalmente base de materiais granulares naturais ou britados; pode ser um macadame se considerado apropriado e se o custo e/ou a qualidade não forem um problema.
D1 & W1	5 - 8	Base: como indicado para D1 & W1. Sub-base pode incluir tratamento com cal (para classes T3, <0,75×10 ⁶ eixos padrão de 80 kN) ou com emulsão betuminosa (para classe T4, até3×10 ⁶ eixos padrão de 80 kN)
D1 & W1	9 - 14	Normalmente base tratada com cimento; a base tratada com emulsão betuminosa é permitida na classe T3 (até 1,5×10 ⁶ eixos padrão de 80 kN) ² A sub-base pode incluir tratamento com cal (para classes T3, < 0,75×10 ⁶ de eixos padrão de 80 kN) ou com emulsão betuminosa (para classe T4, até 3×10 ⁶ de eixos padrão de 80 kN)
D1 & W1	15 - 29	Base em misturas betuminosas a quente fabricadas em central
D1 & W1	>30	Base: como indicado para D4 & W4. A sub-base pode incluir tratamento com cal (para classes T3, <0,75×10 ⁶ de eixos padrão de 80 kN) ou com emulsão betuminosa (para classe T4, até 3 x 10 ⁶ de eixos padrão de 80 kN)
<p>1 Camada de desgaste inclui tratamentos superficiais e misturas betuminosas a quente. 2 Materiais naturais tratados com emulsão betuminosa, com valores de betume residual até 1,5%, incluindo 1,0% de cimento Portland, têm provado na África do Sul ter um desempenho satisfatório para níveis de tráfego significativamente superiores</p>		

3.3.1.3. Método de catálogo da Road Note 31

O método de catálogo da Road Note 31 é um guia de dimensionamento de estruturas de pavimentos betuminosos baseado em pesquisa e experiência em mais de 30 países, principalmente tropicais e subtropicais. Edições anteriores foram utilizadas para o projeto de EBVT em todo o mundo. A última edição (1993) cobre uma gama mais ampla de materiais e estruturas com um catálogo de projetos que atendem ao tráfego até 30 milhões de eixos padrão, (TRL, 1993).

Três etapas principais são seguidos no Processo de dimensionamento de novos pavimentos de superfície betuminosa:

1. Estimativa da quantidade de tráfego e o número equivalentes de eixos padrão que irão circular a estrada durante a vida útil do projeto;
2. Avaliar a resistência do solo de fundação no qual a estrada será construída;
3. Selecionar a combinação mais económica de materiais de pavimento e espessuras de camada que proporcionará um serviço satisfatório durante a vida útil do pavimento usando catálogos estruturais. (Normalmente, é necessário assumir que um bom nível de manutenção também é realizado).

Classe de Tráfego

As classes de tráfego são estabelecidas na forma de intervalos para o número acumulado de ESA, tal como se mostra na Tabela 15

Tabela 15- Classes de tráfego de projeto (adaptado deTRL,1993)

Classe de Tráfego	Intervalo de número acumulado de eixos padrão
T1	<0.3
T2	0.3 a 0.7
T3	0.3 a 1.5
T4	1.5 a 3.0
T5	3.0 a 6.0
T6	6.0 a 10
T7	10 a 17
T8	17 a 30

No contexto deste trabalho só serão consideradas as classes de tráfego T1 e T2, por estes se inserirem dentro da abordagem de EBVT e as demais (T3 a T8), contemplam-se na abordagem de estradas de maior volume de tráfego (EMVT), o que não faz parte deste trabalho.

Classe da Fundação

A classe da fundação considerada neste método, é definida conforme a Tabela 16

Tabela 16- Classe de fundação (adaptado da Khadka, 1993)

Classe de Fundação	Intervalo de CBR (%)
S1	2
S2	3 a 4
S3	5 a 7
S4	8 a 14
S5	15 a 29
S6	>30

Seleção da estrutura de pavimento

Sendo conhecidos os parâmetros acima referidos (classe de tráfego e de fundação), segue-se a seleção da melhor combinação do material de pavimento e das respectivas estrutura camadas. Para tal, no Anexo III, (Quadros 5 e 6), estão apresentadas diferentes tipologias de materiais e estruturas em forma de catálogos, para as quais podem ser feitas diferentes combinações em função da disponibilidade dos materiais e das condições económicas.

3.3.1.4. Método de Catalogo de Moçambique

Os métodos baseados em catálogos são os mais simples de utilizar e, de fato, os mais comuns para o dimensionamento de pavimentos, visto que vários trabalhos práticos e teóricos foram realizados e culminaram com a produção de vários de catálogos de projeto. Para cada tipo de estrutura são produzidos modelos com base em intervalos da resistência da fundação e de níveis de carga de tráfego. O projetista tem que estimar, ou medir, a resistência da fundação e o volume de tráfego, e em seguida, procurar o dimensionamento no catálogo apropriado,(MWTC, 2016b).

O manual desenvolvido pela Administração Nacional de Estradas (ANE, 2014), citado por (Jorge, 2014), apresenta vários catálogos para os seguintes tipos de pavimentos anexo IV:

- Com revestimentos superficiais;
- Com bases estabilizadas;
- Com revestimentos semiestruturais;

- Com revestimentos de elementos discretos;
- Com revestimentos estruturais.

Os catálogos usados pelas autoridades moçambicanas (ANE,2014), são semelhantes aos usados pelo Ministério de Estradas e Pontes do Sudão do Sul (MRB,2013) e das autoridades de estradas de Etiópia. Nesses países os catálogos são apresentados consoante a classe de fundação, classe de tráfego e outros fatores como as zonas climáticas,(Jorge, 2014).

O processo para o dimensionamento de estrutura de pavimentos, segue as seguintes etapas principais:

Classe de tráfego

Discutido e apresentado na capítulo 3, secção 3.1. Quando a classe de tráfego do projeto está entre duas classes de tráfego e na ausência de dados fiáveis, adota-se a classe mais alta.

Classe de fundação

Discutido e apresentado na capítulo 3, secção 3.2. O método não é aplicável nos casos de fundações fracas (CBR <3%) e de solos problemáticos.

Zonas climáticas

A definição do tipo do clima é semelhante à definição apresentada no método TRL/SADC, ver a (secção 3.3.1.1)

Seleção da estrutura de pavimento

Nos Quadros 7 e 8 do Anexo IV, estão a dispostos diferentes estrutura de pavimento. A escolha resulta da combinação de fatores, como a disponibilidade de materiais dentro de uma distância razoável em relação ao traçado e dos fatores económicos e seleciona-se a estrutura que melhor se adequa as condições disponíveis.

Quando a estrada está localizada perto da fronteira entre as duas zonas climáticas, deverá ser usado o menor valor para reduzir riscos.

3.3.2. Método de Dimensionamento de Pavimentos não Revestidos

Os pavimentos não revestidos consistem em dois tipos:

1. Pavimento em cascalho e
2. Pavimento em terra

A estrada de cascalho consiste numa estrutura de pavimento com duas camadas (camada de rolamento e camada de base). A camada de base serve para proteger o material “*in situ*” e a camada de rolamento protege a camada de base, garantindo a espessura mínima de modo a evitar sua exposição ao tráfego, (MTPW, 2013a).

Quanto às estradas de terra são estradas projetadas e consistem tipicamente em trabalhos de escavação do material *in situ* (fundação), isto é substituição do solo natural por um solo de melhor qualidade (aterro), a qual deve ser compactado e adequado a carga do tráfego que irá suportar. Tem um bom desempenho quando construído com material adequado, com um declive entre 5-8%, um bom sistema de drenagem e boa manutenção,(MWTC, 2016b).

Os métodos que melhor se adequam ao dimensionamento de EBVT com superfície de terra/cascalho são:

- Método DCP-CBR
- Método de Curvas de Cobertura

Nas secções que seguem, descreve-se os procedimentos usados para projetos de pavimentos não revestidos à luz dos métodos supracitados

3.3.2.1. Método DCP-CBR

Segundo (MWTC, 2016b), o uso do método DCP-CBR, para pavimentos em camadas de cascalho segue a seguinte abordagem:

- A fundação deve ser preparada com o mesmo rigor que de pavimentos betuminosos;
- Assume-se que a recarga de cascalho na camada de rolamento será feita dentro do intervalo de tempo que se espera a perda de cascalho;

O Procedimento de projeto estrutural consiste em cinco principais etapas:

1. Determinar a classe do tráfego (capítulo 3-secção 3.1);
2. Determinar a classe de fundação e as condições de humidade (capítulo 3-secção 3.2);
3. Estabelecer a qualidade de cascalho a ser usado;
4. Determinar a espessura necessária na camada de base para evitar o excesso de tensões de compressão na fundação
5. Determinar a espessura da camada de rolamento com base na taxa de perda de cascalho e na frequência escolhida para a recarga de cascalho (expressão 6)

Qualidade de Cascalho

As estradas não pavimentadas na África do Sul são construídas de acordo com as especificações indicadas no TRH 20 (DOT, 2009), as quais são ajustadas consoante as condições existentes na zona em análise, conforme ilustrado no Quadro 9 do Anexo V, (I. Santos, 2013)

Nas Tabela 17-19, estão apresentadas diferentes estruturas adotadas nas camadas de base de pavimentos em cascalho, em função da classe do tráfego e da fundação.

Tabela 17- Espessura da base em cascalho de boa resistência (G45) (adaptados de MTPW,2013a)

Classe de Fundação CBR (%)	Classe de Tráfego (ESA)				
	LV1 (<0.01)	LV2 (0.01 - 0.1)	LV3 (0.1 -0.3)	LV4 (0.3 -0.5)	LV5 (0.5 -1.0)
S2 (3 - 4)	175	225	250	300	350
S3 (5 - 7)	150	200	225	250	300
S4 (8 - 14)	100	150	200	200	250
S5 (15 - 29)	100	125	150	175	250

Tabela 18- Espessura da base em cascalho de resistência média (G30) (adaptados de MTPW,2013a)

Classe de Fundação CBR (%)	Classe de Tráfego (ESA)				
	LV1 (<0.01)	LV2 (0.01 - 0.1)	LV3 (0.1 -0.3)	LV4 (0.3 -0.5)	LV5 (0.5 -1.0)
S2 (3 - 4)	175	250	290	325	370
S3 (5 - 7)	150	200	250	275	325
S4 (8 - 14)	125	175	200	220	275
S5 (15 - 29)	100	125	150	175	200

Tabela 19- Espessura da base em cascalho de baixa resistência (G15) (adaptado do MTPW,2013a)

Classe de Fundação CBR (%)	Classe de Tráfego (ESA)				
	LV1 (<0.01)	LV2 (0.01 - 0.1)	LV3 (0.1 -0.3)	LV4 (0.3 -0.5)	LV5 (0.5 -1.0)
S2 (3 - 4)	225	325	375	NA	NA
S3 (5 - 7)	200	250	325	350	NA
S4 (8 - 14)	150	225	275	300	NA
S5 (15 - 29)	150*	150*	200*	200*	NA

* esta é a profundidade adicional do material compactado na fundação

Na Tabela 20, apresenta-se os valores típicos considerados como perda anual de cascalho expresso em (mm/ano/100 TMDAp), e na Figura a relação entre o produto de retração, coeficiente granulométrico e desempenho ao desgaste de cascalhos grossos

(MWTC, 2016b).

Tabela 20- perda de cascalho tipicamente padronizada (adaptado do MTPW,2013)

Qualidade de material da zona	Nível de qualidade de material	Perda anual de cascalho (GL em mm/ano/TMDA)
Zona A*	Satisfatório	20
Zona B*	Pobre	45
Zona C*	Pobre	45
Zona D*	Marginal	30
Zona C*	Boa	10

* vêr a Figura 12

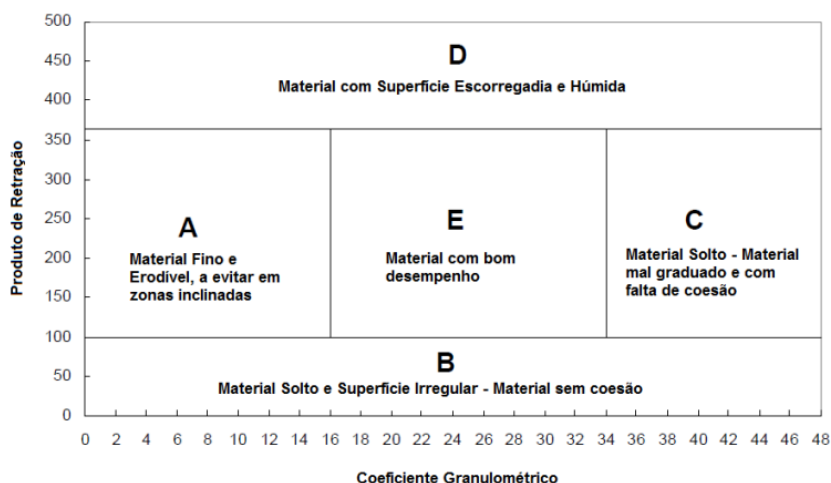


Figura 12-Relação entre o produto de retração, coeficiente granulométrico e desempenho ao desgaste de cascalhos grossos

As taxas de perda de cascalho aumentam significativamente em inclinações maiores que 6% e em áreas de intensa precipitação. Em alguns casos o aumento pode ser superior a 50%, dependendo da inclinação e da qualidade do material. Nessas secções devem ser feitas intervenções pontuais melhoria. A recarga de cascalho deve ser feita antes que a camada de base seja exposta a acção do tráfego. A frequência de recarga (R), varia no intervalo de cinco a oito anos (5 -8 anos) e a espessura da camada de rolamento calcula-se através da (expressão 6): (MTPW, 2013a).

$$h_{\text{camada de rolamento}} = R \cdot GL \quad (6)$$

Onde:

R- frequência de recarga de cascalho;

GL-perda anual de cascalho

3.3.2.2. Método de Curvas de Cobertura CBR

O método de curvas de cobertura CBR, é um método empírico pouco usado nos últimos anos e consiste na determinação de espessuras de material granular, isto é, a camada mínima necessária para proteger a fundação de deformação permanente devido a ação do tráfego, através de curvas de conceção de projeto,(Paige-Green & Plessis, 2009).

Procedimentos de projeto

Como parâmetros de entrada, requer a determinação do valor do tráfego de projeto e do CBR da fundação, sendo necessário utilizar as curvas de conceção apresentadas na (Figura 13). Os materiais devem ter a capacidade para suportar a carga emitida pela ação de tráfego e reduzir a tensão na fundação, sem causar deformação permanente grave na camada superior. A entrada de água no pavimento é controlada através do estabelecimento de uma inclinação transversal (4-6%), (Brito, 2011).

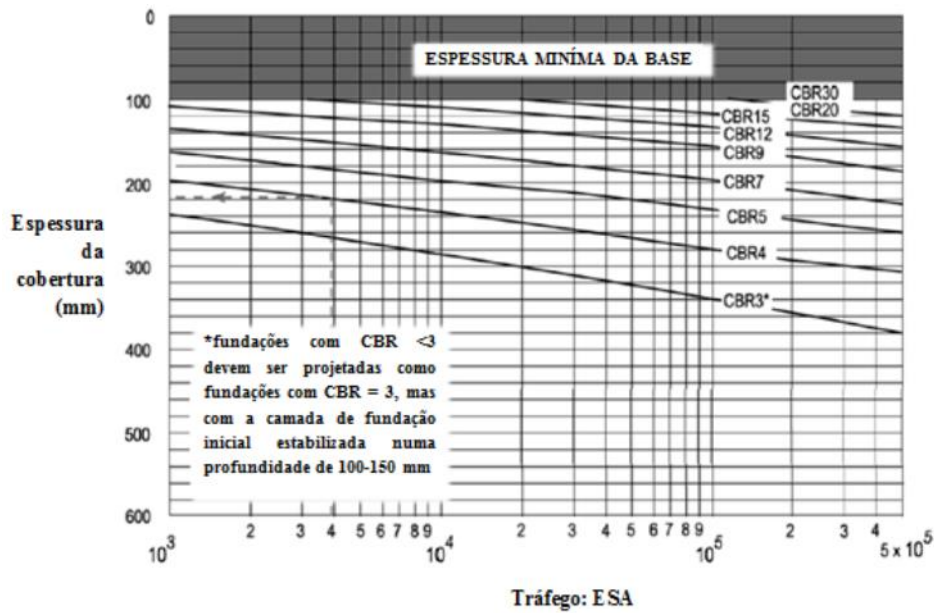


Figura 13- Projeto para pavimentos granulares (80% de confiança) - (adaptado de Brito,2011)

3.3.3. Considerações Finais

No dimensionamento de EBVT, com recurso aos métodos de abordagem empírica apresentados neste capítulo, é imprescindível a avaliação de parâmetros do solo, como por exemplo, o teor em água no solo, a capacidade de suporte da fundação expresso em termos de taxa de penetração; do módulo de deformabilidade do solo ou em termos de índice CBR, este ultimo é usado para definir a classe de fundação que é como um dos dados de entrada nos métodos apresentados neste trabalho.

Neste trabalho, o parâmetro CBR foi avaliado através do ensaio laboratorial, porém existem outros parâmetros importantes como o módulo de deformabilidade do solo; a taxa de penetração (N10), que podem ser convertidos em CBR através de correlações empíricas desenvolvidas por ((Pinard, 2014);(MTPW, 2013a)), que resultaram nas (expressões 7 e 8).

$$\log_{10}(CBR) = 2,48 - 1.057 \cdot \log_{10} \cdot N10 \quad (7)$$

$$CBR = 410 \cdot N10^{-1.27} \quad (8)$$

No capítulo a seguir, são apresentados vários tipos de ensaios para obtenção de parâmetros aplicáveis no dimensionamento de EBVT.

4. ABORDAGEM GEOTÉCNICA ÀS ESTRADAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

Os ensaios de caracterização do solo, podem ter um grande impacto na manutenção, custo e eficiência das EBVT. No entanto, o grau de investigação e detalhes do projeto deve estar relacionado à classe da estrada. Não é razoável esperar que a mesma investigação seja realizada ou medidas preventivas sejam implementadas para uma estrada com menos de 20 veículos pesados por dia (vpd), ou para uma estrada com cerca de 200 a 400 vpd. No entanto, for necessária a realização de investigação geotécnica para estradas nas categorias mais baixas, é importante que seja realizada com o mesmo rigor que seria para estradas de alta categoria. É igualmente importante que o projetista seja capaz de identificar potenciais problemas e saber quando obter os dados geotécnicos, (MWTC, 2016a).

A escolha dos métodos de análise geotécnica é determinada pelo tipo de projeto rodoviário e a natureza dos problemas que podem surgir das condições do local, da geologia, do tipo de terreno e clima. O objetivo primário de tais análises é de obter informações suficientes de tal forma que as estruturas subjacentes não estejam sujeitas a deformações excessivas relacionadas à subsidência ou movimento no solo, (MWTC, 2016a).

Análises geotécnicas sofisticadas e dispendiosas só devem ser usadas quando um problema geotécnico significativo for encontrado com consequências potencialmente graves. Nessas circunstâncias, é aconselhável solicitar assistência especializada. Assim as investigações no terreno precisam ser cuidadosamente planejadas e devem levar em consideração o seguinte:

- A natureza do solo;
- A natureza e a fase do projeto;
- Os requisitos do projeto de dimensionamento.

Nos parágrafos que seguem, apresenta-se a descrição de ensaios de caracterização do solo, que foram realizados no campo e no laboratório com o objetivo de analisar alguns parâmetros do solo como por exemplo (o índice CBR, o módulo de deformabilidade do solo, a taxa de penetração, o grau de compactação, a humidade ótima, etc.). Esses parâmetros desempenham um papel importante na abordagem sobre EBVT, isto é, alguns

são usados como dados de entrada nos métodos de dimensionamento de pavimentos e como indicadores da capacidade do suporte do solo de fundação. Os ensaios realizados são:

- Ensaios de laboratório (ensaio CBR; ensaio Proctor e a análise granulométrica);
- Ensaio de campo (ensaio de Penetrómetro dinâmico ligeiro; ensaio de carga em placa e ensaio de controlo de compactação com célula radioativa);

Em seguida apresenta-se a descrição mais detalhada de cada ensaio

4.1. Ensaios de Laboratório

Para a realização dos ensaios laboratoriais, primeiro procedeu-se com a extração de amostras de solo, em cinco pontos do traçado em estudo, dos quais dois pontos em zona de solo de ocorrência natural (zona de escavação) e os restantes três em zonas de aterro.

Sinalizou-se os pontos onde foram posteriormente extraídas as amostras, depois de uma breve visita e observação visual da área em estudo onde foram identificadas as zonas em aterro e escavação, privilegiando-se na escolha dos pontos de ensaio: a facilidade de acesso com equipamentos, as áreas com uma textura de solo aparentemente diferente da maior extensão do traçado e as áreas com aparentes problemas de drenagem.

4.1.1. Ensaio de índice Californiano de Capacidade de Suporte (CBR)

A capacidade de suporte de fundação, cujo conhecimento é necessário para dimensionar os pavimentos, foi durante muitos anos predominantemente caracterizado pelo seu “índice californiano de capacidade de suporte” (CBR – California Bearing Ratio) que, como se sabe, é função da força necessária para fazer penetrar, a certa velocidade (1mm/min), um cilindro de aço de 50 mm de diâmetro, até uma certa profundidade (2.5 e 5.0 mm), num provete de solo compactado num molde e sujeito previamente a imersão em água durante 4 dias, (Branco et al., 2011).

Uso em pavimentos:

- Resultado de ensaio usado por alguns métodos empíricos no dimensionamento de pavimentos;

- Correlação como o módulo de deformabilidade de solo e outras propriedades do solo.



Figura 14- Realização do ensaio CBR

4.1.2. Ensaio de Compactação -Proctor

A compactação é um processo que aplicado a um amassa de solo não saturado, isto é, constituída por três fases, sólida (partículas), líquida (água) e gasosa (ar) – visa o aumento da sua compacidade por meio da redução do volume do ar, conseguida à custa da aplicação repetida de cargas. (M. de M. Fernandes, 2015).

Curva de compactação

Um primeiro ponto relevante no que se refere à compactação quando estão envolvidos solos com fração fina mais ou menos significativa é que o resultado em termos da compacidade atingida utilizando um dado procedimento de compactação depende de dois fatores determinantes: da energia aplicada e de modo considerável do teor em água com que o solo é compactado, (M. de M. Fernandes, 2015).

Imagina-se então um procedimento de compactação com uma determinada energia em que o solo é compactado misturando-lhe diferentes quantidades de água (obtendo-se, portanto, diferentes teores em água) e medindo-se o resultado da compactação através da

determinação do peso volúmico seco. O resultado pode assim ser descrito por pares de valores (W, γ_d) , que quando representados num gráfico, dão origem à curva de compactação como ilustrado na (Figura 16), (J. Santos, 2008).

Pode assim constatar-se a existência de uma relação $(w - \gamma_d)$, que representa um máximo $\gamma_d^{\text{máx}}$ (peso volúmico seco máximo), o que ocorre para um teor em água que se designa por teor em água ótimo ($W_{\text{ópt}}$). O ponto máximo (ótimo) divide a curva de compactação em dois ramos: à esquerda do ótimo, o ramo seco; à direita, o ramo húmido, (J. Santos, 2008).



Figura 15- Realização do ensaio Proctor

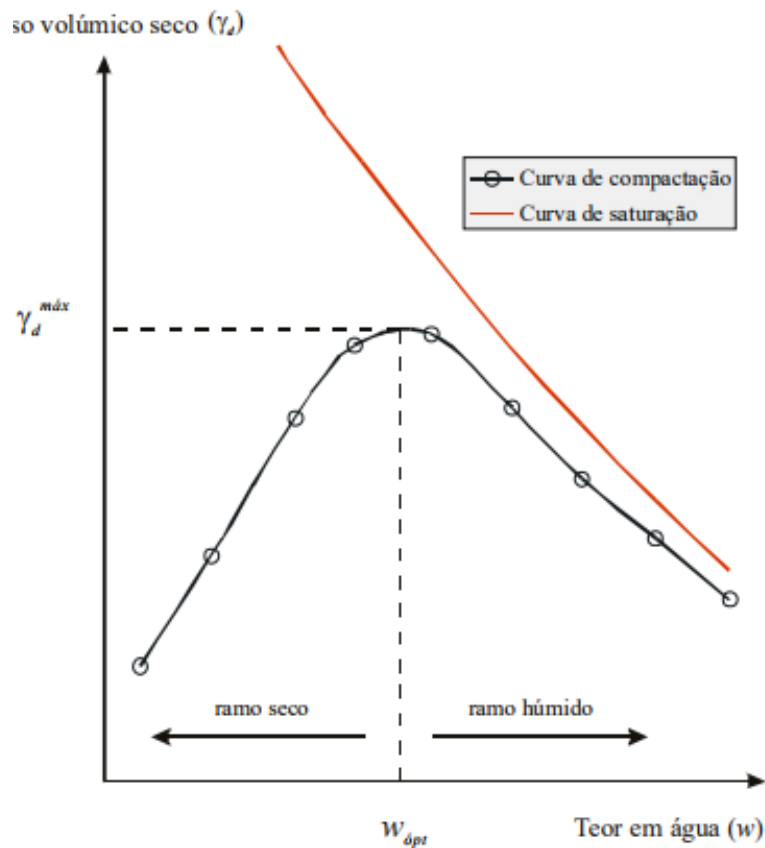


Figura 16- Curva de compactação adaptado do (J.Santos,2008)

4.1.3. Análise Granulométrica

A composição granulométrica e os limites de Atterberg constituem as chamadas características de identificação do solo, usualmente consideradas as propriedades mais básicas do solo e que por isso devem ser sempre determinadas, por regra, antes de quaisquer outras. A composição granulométrica é definida como distribuição em percentagem ponderal (isto é, em peso total) das partículas do solo de acordo com as suas dimensões, (M. de M. Fernandes, 2015).

Segundo o mesmo autor, para partículas de maiores dimensões o método convencional para a determinação da composição granulométrica é o de peneiração. Para partículas de menores dimensões usa-se em geral, o método de sedimentação.

Os resultados da análise granulométrica são representados em gráficos como o da (Figura 17). Nesses gráficos as dimensões (diâmetros) das partículas (em milímetros) estão representados em abcissas em escala logarítmica. Na parte de baixo da figura pode ver-se uma classificação das partículas dos solos de acordo com as suas dimensões: por ordem crescente de dimensões, classificam-se em argilas, siltes, areias e cascalho. Os siltes,

areias e cascalhos podem ainda dividir-se em finos, médios e grossos, (M. de M. Fernandes, 2015).

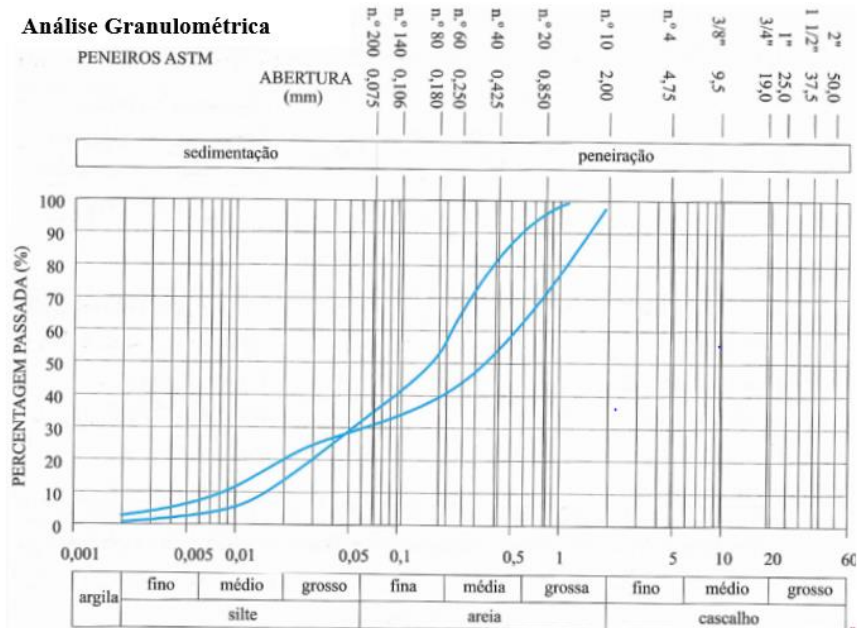


Figura 17- Análise granulométrica (Adaptado de M. Fernandes, 2015)

Da Figura 17 pode-se constatar que, o processo de peneiração apenas serve para a distribuição granulométrica das areias e cascalho, já que a malha do peneiro 200 (0.075 mm) praticamente coincide com a dimensão que separa as areias dos siltes (0.06 mm). Estes e argilas terão pois a sua distribuição granulométrica determinada, em geral, por sedimentação, (M. de M. Fernandes, 2015).

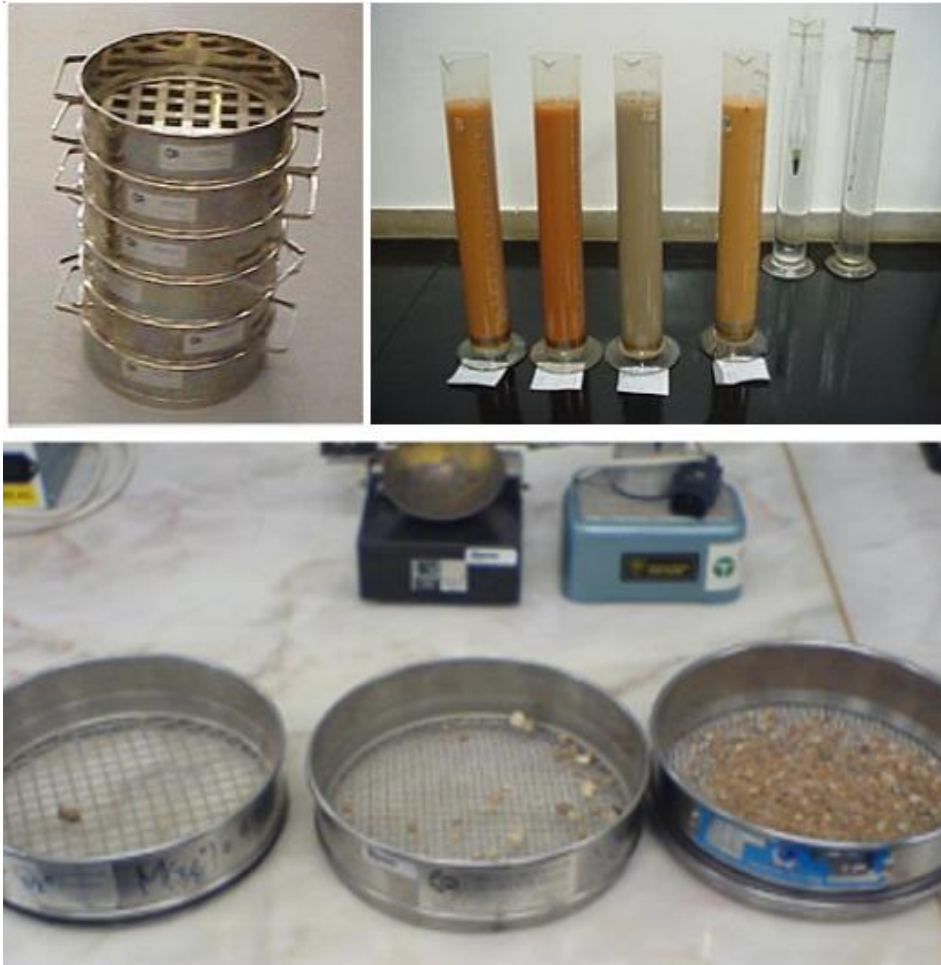


Figura 18- Análise Granulométrica

4.2. Ensaio “*In Situ*”

Com o objetivo de se avaliar a compacidade do solo através da determinação da taxa de penetração, do módulo de deformabilidade do solo, e a avaliação do teor de água do solo de fundação, realizou-se uma campanha de ensaios “in situ”, tais como:

- Ensaio de penetração com Penetrômetro dinâmico ligeiro (PDL);
- Ensaio de carga em placa (ECP);
- Ensaio de controlo de compactação com célula radiativa

Nas secções seguintes, apresenta-se a descrição de cada um dos ensaios realizados no campo (“in situ”).

4.2.1. Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (PDL)

O Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (PDL) - é um dispositivo de ensaio não destrutivo usado para determinar a resistência à penetração dos pavimentos flexíveis existentes construídos com materiais não ligados, (Clemen, 2016).

O ensaio consiste na determinação do número de golpes (N) de um martelo ou pilão de massa (M) em queda livre, a uma altura (H) sobre um conjunto constituído, de cima para baixo, por um batente, um trem de varas e uma ponta cônica (cuja base tem área A), para que ocorra determinado comprimento de penetração (L). O diâmetro das varas é inferior ao da base do cone da ponta, pelo que, teoricamente, a resistência à penetração resulta apenas de força de reação do terreno sobre a superfície cônica da ponta. (M. de M. Fernandes, 2015).

Na Figura 19, mostra-se o equipamento usado no ensaio de penetração com o Penetrômetro dinâmico ligeiro.



Figura 19- Equipamento de Ensaio PDL

4.2.2. Ensaio de Carga em Placa (ECP)

O Ensaio de Carga em Placa (ECP) – consiste no carregamento por escalões de uma placa circular de aço, colocada sobre uma superfície de terreno a ensaiar, medindo o assentamento resultante. Pode assim ser considerado como uma simulação, numa escala reduzida, de uma fundação superficial. Não obstante este facto, nem sempre o objetivo é o dimensionamento daquele tipo de fundações. (M. de M. Fernandes, 2015).

É usado para estimar a capacidade de carga do conjunto formado pela fundação e camadas de materiais granulares e para obter os parâmetros de resistência do solo, verificando-se o seu comportamento através da avaliação da sua deformabilidade. Para tal, o conjunto solo-fundação é sujeito a um determinado carregamento de compressão, (Pestana, 2008).

Nos casos em que se analisam camadas de infraestruturas de transporte é habitual utilizar a norma de ensaio de carga francesa NF 2000 P94-117-1 (AFNOR, 2000), ((Gomes, 2012), (Novo, 2016)). Com base nesta, o valor máximo do módulo de deformabilidade que pode ser medido neste ensaio é 0.25 MPa. O ensaio consiste na aplicação, após uma pré-carga, de dois ciclos de carregamentos sucessivos através de uma placa de diâmetro de 600 mm, onde o primeiro ciclo deve corresponder a uma tensão média sob a placa de 0,25 MPa, devendo se manter esta tensão durante o tempo necessário à estabilização do deslocamento da placa. O segundo ciclo de carregamento deverá atingir uma força tal que a tensão média sob a placa seja de 0,20 MPa e, à semelhança do primeiro ciclo, a descarga só poderá ser realizada após a estabilização da deflexão da placa. O módulo de deformabilidade (E_{V2}) é calculado a partir da fórmula da Boussinesq apresentada na Equação 9 e a relação entre os módulos de deformabilidade do segundo ciclo de carga com o primeiro (K) é utilizada para avaliar a qualidade de compactação. Quanto mais baixo for o seu valor ($K < 1.0$), melhor é a compactação, e determinação com a expressão 10

$$E_{V2} = \frac{\pi}{4} (1 - \nu^2) \frac{\sigma \cdot r}{Z_2} \quad (9)$$

$$K = \frac{E_{V2}}{E_{V1}} \quad (10)$$

Onde:

V-Coeficiente de Poisson; Z_2 -valor do assentamento medido durante o segundo ciclo de carga; r- raio da placa; σ –tensão normal na placa

Na Figura 20, representa-se o equipamento usado no ensaio de carga em placa.



Figura 20- Ensaio de Carga em Placa

4.2.3. Controlo de Compactação com Célula Radioativa

Célula radioativa – O controlo convencional da compactação de aterros envolve a determinação do peso volúmico e do teor em água; o peso volúmico seco. A medição do peso volúmico e do teor em água pode ser efetuada com equipamento baseado na radioatividade. Basicamente este aparelho tem uma fonte radioativa e um recetor-contador, na fonte do equipamento existem dois tipos de materiais radioativos, um para a emissão de raios gama e outro para a emissão de neutrões, este ensaio é usado para a determinação “*In Situ*” do peso volúmico e do teor em água de camadas de solo acabadas de compactar sendo o equipamento mais utilizado no controlo de compactações (M. de M. Fernandes, 2015).

O equipamento é calibrado antes de cada utilização num bloco de referência que tem uma densidade conhecida e é acompanhado por um bloco de referência, uma placa guia de perfuração, uma ponteira e o extrator de ponteira, como mostra a imagem da Figura 20,(Rodrigues, 2015).



Figura 21- célula radioativa

4.4. Programas de Trabalhos e ensaios – “Caso de Estudo”

Nas secções seguintes, apresenta-se os programas de trabalhos e ensaios. Começa-se por se apresentar um breve historial do traçado, e posteriormente a caracterização e por fim apresenta-se os ensaios que foram realizados, indicando – se as normas usadas para cada ensaio e os principais objetivos da realização destes ensaios.

4.4.1. Descrição da Área de Estudo

A Linha do Tua é uma ligação ferroviária de via estreita que ligava Foz Tua, na Linha do Douro, até à cidade de Bragança, na região portuguesa de Trás-os-Montes. A linha tem 134 quilómetros de extensão e acompanha o percurso sinuoso do vale do rio Tua desde a sua foz no rio Douro até Mirandela. A linha foi construída em duas fases. O troço entre a foz do Tua e Mirandela foi inaugurado em 1887. A construção dos restantes 73,5 km até Bragança foi adiada por razões financeiras, tendo sido concluído apenas em 1906. O primeiro estudo do traçado foi realizado em 1878, (Almeida, 2017).

Em finais da década de 1980, o governo e caminhos-de-ferro de Portugal (CP), planearam o encerramento de grande parte das linhas secundárias em Portugal. Em janeiro de 1990 foi suprimido o transporte de mercadorias na Linha do Tua. Entre dezembro de 1991 e janeiro de 1992 foi encerrado o troço entre Mirandela e Bragança.

Após 20 anos sem a circulação de comboio, a antiga linha do Tua volta a ligar os concelhos de Bragança, Mirandela e Macedo de Cavaleiros num projeto turístico que envolve o aproveitamento do corredor ferroviário para uma ecopista com uma extensão de 70km, com cerca de 3km no concelho de Mirandela, 24km no de Macedo e 30 no de Bragança, sendo esse nos últimos 30km onde se incide os trabalhos desta pesquisa. (Almeida, 2017).

Com o objetivo de se fazer a caracterização do solo, vários ensaios de campo (“in situ”), foram realizados ao longo do traçado em estudo, concretamente nas cinco áreas destacadas na Figura 22. A Figura 22 foi extraída do “Google Earth”, mediante a inserção das respetivas coordenadas dos pontos de ensaio. O primeiro ponto (P1) e o quarto (P4), são áreas em aterro e os restantes (P2; P3 e P5), são áreas de solo natural (escavação). As coordenadas dos pontos de ensaios se encontram dispostos na Tabela 21.

Tabela 21- Coordenadas dos pontos ensaiado

Área de Ensaio	Coordenadas		Altitude (m)	Ensaio de Campo "in situ"	Ensaio de Laboratório
P1	N 41,73838°	W -6,81647°	820	Célula Radioativa P.D.L e E.C.P	Análise Granulométrica; Proctor e CBR
P2	N 41,73314°	W -6,81941°	821		
P3	N 41,73207°	W -6,81966°	819		
P4	N 41,72170°	W -6,81645°	815		
P5	N 41,71854°	W -6,81476°	824		



Figura 22- Área de ensaios (imagem tirada do Google Earth)

4.4.2. Características do Traçado

O traçado em estudo, é uma estrada requalificada (ecopista), cuja camada de rolamento é uma mistura de solo com cascalho. Quanto ao nível de serviço, este traçado é de pouca utilização, não sendo expectável a circulação de mais de um milhão de eixos padrão equivalente, portanto pode ser enquadrado na abordagem de estradas de baixo volume de tráfego (EBVT).

Ao longo do traçado, é visível a falta de um sistema de drenagem transversal nas zonas de solo compactado (aterro), e em zonas de escavação onde existe o sistema de drenagem longitudinal, é notória a sua ineficiência, devido a excesso de vegetação na sua largura do fundo.

As imagens apresentadas na Figura 23, ilustra o que foi dito no parágrafo anterior.



Figura 23- problemas relacionados com drenagem
(a)-falta de sistema de drenagem longitudinal na zona em escavação; (c)-deficiencia de drenagem na zona em escavação; (b)-deficiencia de drenagem na zona em aterro e (d)-falta de sistema de drenagem transversal na zona em aterro

4.4.3. Trabalhos Desenvolvidos

No âmbito deste trabalho, realizou-se uma campanha de ensaios de caracterização do solo de fundação, para melhor responder o principal objetivo deste trabalho (avaliar o contributo geotécnico nas EBVT e aplicar os métodos correntes do dimensionamento). Na Figura 24 apresenta-se o organograma dos ensaios realizados neste trabalho, as normas que orientaram os ensaios e os objetivos para cada ensaio.

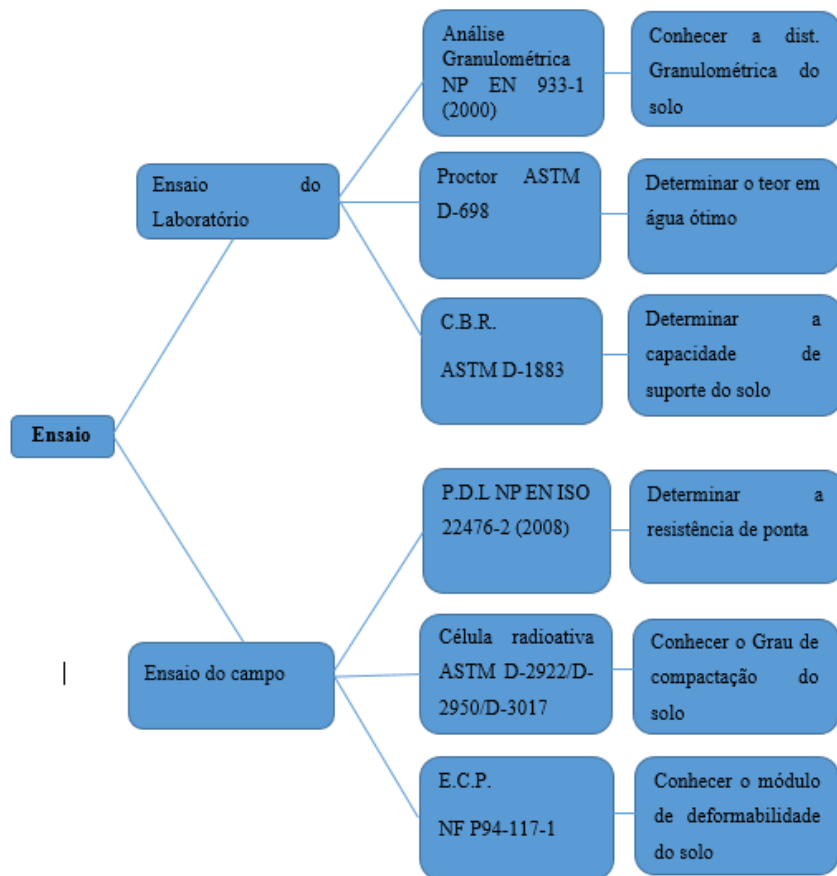


Figura 24- Organograma de ensaios realizados

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS E CORRELAÇÕES

5.1. Considerações Iniciais

Como referido no capítulo anterior, procedeu-se com à recolha das amostras remexidas em cinco pontos ao longo do traçado em estudo, numa extensão de aproximadamente 2.4 km, para procede à identificação do solo/leito de pavimento e posteriormente a realização de ensaios Proctor e CBR. A profundidade máxima de caracterização do solo foi de aproximadamente 50 centímetros e nos pontos de ensaio em que, aparentemente, havia diferentes estratos, teve-se o cuidado de caracterizar cada um dos estratos separadamente (passando-se a designar por 1 e 2 as camadas superior e inferior respetivamente). Os pontos de ensaio são os seguintes:

Ponto 1 (P1.1;P1.2); Ponto 2 (P2.1 e P2.2); Ponto 3 (P3); Ponto 4 (P4) e Ponto 5. O ponto 5, é uma zona em escavação com presença do material granular com diâmetro superior a 60 mm. Portanto houve a necessidade de colher um solo fino (P5*) para proceder com o ensaio Proctor.

A recolha de amostra foi realizada no dia 18/05/2017, como objetivo de realizar ensaios de identificação e classificação do solo; ensaio Proctor e ensaio de índice californiano de capacidade de suporte (CBR), que serão apresentados ainda neste capítulo.

Depois da realização dos ensaios, seguiu-se à realização das correlações entre os parâmetros do solo ensaiado. A correlação dos ensaios envolve um tratamento estatístico dos dados em estudo, o que requer uma representatividade em termos número de amostra ensaiadas. Neste sentido, houve necessidade de compilar-se os dados do estudo feito por autor (Rodrigues, 2015), porquanto os pontos ensaiados neste trabalho eram reduzidos.

O estudo realizado por (Rodrigues,2015) foi em quatro zonas distintas, sendo na estrada M527 (zona 1); zona industrial das Cantarias (zona 2); Moagem do Loreto (zona 3) e na Faurecia (zona 4). Em todas zonas procedeu-se a recolha de amostras em vários pontos que, por uma questão de organização serão designados por “A” neste trabalho.

5.2. Resultados da Análise Granulométrica

Para a realização das análises granulométricas, recorreu-se a norma NP EN 933-1. Para todos os pontos ensaiados os resultados da análise granulométrica estão apresentados na Figura 25 as curvas granulométricas correspondentes.

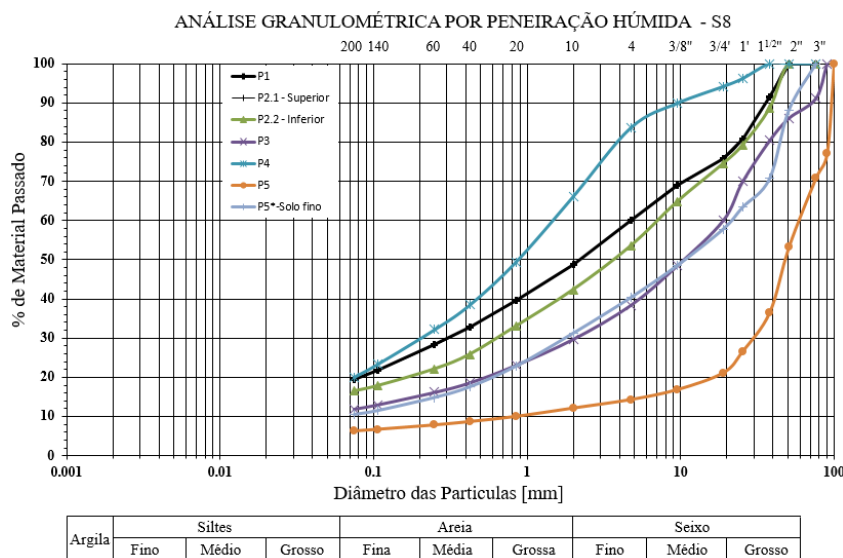


Figura 25- Análise Granulométrica por Peneiração Húmida-02/06/2017

Ponto 1

Da análise da curva granulométrica pode se concluir que se trata de uma areia siltosa com cascalho (SM), conforme o sistema unificado de classificação de solos (SUCS), normalizado pela ASTM D 2487 – 85, cujo 39.91% e 80.42% são retidos acumulados nos peneiros número 4 e 200 respetivamente, e com diâmetro efetivo (D_{10})¹ =0.03; D_{30} =0.2 e D_{60} =1.5, sendo o coeficiente de curvatura (C_c =0.9), a curva tem uma evolução suave e com isso pode se concluir que o solo é bem graduado. A análise foi realizada numa amostra colhida até cerca de 40 cm de profundidade.

Ponto 2.1

Trata-se de uma areia siltosa cascalho (SM), segundo a norma referida no parágrafo anterior. O solo tem cerca de 30.90% e 84.36% de retidos acumulados nos peneiros número 4 e 200 respetivamente e D_{10} =0.04; D_{30} =0.4 e D_{60} =3 e o coeficiente de curvatura (C_c =1.3). E como no ponto anterior, a curva tem uma evolução suave e com isso pode se

¹ Um solo com determinado diâmetro efetivo tem 10% em peso de partículas com dimensões inferiores a D_{10} . Portanto D_{30} e D_{60} tem um significado análogo a D_{10}

concluir que o solo também é bem graduado. A análise foi realizada numa amostra colhida a até 10 cm de profundidade.

Ponto 2.2

O solo classifica-se como cascalho siltoso (GM), conforme a norma citadas nos parágrafos anteriores. O solo tem cerca de 46.47% e 83.53% de retidos acumulados nos peneiros número 4 e 200 respetivamente. Os diâmetros correspondentes a 10;30 e 60 por cento de passados são: $D_{10}=0.02$; $D_{30}=0.5$ e $D_{60}=7$ e o coeficiente de curvatura ($C_c=1.8$), e novamente, a curva tem uma evolução suave e com isso pode se concluir que o solo é bem graduado. A análise foi realizada numa amostra colhida entre os 10 cm e 40 cm de profundidade.

Ponto 3

Da análise da curva granulométrica pode se concluir que trata-se de um cascalho siltoso mal graduado (GP-GM), conforme o sistema unificado de classificação de solos (SUCS).o solo tem cerca de 61.57% e 88.10% de retidos acumulados nos peneiros número 4 e 200 respetivamente e $D_{10}=0.05$; $D_{30}=2$ e $D_{60}=20$ e o coeficiente de curvatura ($C_c=4$), a curva não tem uma evolução suave e com isso pode se concluir que o solo é mal graduado. A análise foi realizada numa amostra colhida entre 10 cm e 40 cm de profundidade.

Ponto 4

Trata-se de uma areia siltosa (SM), conforme o sistema unificado de classificação de solos (SUCS), o solo tem cerca de 16.35% e 12.11% retidos acumulados nos peneiros número 4 e 200 respetivamente e $D_{10}=0.03$; $D_{30}=0.2$ e $D_{60}=1.5$. O coeficiente de curvatura ($C_c=0.9$), a curva tem uma evolução suave e com isso pode se concluir que o solo é bem graduado. A análise foi realizada numa amostra colhida entre 10 cm e 40 cm de profundidade.

Ponto 5

Da análise da curva granulométrica pode se concluir que se trata de um cascalho siltoso mal graduado (GP-GM), conforme o SUCS, o solo tem cerca de 85.72% e 93.75% de retidos acumulados nos peneiros número 4 e 200 respetivamente e $D_{10}=0.85$; $D_{30}=30$ e $D_{60}=60$. O coeficiente de curvatura ($C_c=17.6$), a curva não tem uma evolução suave e com

isso pode se concluir que o solo é mal graduado. A análise foi realizada numa amostra colhida entre 10 cm e 40 cm de profundidade.

Ponto 5 – Solo fino

Da análise da curva granulométrica pode se concluir que trata-se de um cascalho siltoso bem graduado (GW-GM), conforme o sistema unificado de classificação de solos (SUCS). O solo tem com cerca de 59.62% e 89.53% de retidos acumulados nos peneiros número 4 e 200 respectivamente e $D_{10}=0.07$; $D_{30}=1.9$ e $D_{60}=20$, o coeficiente de curvatura ($C_c=2.6$), a curva tem uma evolução suave e com isso pode se concluir que o solo é bem graduado. A análise foi realizada numa amostra colhida até cerca de 10 cm de profundidade.

Classificação do Solo

A classificação do solo, segundo o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), e conforme a norma ASTM 2487-85 está resumido na Tabela 22.

Tabela 22- Classificação do Solo segundo Sistema Unificado (ASTM-25) -02/06/2017

Fonte	Área de Ensaio	Classificação do Solo (ASTM D 2487 - 85)	
Presente Trabalho	P1	SM	Areia Siltosa com Cascalho
	P2.1	SM	Areia Siltosa com Cascalho
	P2.2	GM	Cascalho Siltoso com finos não Plásticos
	P3	GP-GM	Cascalho Siltoso mal graduado
	P4	SM	Areia Siltosa com Cascalho
	P5	GP-GM	Cascalho Siltoso mal graduado

5.3. Resultados de Ensaio Proctor

Este ensaio foi realizado segundo os procedimentos da norma internacional ASTM D-698- *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*.

A Tabela 23 apresenta o peso volúmico seco máximo e o teor de água ótimo obtidos com o ensaio Proctor para os pontos ensaiados.

Tabela 23- Resultados de Ensaio Proctor - 05/06/2017

Fonte	Área de Ensaio	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (kN/m ³)	$W_{\acute{o}pt}$ (%)
Presente Trabalho	P1	21	5.5
	P2.1	21	6.5
	P2.2	22	8.5
	P3	22	8.5
	P4	20	8.5
	P5	20	9.5

5.4. Resultados de Ensaio California Bearing Ratio (CBR)

A qualidade do material de fundação é conhecida através da sua capacidade de suporte, traduzido em termos de índice CBR, este parâmetro é usado no dimensionamento de pavimentos. No ensaio CBR a velocidade de aplicação da carga é menor do que a provocada pelo tráfego e a deformação do solo é muito maior, e mais permanente, (Minhoto, 2016).

Para além do índice CBR, é comumente usado o módulo de deformabilidade para o dimensionamento de pavimentos baseado em métodos de análise estrutural (racional). Neste sentido, surgiu a tendência para caracterizar a capacidade de suporte do solo de fundação através dum módulo de deformabilidade – que traduz a relação entre a pressão aplicada e o assentamento, (Branco et al., 2011).

O valor de módulo de deformabilidade do solo, pode ser calculado através da metodologia da Shell (expressão 11), que relaciona o módulo de deformabilidade como o índice CBR. (Rodrigues, 2015)

$$E_{sf} = 10 \cdot CBR(MPa) \quad (11)$$

Onde:

E_{sf} - Módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa);

CBR – Índice CBR para a compactação de 95%

Através da expressão (11), procede-se o cálculo de módulo de deformabilidade dos solos em estudo, cujo resumo encontra-se na Tabela 24.

Tabela 24- Ensaio CBR - 16/06/2017

Fonte	Área de Ensaio	CBR (95%)	Esf (MPa)
Presente de Trabalho	P1	23,0	230
	P2	20,0	200
	P3	12,2	122
	P4	26,4	264
	P5	21,0	210

5.5. Resultados de Ensaio de Controlo de Compactação com Célula Radioativa

Este ensaio visa controlar o grau de compactação “in situ”, o qual deve ser no mínimo igual a 95% para pavimentos rodoviários. Olhando para os resultados apresentados na Tabela 25, pode se constatar que todos os pontos ensaiados cumprem com este requisito, à exceção do ponto 2, a profundidade de 200 mm (P2.2), que apresenta um grau de compactação de 93.4%, ligeiramente abaixo de recomendado.

Tabela 25 - Ensaio de Controlo de Compactação com Célula Radioativa - 14/06/2017

Fonte	Área de Ensaio	Profundidade (mm)	$\gamma_{\text{húmido}}$ (kN/m ³)	W (%)	$\gamma_{\text{dmáx.}}$ (kN/m ³)	$\gamma_{\text{d "in situ"}}$ (kN/m ³)	GC (%)
Presente Trabalho	P1	200	19,9	6,0	20,6	18,8	95,0
	P2.1	50	23,39	6,1	23,1	22,05	95,0
	P2.2	200	21,78	9,0	21,4	19,98	93,4
	P3	200	21,73	6,0	21,0	20,55	98,0
	P4	200	20,23	5,0	20,0	19,4	97,0
	P5						

5.6. Resultados de Ensaio com o Penetrómetro Dinâmico Ligeiro (PDL)

Dependendo da profundidade, os resultados do Penetrómetro dinâmico são geralmente apresentados de três formas diferentes nomeadamente:

Número de pancadas, (Nd), para uma penetração dada (N10, N20, N30);

Resistência dinâmica unitária (rd);

Resistência dinâmica de ponta qd), derivada da fórmula holandesa:

$$rd = \frac{Mgh}{Ae} \quad (12)$$

$$qd = \frac{Mgh}{Ae} \cdot \frac{M}{M + M'} \quad (13)$$

Onde:

M- Massa do martelo (kg); g- Aceleração da gravidade (m.s⁻²);

h- Altura de queda (m)

A- Área transversal da ponteira (m²)

e- Quociente entre a penetração unitária e o número de golpes (0.1/N);

M'-Massa do conjunto ponteira, varas e batente (kg);

Com objetivo de avaliar a capacidade de suporte do solo de fundação, na Tabela 26 apresenta-se o resultado do ensaio PDL, para os primeiros 50 cm, por ser essa a profundidade máxima a que se extraiu as amostras.

Tabela 26- -Ensaio PDL - 14/06/2017

Fonte	Área de Ensaio	Profundidade (m)	N10 (média)	rd (Mpa)	qd (Mpa)
Presente Trabalho	P1	0,5	11,8	5,78	4,01
	P2	0,5	42,0	20,6	14,3
	P3	0,5	9,80	4,81	3,33
	P4	0,5	14,6	7,16	4,96
	P5	0,5	46,5	22,8	15,8

5.7. Resultados de Ensaio de Carga em Placa (ECP)

Este ensaio permite obter as curvas de carga-assentamento para cada ponto de ensaio a partir dos dados obtidos nos defletômetros e no macaco hidráulico. Obtendo-se assim os gráficos a partir dos quais são obtidos os coeficientes de reação do terreno, os assentamentos residuais e calcular o módulo de deformabilidade do solo.

Tratando-se de análise de materiais granulares em camada de pavimento, usou-se a norma de ensaio de carga francesa NF 2000 P94-117-1, e os resultados dos ensaios estão apresentados nas Figuras 26 a 31.

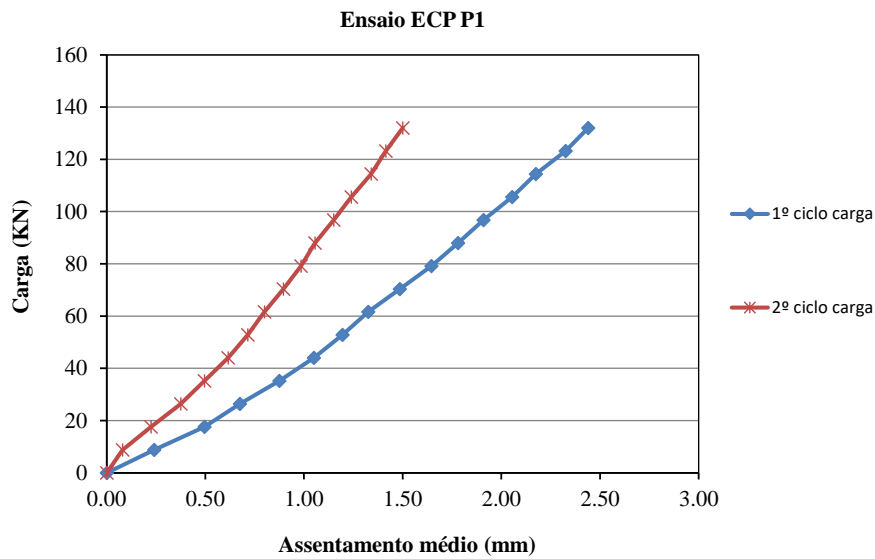


Figura 26- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P1

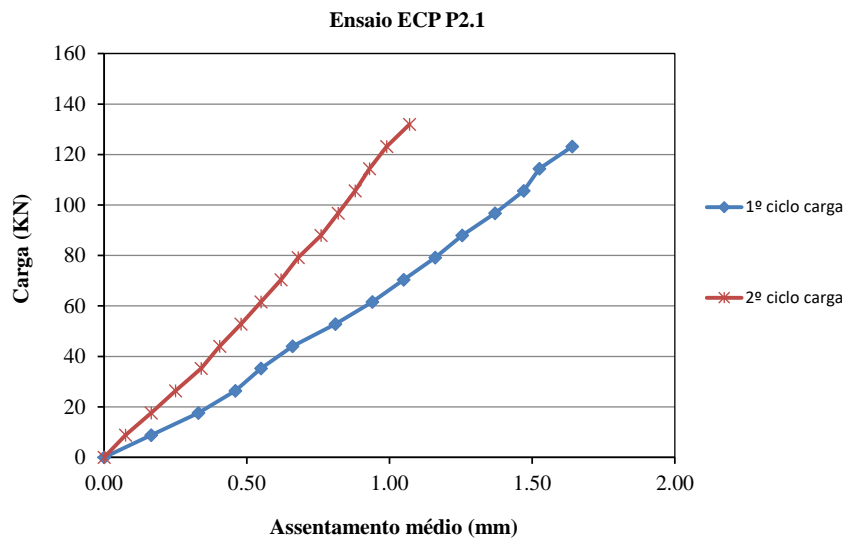


Figura 27- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P2.1

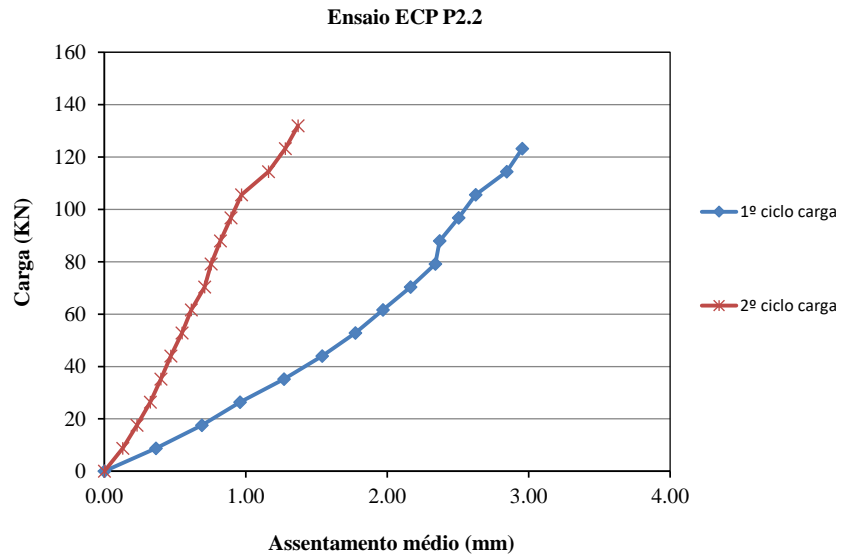


Figura 28- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P2.2

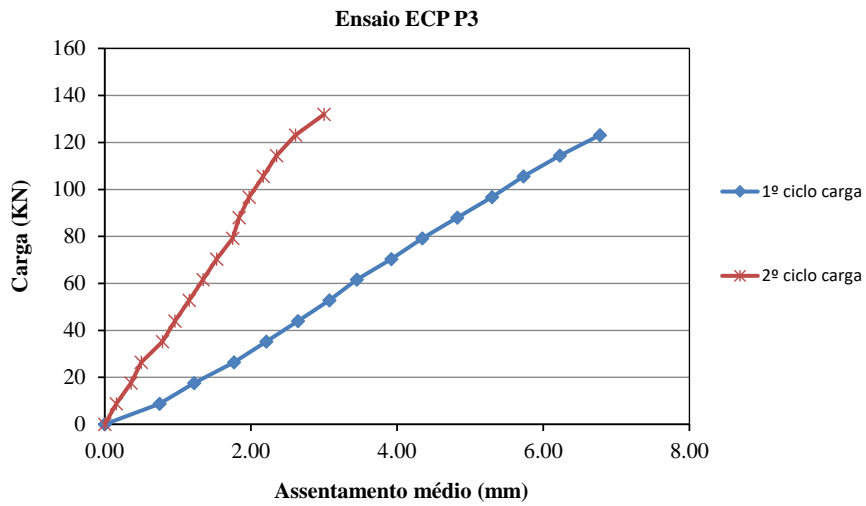


Figura 29- Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P3

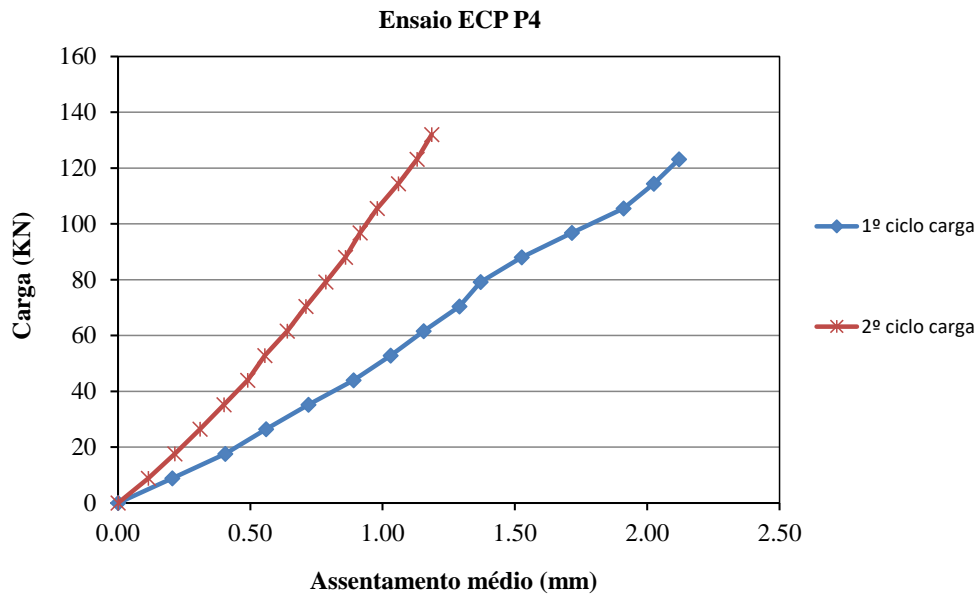


Figura 30-Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P4

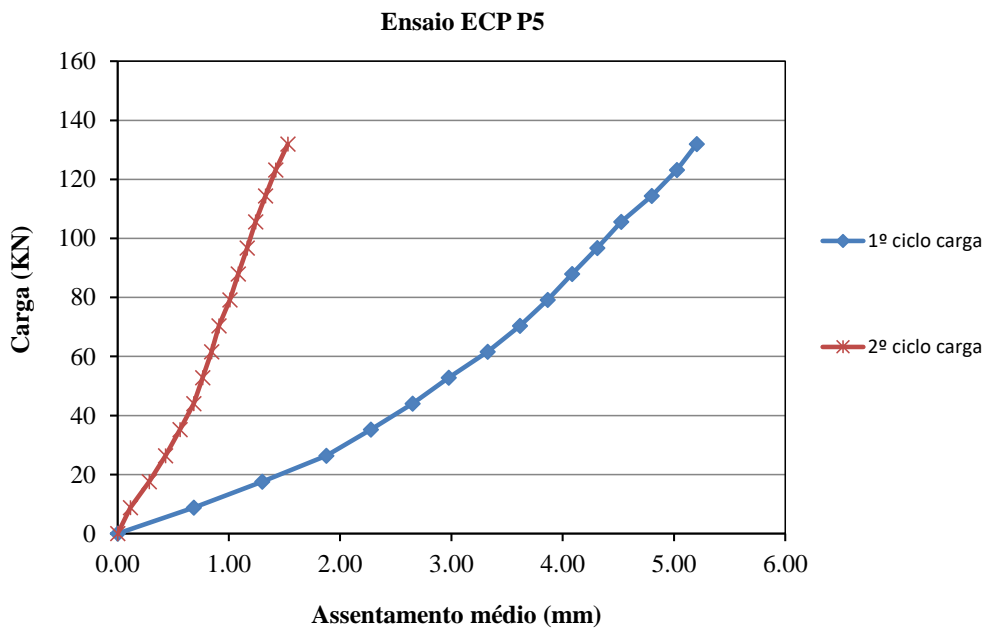


Figura 31-Curva de carga-assentamento no ponto ensaio P5

Pela análise dos gráficos de ensaio, verifica-se que os declives das curvas obtidas para o primeiro ciclo de carga são inferiores as do segundo ciclo como seria de esperar neste tipo de ensaio. O solo sofre a maior parte do assentamento irreversível no primeiro ciclo de carga restando pouca componente do assentamento para o segundo ciclo de carga.

Para além das curvas, os resultados obtidos permitem calcular o módulo de deformabilidade para cada ciclo de carga e a relação entre os módulos de deformabilidade resultante do segundo ciclo de carga com o primeiro ciclo de carga ($K=E_2/E_1$). Este valor

de K, permite avaliar a qualidade de compactação do solo, isto é, quanto mais baixo for o valor ($K < 1$) melhor é a compactação, pois menor é a diferença entre o primeiro e o segundo ciclo de carga.

Com base expressão (9), obtém-se os valores dos módulos de deformabilidade e com a expressão (10), os valores de K apresentados na Tabela 27.

Tabela 27-Resultados do Ensaio de Carga em Placa (22/06/2017)

Fonte	Área de Ensaio	EV1 (Mpa)	EV2 (Mpa)	K
Presente Trabalho	P1	75,53	122,86	1,62
	P2.1	104,88	172,23	1,64
	P2.2	58,21	134,51	2,31
	P3	25,39	61,43	2,42
	P4	81,13	155,51	1,92
	P5	35,41	120,45	3,4

Os pontos P2.1 e P4 apresentam os módulos de deformabilidade mais elevados com valores de ($EV_2=172.23\text{MPa}$ e 155.51MPa) respetivamente. Estes resultados eram espectáveis visto que no ensaio de controlo de compactação com célula radioativa obteve-se valores elevados e muito próximos para os mesmos pontos ($GC=95.6\%$ e $GC=97\%$).

Os módulos de deformabilidade do solo são próximos ($EV_2=122.86\text{MPa}$; 134.51MPa e 120.45MPa), para os pontos P1, P2.2 e P5, respetivamente.

O ponto P3 apresenta o módulo de deformabilidade de 61.43MPa . Este valor é baixo e não era expectável, visto que para o mesmo ponto de ensaio apresenta um grau de compactação elevado ($GC=98\%$).

Quanto a relação K, é superior nos pontos P2.2, P3 e P5, este resultado não era o esperado no ponto (P3), por este ter maior grau de compactação, contrariamente no ponto (P2.2), visto que este ponto tem menor grau de compactação.

5.8. Correlações entre Ensaios

Depois da campanha de ensaios realizados no campo e no laboratório, e com base nos resultados apresentados nas secções anteriores, segue-se nesta secção a apresentação das possíveis correlações existente entre os resultados dos ensaios do solo estudado, como objetivo de se avaliar de que forma esses parâmetros se correlacionam, para melhor serem aplicados nos critérios de dimensionamento de pavimentos de estradas de baixo volume de tráfego.

Sendo o índice CBR; Módulo de deformabilidade do solo (EV₂); o Grau de Compactação (GC); a taxa de penetração (N10), parâmetros de grande interesse na avaliação da capacidade de suporte do solo de fundação achou-se interessante realizar possíveis correlações entre estes parâmetros.

Serão feitas as correlações dos ensaios realizados, para solo classificado como (SM e GM). O número de amostras dos solos ensaiados é bastante reduzido, assim, compilou-se os dados da dissertação do David Rodrigues (Rodrigues, 2015), visto que o autor realizou as mesmas correlações em solos de classes SM e GM. Na Tabela 28 apresenta-se os resultados dos ensaios a serem correlacionados.

Tabela 28-Resumo de resultados dos ensaios

Fonte	Pontos de Ensaio	Classificação do solo ASTM D-2487-85	Índice de Consistência (IC)	CBR Correspondente ao GC "in situ" (%)	N10 (médio)	Grau de Compactação "in situ" (%)	Módulo de deformabilidade (MPa)		
							EV1	EV2	
Solos Compactados "in situ" (Aterros)									
Presente Trabalho	P1	SM	NP	23	11.8	95	75.53	122.46	
	P4	SM	NP	26.4	14.6	97	81.13	155.51	
Rodrigues, 2015	A1.1	GW-GM	NP	8	21.4	92			
	A1.2	GM	NP	41	48.75	99	143.3	284.06	
	A1.3	GM	NP	47	84.5	100	72.27	118.42	
	A1.4	GM	NP	45	42.75	99.6	112.5	186.85	
	A1.5	GM	NP	40	36.6	99.5			
	A1.6	GM	NP	21	39.6	97	119.3	166.6	
	A1.7	GM	NP	28	38	98	167.2	215.5	
	A2.1	GM	NP	20	38.2	98.2			
	A2.2	SM	NP	14	15.4	94			
	A2.3	GM	NP	12	48.7	95			
	Solos Naturais (escavação)								
		A3.1	SC			11.8	73.4		
		A3.2	GC			7.8	70		
		A3.3	SC			29.4	88.2		
		A4.1	CL	Dura		14.8	80.7		
	A4.2	SM	Dura	7	21.8	94			
	A4.3	SM	Dura	10	34.6	91			
	A4.4	SM	Dura	8	19.2	87			
Presente Trabalho	P2.1	SM	NP	20	42	95.6	104.9	172.23	
	P2.2	GM	NP	20	42	93.4	58.21	134.51	
	P3	GP-GM	NP	12.2	9.8	98	25.39	61.43	
	P5	GP-GM	NP	21	46.5		35.41	120.45	

Correlações entre ensaios em Solos de Classes SM e GM

Os parâmetros analisados correspondem ao grau de compactação “*in situ*”, além das correlações também foram representados os limites inferiores e superiores de confiança a 95% (LIC 95% e LSC 95%, respectivamente), determinados através da distribuição de probabilidades T-Student. Usou-se esta distribuição por ser a mais correta quando o número de amostras é limitado. O intervalo de confiança é o intervalo com 95% de probabilidade de ocorrer a situação desejada.

A seguir apresentados os resultados das correlações referentes à combinação das classes SM e GM. Os dados retirados do trabalho de Rodrigues (2015), estão destacados com a cor azul.

Correlação entre CBR e N₁₀

Na Figura 32 está representado a correlação entre o índice CBR e o N₁₀. O coeficiente de correlação linear ($R^2=0,2883$), este valor é muito baixo (menor que um), o que exprime que não há correlação entre estes dois parâmetros em análise. O limite inferior e superior de confiança a 95% estão muito afastados dos resultados obtidos, o que indica a elevada variabilidade dos resultados. A relação obtida entre os parâmetros tem a seguinte expressão.

$$CBR = 0.5852 \cdot N_{10} + 5.4605 \quad (14)$$

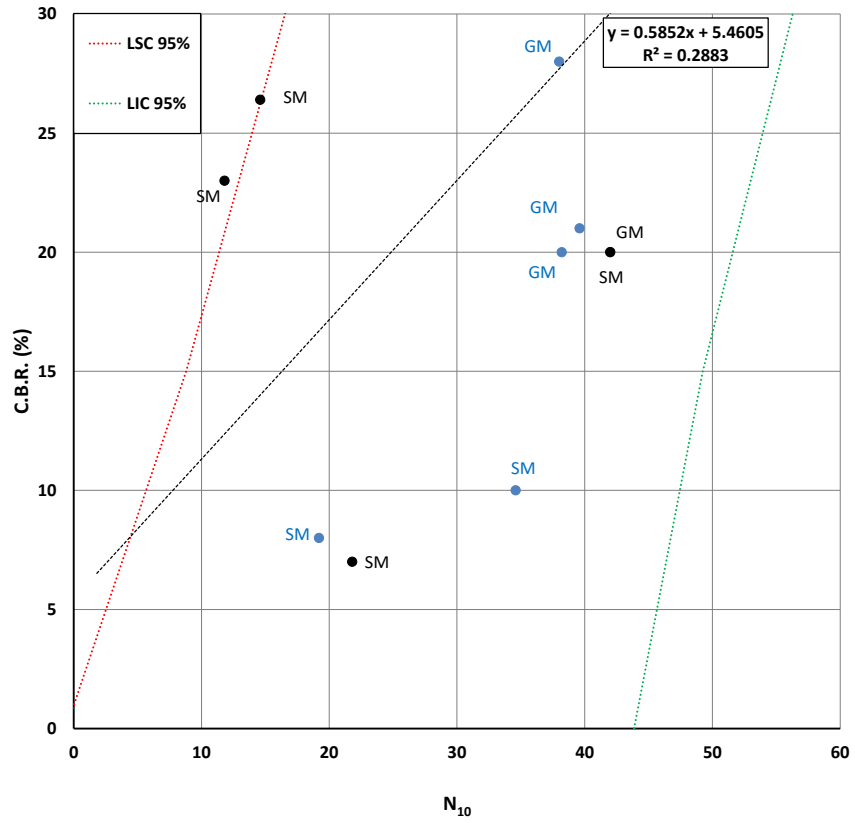


Figura 32-Correlação entre CBR e N10 em solos de classe SM GM

Na Figura 33 é apresentada a mesma correlação que a figura anterior, mas acrescentando o ponto de coordenadas (0,0).

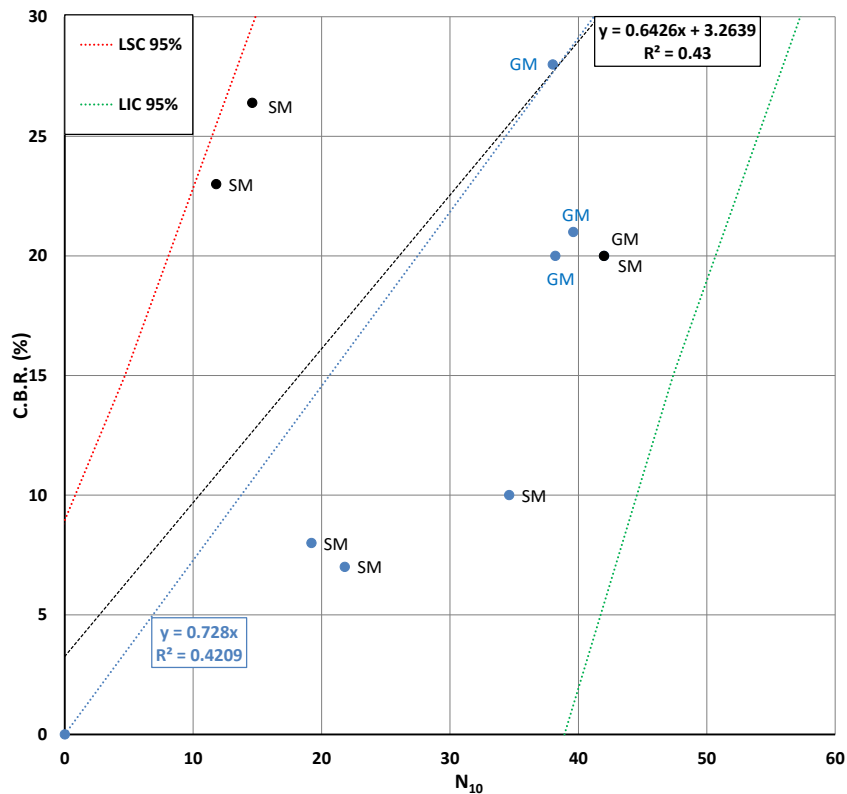


Figura 33-Correlação entre CBR e N₁₀ em solos de classe SM GM com início à origem

Pode se observar que das duas correlações lineares obtidas, continua a não haver tendência de correlação entre os dois parâmetros. A reta de cor preta representa a curva de tendências obtida com o acréscimo do ponto (0,0). Esta curva não passa pela origem e tem a seguinte expressão:

$$CBR = 0.6426.N_{10} + 3.2639 \quad (15)$$

Cujo coeficiente de correlação é de $R^2 = 0.43$; este valor é muito baixo e confirma o que foi dito no parágrafo anterior.

A reta de cor azul representa a reta de tendências obtida com o acréscimo do ponto (0,0) e forçando a reta de correlação linear a passar pela origem. Esta reta apresenta a seguinte expressão:

$$CBR = 0.728.N_{10} \quad (16)$$

O coeficiente de correlação é de $R^2 = 0.4209$; este valor continua baixo e novamente mostra não haver tendência de correlação entre os parâmetros.

Correlação entre GC e N10

Na Figura 34, está representado a correlação entre o grau de compactação (GC) e o N_{10} . O coeficiente de correlação linear é de ($R^2 = 0,2574$), este valor é muito baixo, o que exprime que não há correlação entre estes dois parâmetros em análise. A relação obtida entre os parâmetros tem a seguinte expressão.

$$GC = 0.1541N_{10} + 90.757 \quad (17)$$

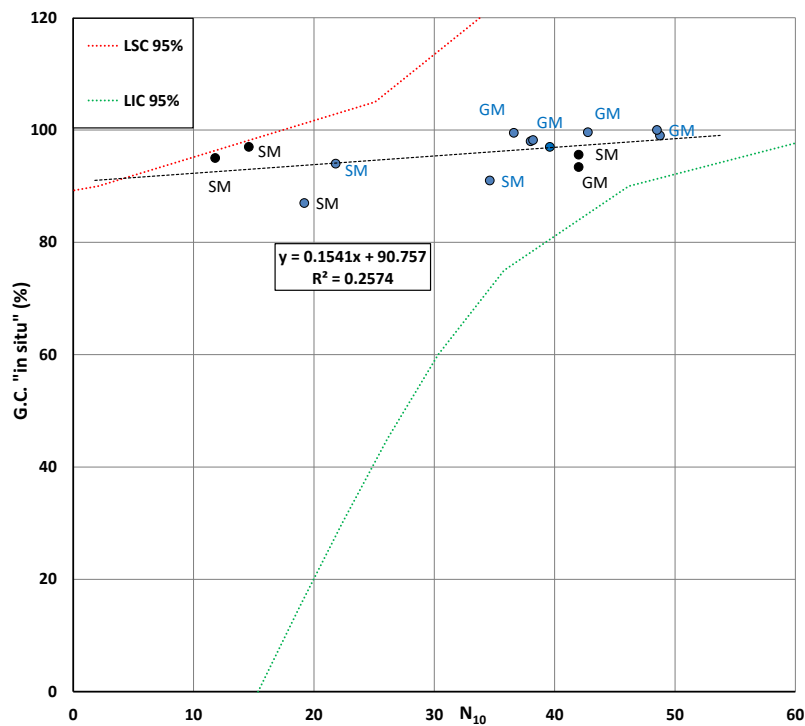


Figura 34-Correlação entre GC e N10 em Solos SM e GM

Figura 34, apresenta-se a mesma correlação que a figura anterior, mas acrescentando o ponto de coordenadas (0;0) para forçar a reta de tendências a passar pela origem.

Da Figura 35 Pode se observar que a curva de tendências (cor preta), tem a seguinte expressão:

$$GC = 1.109N_{10} + 90.757 \quad (18)$$

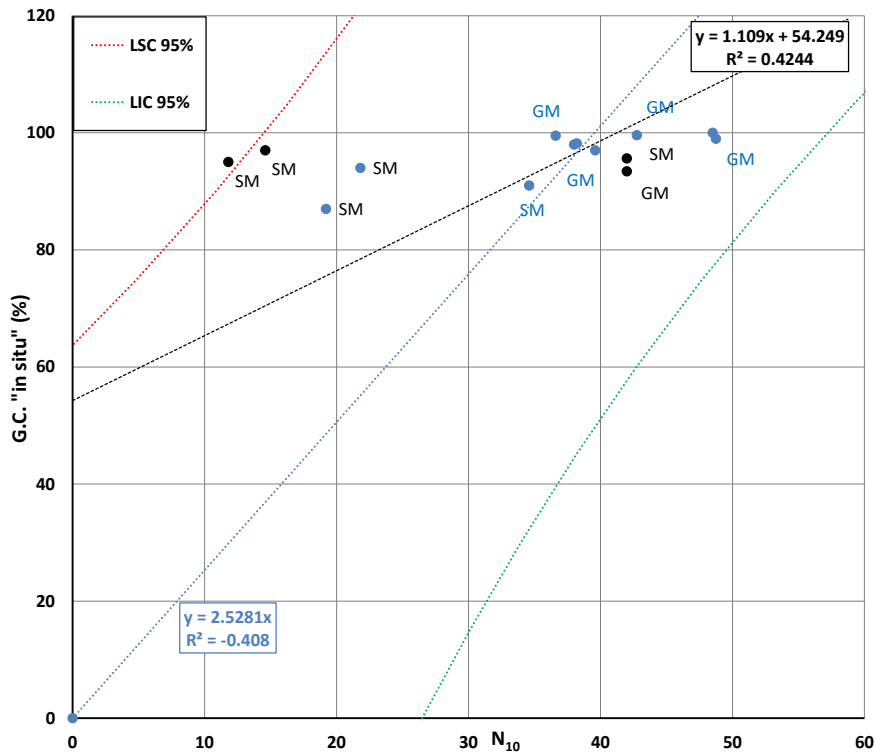


Figura 35-Correlação entre GC e N10 no Solo SM e GM com início à origem

O coeficiente de correlação é de $R^2 = 0.4244$; este valor é muito baixo, o que implica que continua não haver correlação entre os parâmetros em estudo (GC e N10). A reta de tendências tem seguinte expressão:

$$GC = 2.5281N_{10} \quad (19)$$

Cujo coeficiente de correlação é de $R^2 = -0.408$; este valor é negativo. Assim não faz sentido fazer este tipo de relação para os parâmetros em estudo.

Correlação entre E_{V2} e N10

Na Figura 36 está representado a correlação entre o módulo de deformabilidade (E_{V2}) com N10. O coeficiente de correlação linear (R^2) é de 0,1562; este valor é muito baixo. Logo, não há correlação entre os dois parâmetros em estudo. O limite inferior e superior de confiança a 95% estão muito afastados dos resultados obtidos, o que indica a elevada variabilidade dos resultados.

A relação obtida entre os parâmetros pode ser tem a seguinte expressão.

$$EV2 = 1.5058N_{10} + 118.03 \quad (20)$$

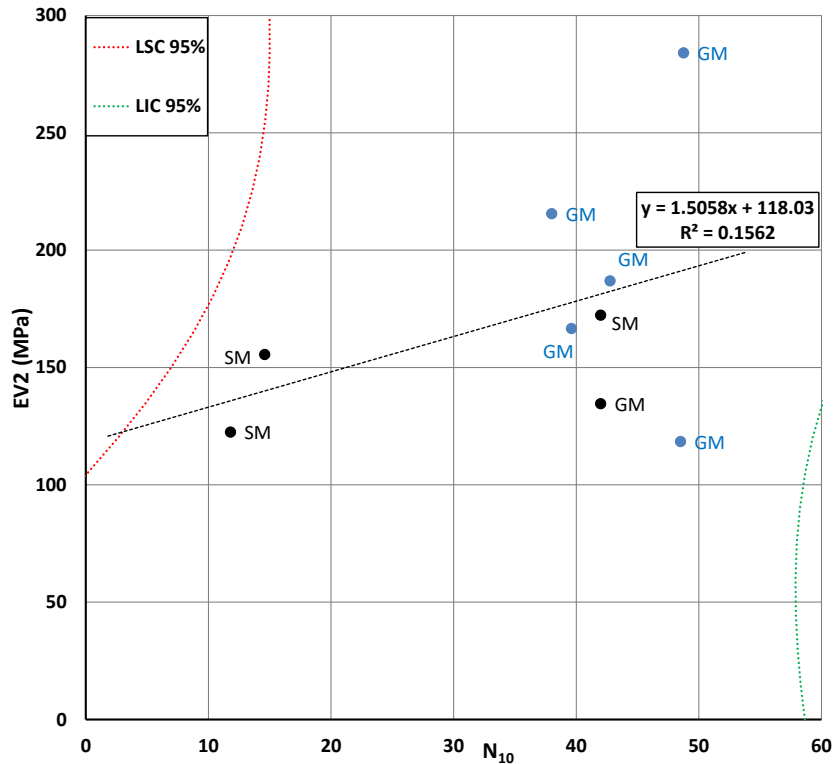


Figura 36-Correlação entre EV2 e N₁₀ em Solo SM e GM

A Figura 37, apresenta a mesma correlação que a figura anterior, mas acrescentou-se o ponto de coordenadas (0,0). A curva de tendências, não passa pela origem e tem a seguinte expressão:

$$EV2 = 2.9447.N_{10} + 59.031 \quad (21)$$

O coeficiente de correlação é de $R^2 = 0.48$; este valor é muito baixo, o que implica não haver correlação. A reta de tendências, passa pela origem e tem a seguinte expressão:

$$EV2 = 4.3843.N_{10} \quad (22)$$

E o coeficiente de correlação é de $R^2 = 0.3366$; este valor é muito baixo, e reforça o que foi dito no parágrafo anterior.

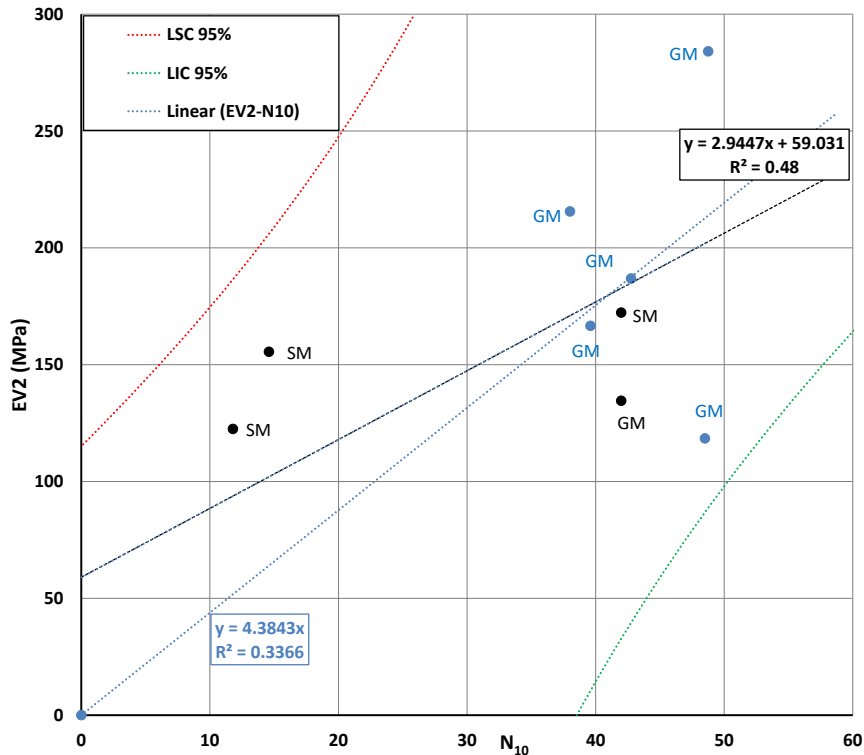


Figura 37-Correlação entre N10 e Módulo de deformabilidade do Solo SM e GM com início à origem

Correlação entre CBR e GC

Na Figura 38 está representado a correlação entre CBR e GC. O coeficiente de correlação linear (R^2) é de 0,6674; este valor é próximo de uma unidade, o que significa que há alguma correlação entre estes dois parâmetros em análise, apesar de muito limitativo. O limite inferior e superior de confiança a 95% estão muito próximos dos resultados obtidos, o que indica que há pouca variabilidade dos resultados. A relação obtida entre os parâmetros tem a seguinte expressão.

$$CBR = 2.932GC - 256.12 \quad (23)$$

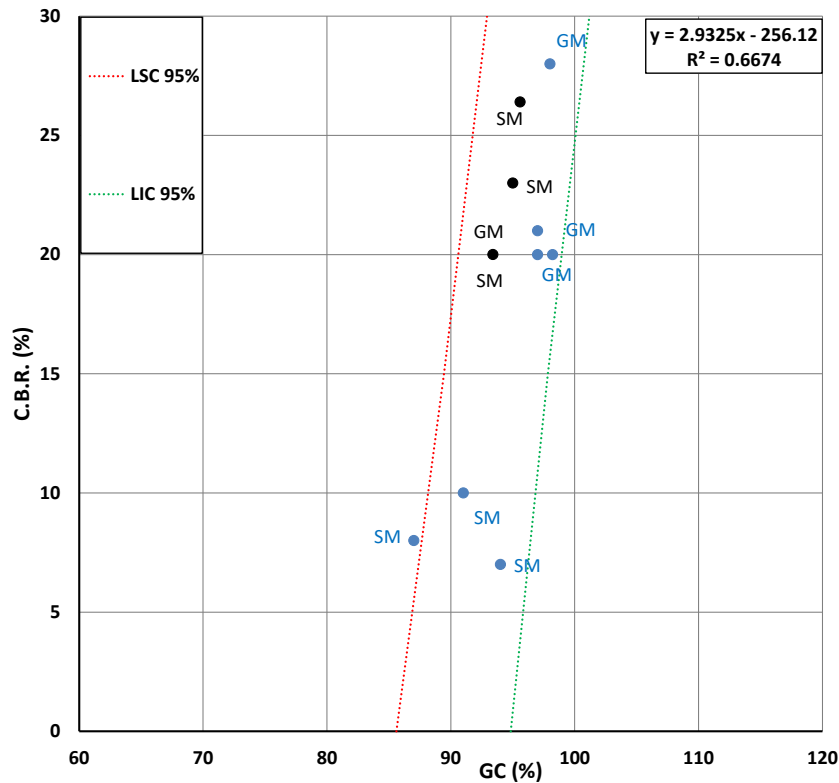


Figura 38-Correlação entre CBR e GC em solos SM e GM

Ao acrescentar o ponto de coordenadas (0,0) à Figura 38, obtém-se a correlação como mostra a Figura 39, na qual pode se observar que das duas correlações lineares realizada, perde-se a tendência de correlação entre parâmetros em estudo. Os limites de confiança a 95% encontram-se afastados dos pontos usados na correlação. A reta de cor preta representa a curva de tendências obtida com o acréscimo do ponto (0,0). Esta curva não passa pela origem e tem a seguinte expressão:

$$CBR = 0.3195.GC - 4.8701 \quad (24)$$

O coeficiente de correlação é $R^2 = 0.308$; este valor é muito baixo, o que mostra que não há correlação. A curva de tendência apresenta a seguinte expressão:

$$CBR = 0.2688.GC \quad (25)$$

E o coeficiente de correlação $R^2 = 0.2997$; este valor é muito baixo e reforça o que foi referido no parágrafo anterior.

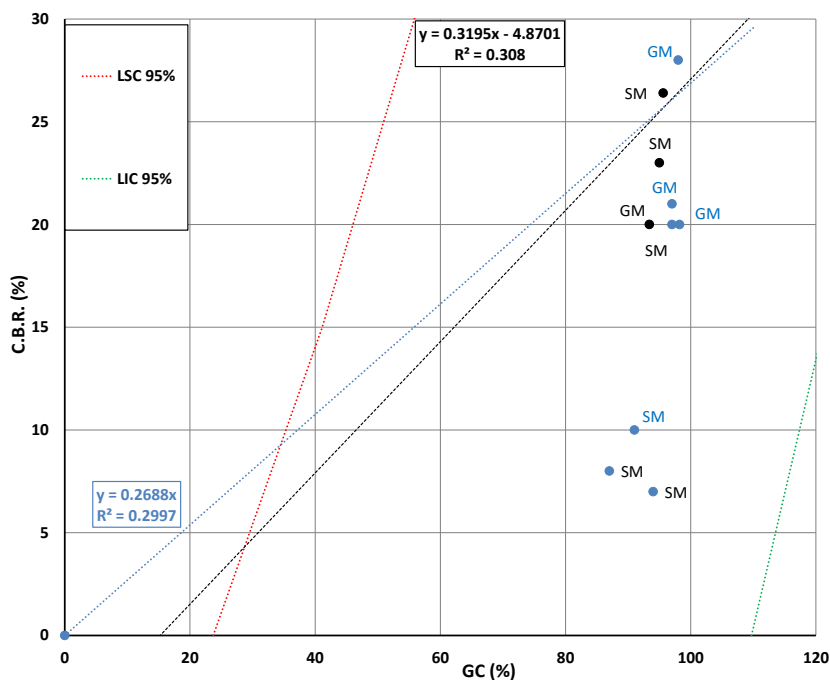


Figura 39-Correlação entre CBR e GC em solos SM e GM com início à origem

Correlação entre CBR e EV2

Na Figura 40 apresenta-se a correlação entre o CBR e EV2. O coeficiente de correlação linear (R^2) é de 0,0908; este valor é praticamente nulo. Implica que não há correlação entre os parâmetros em estudo.

A relação obtida entre os parâmetros tem a seguinte expressão:

$$CBR = 0.0641EV2 + 0.0908 \quad (26)$$

Quando se acrescenta o ponto de coordenadas (0,0) à Figura 40, obtem-se o gráfico da Figura 41, cuja curva de tendência tem a seguinte expressão:

$$CBR = 0.1252.EV2 + 7.6631 \quad (27)$$

O coeficiente de correlação é de $R^2 = 0.423$. este valor é muito baixo, o que mostra que não há correlação. A reta de tendências tem a seguinte expressão:

$$CBR = 0.1662.EV2 \quad (28)$$

E o coeficiente de correlação é de $R^2 = 0.3684$; este valor é muito baixo. Implica não há correlação ou é praticamente nula.

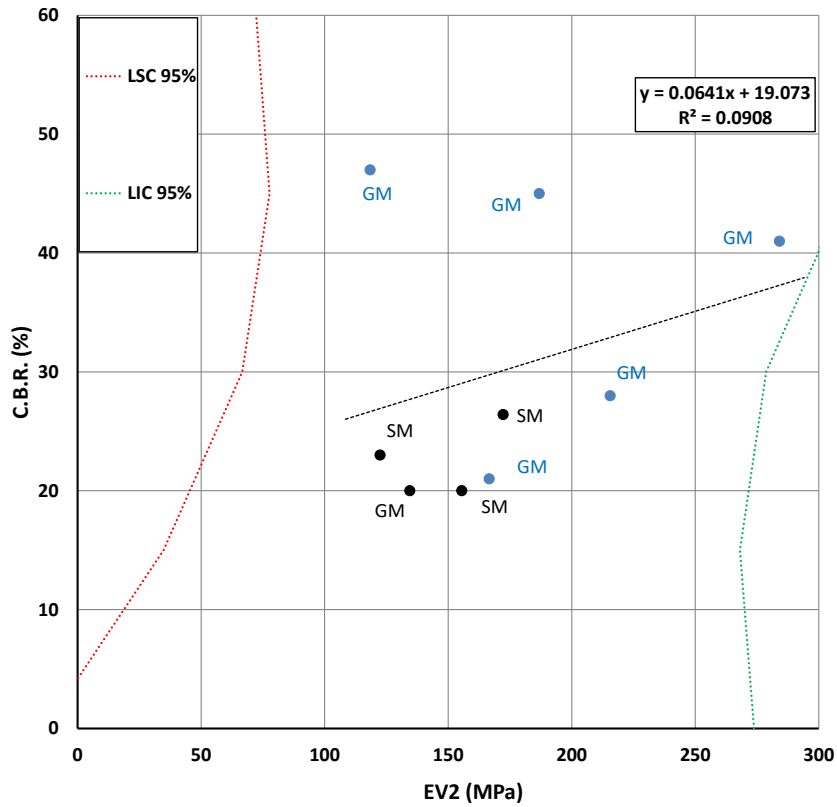


Figura 40-Correlação entre CBR e EV2 em solos SM e GM

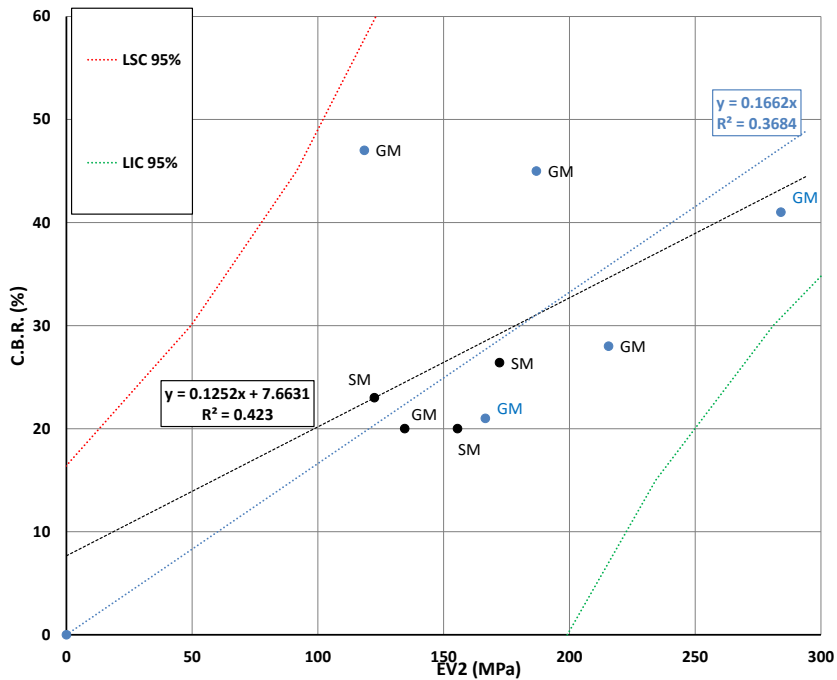


Figura 41-Correlação entre CBR e EV2 em solos SM e GM com início à origem

Correlação entre EV2 e GC

Na Figura 42 apresenta-se a correlação entre o EV2 e GC. O coeficiente de correlação linear (R^2) é de 0.1678; este valor é praticamente nulo, o que significa que não há correlação entre estes dois parâmetros em estudo. A relação obtida entre os parâmetros tem seguinte expressão.

$$EV2 = 9.6713.GC - 0.1678 \quad (29)$$

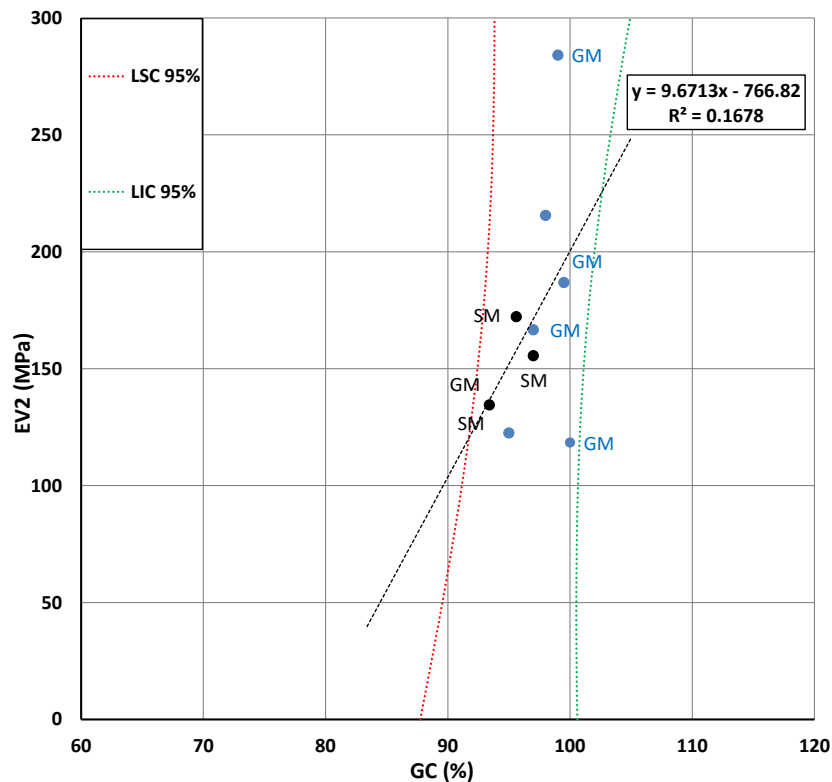


Figura 42-Correlação entre EV2 e GC em solos SM e GM

Acrescentando o ponto de coordenadas (0,0), é possível apresentar a correlação mostrada na Figura 43, cuja curva de tendências tem a seguinte expressão:

$$EV2 = 1.8155.GC - 3.1466 \quad (30)$$

O coeficiente de correlação $R^2=0.5788$; este valor é muito baixo, o que mostra que não há correlação. A reta de tendências tem a expressão seguinte:

$$EV2 = 1.7831.N_{10} \quad (31)$$

E o coeficiente de correlação $R^2 = 0.5786$. continua não haver correlação.

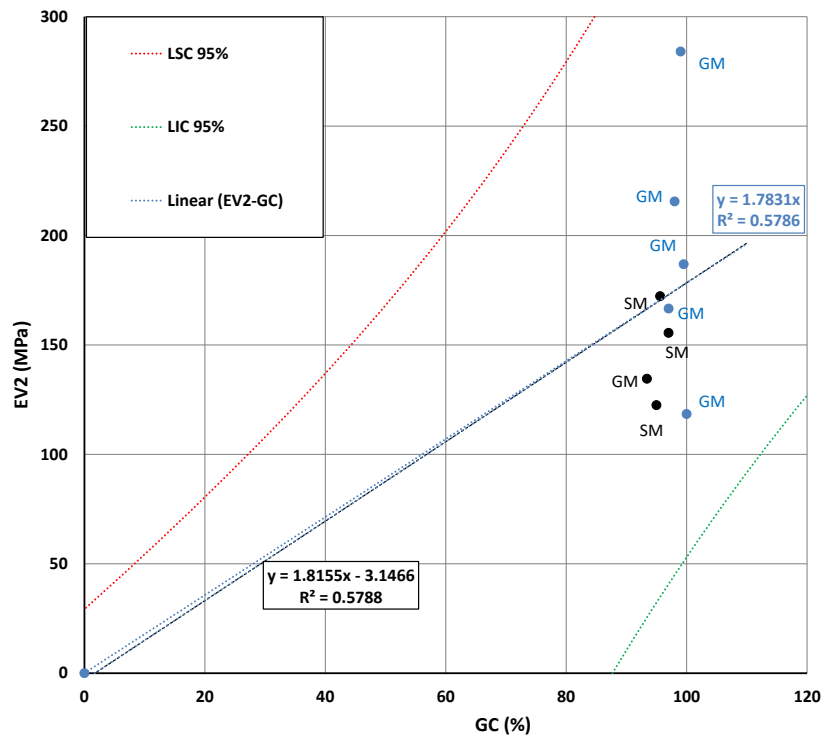


Figura 43-Correlação entre EV2 e GC em solos SM e GM com início à origem

Na Tabela 29 apresenta-se o resumo dos resultados das correlações entre os parâmetros do solo ensaiados.

Tabela 29-Resumo de resultados das correlações feita

Correlação Linear em Solos SM e GM						
Modos de Correlação Linear	Correlação Linear entre CBR e N10	Coefficiente de Correlação	Correlação Linear entre GC e N10	Coefficiente de Correlação	Correlação Linear entre EV2 e N10	Coefficiente de Correlação
1	CBR=0,5852.N10+5,5605	0,2883	GC=0,1541.N10+90,757	0,2574	EV2=1,5058.N10+118,03	0,1562
2	CBR=0,6426.N10+3,2639	0,43	GC=1,109.N10+90,757	0,4244	EV2=2,9447.N10+59,031	0,48
3	CBR=0,728.N10	0,4209	GC=2,5281.N10	-0,408	EV2=4,3843.N10	0,3366
Correlação Linear em Solos SM e GM (continuação)						
Modos de Correlação linear	Correlação Linear entre CBR e GC	Coefficiente de Correlação	Correlação Linear entre CBR e EV2	Coefficiente de Correlação	Correlação Linear entre EV2 e GC	Coefficiente de Correlação
1	CBR=2,932.N10-256,12	0,6674	CBR=0,0641.N10+0,0908	0,0908	EV2=9,6713.N10-0,1678	0,1678
2	CBR=0,3195.N10-4,8701	0,308	CBR=0,1252.N10+7,6631	0,423	EV2=1,8155.N10-3,1466	0,5788
3	CBR=0,2688.N10	0,2997	CBR=0,1662.N10	0,3684	EV2=1,7831.N10	0,5786

Considerações Finais

Dos resultados das correlações apresentados, verifica-se que não existem uma razoável correlação entre os parâmetros analisados, excetuando a correlação entre o índice CBR e GC, que mostra uma tendência de correlação entre os dois parâmetros.

Assim, depois do estudo das correlações feito podem ser apontadas algumas conclusões parciais, tais como:

- Todas as correlações feitas com N_{10} , apresentam um coeficiente de correlação muito baixo, o que pode ser entendido como um parâmetro com baixa fiabilidade para a correção com outros parâmetros do solo;
- O reduzido número de amostras ensaiadas, não tem influencia nenhuma nos resultados das correlações, não justificando a realização de futuros trabalhos com a mesma linha de pesquisa;
- Pelos resultados obtidos na correlação entre EV2 e GC, pode se concluir que são dois parâmetros que não oferecem fiabilidade na sua relação.

6. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Neste capítulo comparam-se os métodos mais correntes de dimensionamento de EBVT. Os métodos aplicados são empíricos, usando como parâmetro principal o índice CBR a 95% de compactação no laboratório e outros dados hipoteticamente atribuídos como é o caso de tráfego e vida útil do projeto.

A comparação faz-se através da obtenção de estruturas por diferentes métodos, para diversas situações de tráfego de projeto.

6.1.Caso de Estudo

Pretende comparar os métodos de dimensionamento de pavimento para uma estrada a ser requalificada no Município de Bragança, região Trás-os-Montes, uma região cujo clima predominante é moderado a seco, (JAE,1999).

Trata-se de uma ciclovia, com uma extensão de aproximadamente 2.4 km, dividido em cinco secções. Em termos de quantidade de tráfego é de pouco impacto, ou seja, não se espera que circule mais de um milhão de eixos Padrão durante a vida útil do pavimento. Porém não tendo sido feito estudo do tráfego para o efeito de dimensionamento, serão consideradas as classes de tráfego, dentro do limite de eixos padrão equivalente considerado na abordagem de EBVT, isto é, das classes LV2 a LV5.

Quanto a classe da fundação, será usada a classe definida através do ensaio CBR a 95% de compactação no laboratório.

1.Método de TRL/SADC (1999)

No apêndice A.6, Apresenta-se o exemplo de dimensionamento para a secção 3 (0.9 km) de extensão. O procedimento é o mesmo para as restantes secções.

Considerou os seguintes dados para o exemplo apresentado no apêndice A.6:

Classe de Tráfego: T1 =10 000 ESA, como pode ser observado na Tabela 7

Classe de Fundação: a secção 3 tem o valor de CBR=12.2, logo é S4. Pode ser observado na Tabela 8

Estrutura de pavimento: Considera-se a utilização do Quadro 2 do Anexo I, para $N > 4$, por se tratar de uma estrada em clima moderado a seco. Resulta, assim, que a estrutura do pavimento a considerar é de uma camada de desgaste em cascalho com 150 mm de espessura e um revestimento em betuminoso.

Na Tabela 30 apresenta-se as estruturas de pavimento resultante do dimensionamento pelo método TRL/SADC para todas secções.

Tabela 30-Estruturas de pavimentos de todas as secções pelo método TRL/SADC:

Método de TRL/SADC (1999)									
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)					
				T1 (<0.01)	T2 (0.05)	T3 (0.1)	T4 (0.3)	T5 (0.5)	T6 (1.0)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
2-Escavação	0.9 km	20			200 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45 e 120 mm de Sub-base, CBR 15	150 mm de Base, CBR 55 e 120 mm de Sub-base, CBR 15	200 mm de Base, CBR 55 e 120 mm de Sub-base, CBR 30	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4		150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5		150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
5-Escavação	0.25 km	21			150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30

2.Método de SATCC (1998)

No apêndice B.6, apresenta-se o exemplo de dimensionamento para mesma secção considerada no método (TRL/SADAC). O processo é repetido para todas secções em estudo.

Classe de fundação: A classe de fundação a considerar é a S4 conforme pode ser observado no Tabela 8

Classe de tráfego: Da análise da Tabela 12 resulta que a classe de tráfego correspondente será de T1 para um tráfego <300 000 ESA.

Estrutura de Pavimento: Considera-se a utilização do Gráfico D1 para regiões seca, para pavimentos com base e sub-base granulares (Anexo II – Quadro 3), para $N > 4$, por se tratar de uma estrada em clima seco e com largura da faixa inferior a 7 metros. Os tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto são obtidas através da Tabela 34 do anexo IV. Resulta, assim, a estrutura do pavimento a considerar é de uma camada de base com 150 mm de espessura

(CBR > 80%) e uma camada de sub-base com 100 mm (CBR > 30%) e uma capa de revestimento de mistura asfáltica à quente.

Na Tabela 31 apresenta-se as estruturas para cada extensão determinada através do método SATCC

Tabela 31-Estruturas de pavimento de todas as secções pelo método SATCC

Método de SATCC (1998)					
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)	
				T1 (≤0.3)	T2 (0.3 -0.7)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	200 mm de Base, CBR>80%	200 mm de Base, CBR>80%
2-Escavação	0.9 km	20			
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4	150 mm de Base, CBR >80% e 100 mm de Sub-base, CBR>30%	151 mm de Base, CBR >80% e 150 mm de Sub-base, CBR>30%
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5	200 mm de Base, CBR>80%	200 mm de Base, CBR>80%
5-Escavação	0.25 km	21			

3.Método de Catálogo Road Note 31

No apêndice C.6, apresenta-se o mesmo exemplo de dimensionamento referido nos métodos anteriores.

Classe de fundação: A classe de fundação a considerar é a S4 conforme pode ser observado no Tabela 8

Classe de tráfego: Da análise da Tabela 16 resulta que a classe de tráfego correspondente será de T1 para um tráfego <300 000 ESA.

Estrutura de Pavimento: Considera-se a utilização do catálogo1 para camada de base e de sub-base em material granular. Os tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto são obtidas através da Tabela 34 anexo IV. A estrutura do pavimento a considerar é de uma camada de base com 150 mm de espessura e uma camada de sub-base com 125 mm e uma espessura fina de revestimento de betuminoso.

Para o resto do traçado os resultados estão apresentados na Tabela 32

Tabela 32-Estruturas do pavimento obtidos pelo método de catálogo de Road Note 31

Método de Road Note 31					
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)	
				T1 (≤ 0.3)	T2 (0.3 -0.7)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	150 mm de Base granular e 100 mm de Sub-base granular	200 mm de Base, CBR >80%
2-Escavação	0.9 km	20			
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4	150 mm de Base granular e 125 mm de Sub-base granular	150 mm de Base e 175 mm de Sub-base
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5	150 mm de Base granular e 100 mm de Sub-base granular	150 mm de Base e 100 mm de Sub-base
5-Escavação	0.25 km	21			

4.Método de Catálogo de Moçambique

Classe de fundação: a classe de fundação para um solo com índice CBR=23% é S4

Classe de tráfego: considerou-se a classe de T1 (0.01 milhão de ESA).

Condições climáticas: Bragança, é uma zona com clima moderado a seco, $N > 4$. Usou o catálogo 2 do anexo IV e resultado numa estrutura de 150 de G45 (Características constantes na Tabela 34 do anexo IV).

Os resultados para as restantes secções do traçado são apresentados na Tabela 33

Tabela 33-Estruturas do pavimento obtidos pelo método de catálogo de Moçambique

Método de Catálogo de Moçambique (ANE,2014)								
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)				
				T1 (<0.01)	T2 (0.01 -0.1)	T3 (0.1-0.3)	T4 (0.3-0.5)	T5 (0.5-1.0)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	150 G45	175 G55	175 G55	175 G55	175 G65
2-Escavação	0.9 km	20						
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4		150 G45	150 G55	175 G55	175 G65
					100 G30	150 G30	175 G30	200 G30
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5		175 G45	175 G55	175 G55	175 G65
5-Escavação	0.25 km	21						

6.2. Comparação de estruturas de pavimentos

Nesta secção comparam-se quatro métodos diferentes geralmente usados em África nomeadamente: o método TRL/SADC; o método SATCC; o método de catálogo de Road Note 31 e o método de catálogo De Moçambique. A comparação foi feita na seção 3 em escavação para a classe de 0.3 milhões de ESA e classe de fundação S4. As estruturas de

pavimento determinadas, apesar da sua simplicidade, são representativas dos pavimentos dimensionados para a grande maioria das EBVT.

Para todas as estruturas dimensionadas considerou-se um revestimento superficial, sem nenhuma função estrutural, mas para reduzir a entrada da água no pavimento e para melhorar o conforto dos utentes. Os resultados apresentados na Figura 44, mostram um aumento claro da espessura de camadas exigidas pelo método de catálogo de Moçambique, sendo o que pode demandar mais custos iniciais em termos de construção e o método SATCC exige uma redução da espessura de sub-base. Sendo os métodos TRL/SADC e Catalogo de Road Note 31 os que demanda a mesma espessura.



Figura 44-Comparação das estruturas de pavimentos obtidos com diferentes métodos

7. CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

As estradas de baixo volume de tráfego (EBVT) são definidas como as estradas nas quais circulam menos de cerca de 300 veículos por dia e cerca de um número acumulado eixos padrão de 1 milhão ao longo da sua vida útil.

Quanto à estrutura de pavimento, as estradas de baixo volume de tráfego consistem tipicamente em uma ou mais camadas de material com diferentes características de resistência, cada camada com o objetivo de distribuir a carga que recebe no seu topo às camadas subjacentes. As camadas granulares estão sujeitas a deformações permanentes devido à ação do tráfego. Todavia, a ação do tráfego não é o principal fator que condiciona a degradação de EBVT, sendo os fatores ambientais os que governam o mecanismo de degradação dos pavimentos em estradas de baixo tráfego. A ação da água da chuva constitui um grande desafio aos projetistas deste tipo de pavimento, isto porque a concepção de EBVT privilegia o uso de material local, não padronizado e de baixo custo. Este fator aliado às condições de drenagem, condicionam em grande medida o desempenho da fundação.

A capacidade de suporte do solo onde é fundado o pavimento constitui um dado preponderante na concepção do mesmo e na escolha do material que constitui as camadas de base ou de sub-base. Nesse sentido, várias técnicas podem ser usadas para medir a capacidade de suporte de fundação das quais se destacam o ensaio de penetração, usando o Penetrômetro Dinâmico Ligeiro (PDL); o ensaio de Carga em Placa (ECP) e o ensaio de Índice Californiano de Capacidade de Suporte (CBR).

O desenvolvimento deste trabalho, possibilitou a realização de uma campanha de ensaios de campo e do laboratório como objetivo de fazer uma caracterização do pavimento, enfatizando a correlação dos parâmetros do solo. Além disso permitiu a análise de diferentes métodos privilegiando a sua aplicação a um caso de estudo.

Quanto às correlações, todos os parâmetros correlacionados com a taxa de penetração (N10), apresentam um índice de correlação muito baixo, o que pode significar que o parâmetro N10 não oferece resultados fiáveis quando relacionado com outros parâmetros de solo como CBR; EV2; GC.

A correlação entre GC e N10, foi a que apresentou o valor de coeficiente de correlação menor que zero, o que implica que são dois parâmetros que não faz sentido os correlacionar.

Relativamente às metodologias de dimensionamento de pavimento aplicadas ao caso em estudo pode se referir que:

O método de TRL/SADC – Para fundações mais fracas, como é o caso da fundação S2, a estrutura de pavimento é a mesma em todas classes de tráfego independentemente do clima ser seco ou húmido;

No método de SATCC – a classe de tráfego mais baixa engloba tráfego $\leq 0,3$ milhões de ESA, enquanto o método do catálogo moçambicano e o método TRL/SADC apresentam 3 e 4 classes de tráfego, respetivamente, até este limite. Este fato, conjugado com classes de fundação baixas (S1 e S2), traduz-se, em regra, em estruturas de pavimento substancialmente mais espessas no SATCC comparativamente aos outros dois métodos; CBR – o *California Bearing Ratio*, embora sendo um parâmetro empírico, ainda permanece como o principal parâmetro de resistência de material para fins de dimensionamento.

Complementarmente as linhas conclusivas deste trabalho, recomenda-se para futuros trabalhos:

Proceder a avaliação da capacidade de suporte de fundação através do ensaio CBR in situ;

Comparar os métodos empíricos com empíricos-mecanicistas de dimensionamento de pavimentos de baixo volume de tráfego e

Avaliar os custos em função dos métodos aplicados

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (1993). Design of Pavement Structures. *Sustainable Waste Management and Recycling: Construction Demolition Waste: Proceedings of the International Conference Organised by the Concrete and Masonry Research Group*. Washington.

AASHTO. (2003). Low Volume Road Pavement Design. In *Design Guide For Pavement Structures* (p. 18).

Ahsan, A. N. (2014). *Pavement Performance Monitoring Using Dynamic Cone*. University of Texas.

Amini, F. (2003). Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in mdot pavement design and construction, (September), 1–36.

Antunes, M. de L. (1993). Avaliação “in-situ” das condições de fundação dos pavimentos rodoviários com base em ensaios de carga, 12.

Asare, A. O. (2013). *Construction Of Low Volume Sealed Roads*. Pretoria.

Branco, F., Ferreira, P., & Santos, L. P. (2011). *Pavimentos Rodoviários*. (A. S.A, Ed.) (4^a). Coimbra.

Brito, L. (2011). *Design methods for low volume roads*. University of Nottingham.

Christopher, B. R., Schwartz, C., & Boudreau, R. (2006). Geotechnical aspects of pavements. *NHI Course No.132040*, (132040), 598. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geotechnical+Aspects+of+Pavements#1>

Clemen, A. (2016). *Foundation Design of Low Volume Roads: Evaluation and Performance*. South Dakota State University.

Cook, J. R., Gourley, C. S., & UK, T. L. (2002). World Road Association (PIARC) - Technical Committee C12 Seminar in Mongolia , June 2002 A Framework for the Appropriate Use of Marginal Materials J R Cook C S Gourley. *Innovation*, 1, 1–19.

Cook, J. R., Petts, R. C., & Rolt, J. (2013). The International Low Cost Road Surfacing and Pavement Guideline, *44(0)*, 0–29.

- Cook, J. R., Rolt, J., & Petts, R. C. (2013). Low Volume Rural Road Surfacing and pavements, (LVRR), 134.
- Cunha, R. A. F. (2014). *Contribuição para a Metodologia de Estudo de Melhoria de um Solo com Cimento no Âmbito de uma Obra Rodoviária*. Universidade Fernando Pessoa.
- ERA. (2011a). *Design Manual For Low Volume Roads*.
- ERA. (2011b). *Design Manual For Low Volume Roads Part D (Vol. 5)*.
- ERA. (2013a). Part B.
- ERA. (2013b). *Pavement Design Manual. Roads Authority Ethiopian (Vol. I)*.
- Fernandes, M. de M. (2015). *Mecânica dos Solos Introdução à Engenharia Geotécnica*. (FEUP, Ed.) (2015th ed.). Porto.
- Fernandes, R. (2015). *Desenvolvimento de Correlação entre os Ensaios DCP e CBR estudo de caso: pista de testes, UFSC-Joinville*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Fortunato, E. M. C. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias: estudos Relativos à Capacidade de Carga. PhD Thesis*. Universidade de Porto. Retrieved from <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11441>
- Gomes, E. C. A. (2012). *Influencia da não saturação no comportamento mecânico de camadas de aterro*. Universidade da Madeira.
- IRC. (2007). Guidelines for the Design of Flexible Pavements for Low Volume Rural Roads.
- JAЕ. (1995). *Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. Lisboa.
- Jorge, L. da C. D. L. (2014). *Constituição, dimensionamento e conservação de pavimentos para baixos volumes de tráfego*. Instituto Superior De Engenharia De Coimbra.
- Minhoto, M. (2016). O Pavimento Rodoviário. Bragança.
- MRB. (2013). *Low Volume Road Design Manual*.
- MRB. (2013). *Low Volume Road Maintenance Booklet*.

- MRB. (2013). *Low Volume Roads Design Manual* (Vol. 1).
- MTPW. (2013). *Design Manual for Low Volume Sealed Roads Using the DCP Design Method*.
- Mukura, K., Rolt, J., & Otto. (2012). Targeted Interventions on Low Volume Rural Roads in Mozambique, (January), 10.
- MWTC. (2016a). *Low Volume Road Manual*. Dar es Salaam.
- MWTC. (2016b). *Low Volume Roads Manual*. Dar es Salaam.
- Novo, A. M. A. de A. (2016). *Aspectos Geotécnicos da Coceção e Construção de Pavimentos Industriais*. Universidade de Porto.
- Paige-Green, P., & Plessis, L. du. (2009). The Use And Interpretation Of The Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Test, (September), 82.
- Pereira, T. C. (2010). *Uma contribuição para a Determinação de propriedades Físicas e mecânicas de materiais Granulares compactos, com Recurso a penetrómetro dinâmico Ligeiro*. Universidade de Porto.
- Pestana, R. M. M. (2008). *Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Estradas de Baixo Tráfego*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Santos, I. (2013). *Estabilidade de geomateriais em estradas não pavimentadas. Propriedades Relevantes e Métodos de Dimensionamento*. Universidade de Porto.
- Santos, J. A. (2008). Compactação Elementos Teóricos. *Obras Geotécnicas. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*, 18.
- SATCC. (2003). *Guideline*. Gaborone.
- SEACAP3. (2008). *Low Volume Rural Road Standards and Specifications : Part II*. Laos.
- SEACAP 3. (2008). *Low Volume Rural Road Standards and Specifications*.
- Seyman, E. (2003). *Laboratory Evaluation of Insitu Tests as Potential Quality Control/Quality Assurance Tools*. Bogazici University.
- TRH. (1996). Structural Design Of Flexible Pavement For Interurban And Rural Roads. *Africa*, 1–101.

TRL. (2016). Development of Guidelines and Specifications for Low Volume Sealed Roads through Back Analysis, (September).

Wu, C.-L., & Todres, H. A. (1995). Strength and Deformation Characteristics of Pavement Sections and Pavement Rehabilitation, (1448), 156.

ANEXO I (TRL/SADC)

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

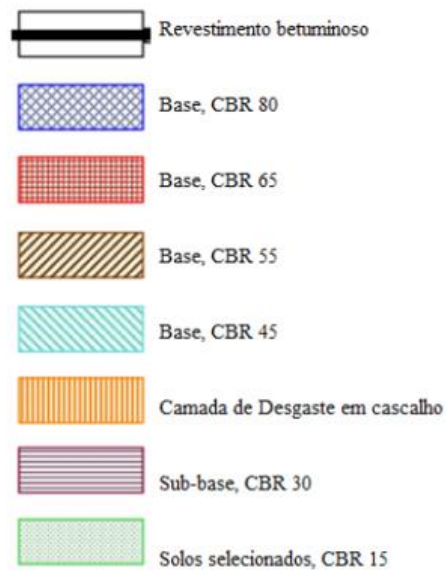
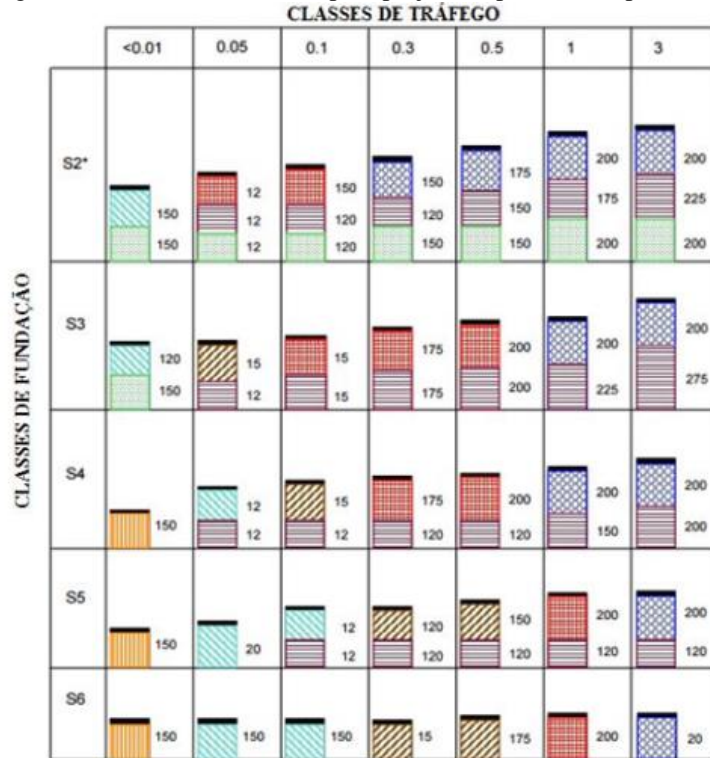
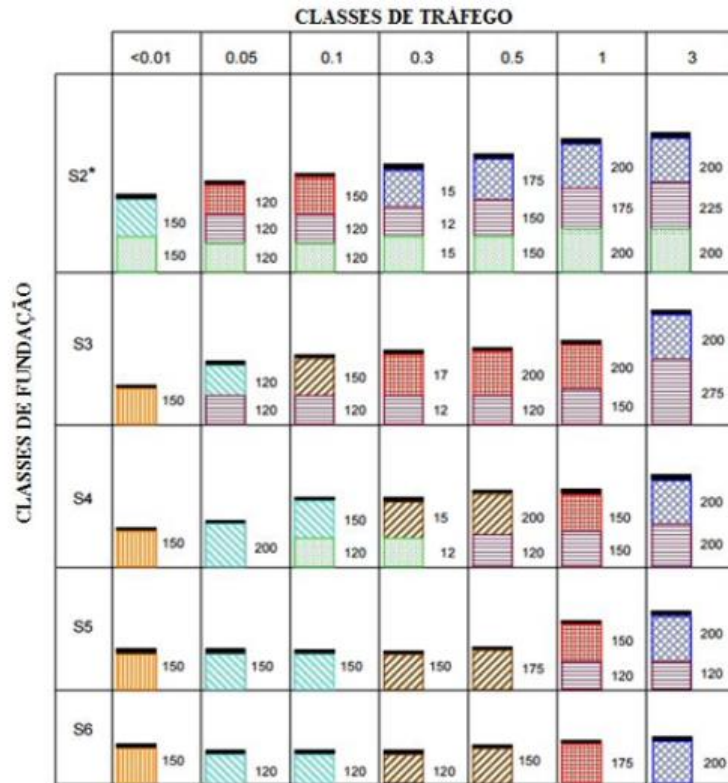


Figura 44-Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas usada nos catálogos de projeto de ,2003 (SATCC)

Quadro 1-Catalogo 1-Estruturas consideradas para projeto de pavimentos para N <1 (SATCC,2003)



Quadro 2-Catalogo 2- estruturas consideradas para projeto de pavimento para N> 4 (SATCC,2003)



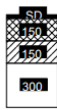
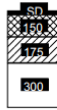
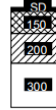

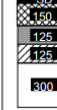
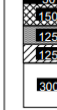
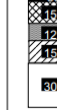
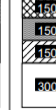
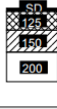
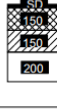

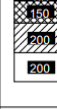
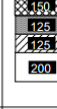
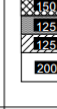
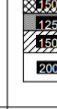



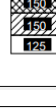
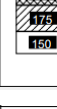
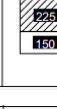
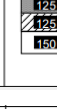
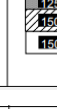
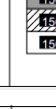




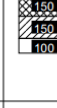
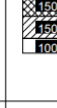
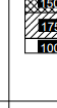
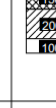









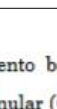

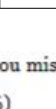
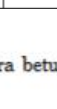
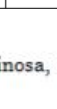
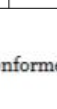
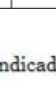
ANEXO II (SATCC 1998)





Quadro 3-Catálogo D1 para regiões secas (SATCC, 1998)

Subgrade Class	Traffic Class and Traffic Limits (million ESAs)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	0.3	0.7	1.5	3	6	10	17	30
S1 2%								
S2 3-4%								
S3 5-7%								
S4 8-14%								
S5 15-29%								
S6 >30%								

- Revestimento betuminoso ou mistura betuminosa, conforme indicado
- Base Granular (CBR > 80%)
- Sub-base Granular (CBR > 30%)
- Solos selecionados (CBR > 15%)

Quadro 4-Catálogo D2 para regiões secas (SATCC, 1998)

Subgrade Class	Traffic Class and Traffic Limits (million ESAs)							
	T1 0.3	T2 0.7	T3 1.5	T4 3	T5 6	T6 10	T7 17	T8 30
S1 2%								
S2 3-4%								
S3 5-7%								
S4 8-14%								
S5 15-29%								
S6 >30%								

-  Revestimento betuminoso ou mistura betuminosa, conforme indicado
-  Base Granular (CBR > 80%)
-  Sub-base Granular (CBR > 30%)
-  Solos selecionados (CBR > 15%)

ANEXO III (ROAD NOTE 31/catalogo)

Material Definitions






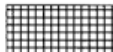
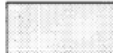
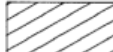
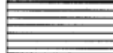
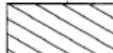





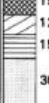
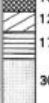

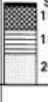
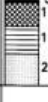

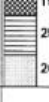
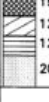
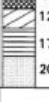
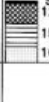
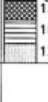

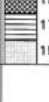
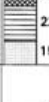

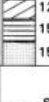





















	Double surface dressing
	Flexible bituminous surface
	Bituminous surface (Usually a wearing course, WC, and a basecourse, BC)
	Bituminous roadbase, RB
	Granular roadbase, GB1 - GB3
	Granular sub-base, GS
	Granular capping layer or selected subgrade fill, GC
	Cement or lime-stabilised roadbase 1, CB1
	Cement or lime-stabilised roadbase 2, CB2
	Cement or lime-stabilised sub-base, CS

Figura 45-Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas usada nos catálogos de projeto de Road Note3 1 (TRL,1993)

Quadro 5-Catalogo 1- para camada de base e de sub-base em material granular usado no Road Note31 (TRL,1993)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
S1								
S2								
S3								
S4								
S5								
S6								

Quadro 6-Catalogo 2- para camada de base e de desgaste em material granular usado no Road Note31 (TRL,1993)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
S1								
S2								
S3								
S4								
S5								
S6								

ANEXO IV (Catálogo de Moçambique)

Quadro 7-Catálogo 1-Projeto de pavimento betuminoso (Extraído de Jorge,2014)

CBR Fundação	CLASSES DE TRÁFEGO				
	LV1	LV2	LV3	LV4	LV5
	< 0,01	0,01 – 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 1,0
S2 (3-4%)	150 G65 150 G15	150 G65 125 G30 150 G15	150 G65 150 G30 175 G15	175 G80 175 G30 175 G15	200 G80 175 G30 200 G15
S3 (5-7%)	125 G65 150 G15	150 G65 100 G30 100 G15	150 G65 150 G30 150 G15	175 G65 150 G30 150 G15	200 G80 150 G30 150 G15
S4 (8-14%)	175 G45	150 G65 120 G30	150 G65 200 G30	175 G65 200 G30	200 G80 200 G30
S5 (15-29%)	175 G45	125 G65 125 G30	150 G65 150 G30	175 G65 150 G30	175 G80 150 G30
S6 (>30%)	150 G45	150 G65	175 G65	175 G65	200 G80

Nota: por exemplo, a solução de 175 G15 significa camada com 175 mm de espessura de material granular com 15% de CBR

Quadro 8-Catálogo 2-Projeto de pavimento betuminoso (adaptado de Jorge,2014)

CBR Fundação	CLASSES DE TRÁFEGO				
	LV1	LV2	LV3	LV4	LV5
	< 0,01	0,01 – 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 1,0
S2 (3-4%)	150 G45 150 G15	150 G65 120 G30 120 G15	150 G80 150 G30 150 G15	175 G80 150 G30 150 G15	200 G80 175 G30 175 G15
S3 (5-7%)	125 G45 125 G15	150 G55 150 G30	175 G65 175 G30	200 G65 200 G30	200 G65 250 G30
S4 (8-14%)	150 G45	150 G45 100 G30	150 G55 150 G30	175 G55 175 G30	175 G65 200 G30
S5 (15-29%)	150 G45	175 G55	175 G55	175 G55	175 G65
S6 (>30%)	150 G45	150 G45	150 G55	150 G55	175 G65

Tabela 34-Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados no Método do Catálogo para projeto de estradas com pavimentos revestidos e não revestidos (adaptado de Jorge, 2014)

Código	Material	Especificações abreviadas
G80	Cascalho Natural	Min. CBR: 80% @ 98/100% AASHTO T180 e 4 dias de imersão Max. Dilatação: 0,2% Max. Dimensão e granulometria: Max dimensão 37,5mm, granulometria conforme especificado. PI: <6 ou conforme especificado (material específico).
G65	Cascalho Natural	Min. CBR: 65% @ 98/100% AASHTO T180 e 4 dias de imersão Max. Dilatação: 0.2% Max. Dimensão e granulometria: Max dimensão 37.5mm, granulometria conforme especificado. PI: <6 ou conforme especificado (material específico).
G55	Cascalho Natural	Min. CBR: 55% @ 98/100% AASHTO T180 e 4 dias de imersão Max. Dilatação: 0.2% Max. Dimensão e granulometria: Max dimensão 37.5mm, granulometria conforme especificado. PI: <6 ou conforme especificado (material específico).
G45	Cascalho Natural	Min. CBR: 45% @ 98/100% AASHTO T180 e 4 dias de imersão Max. Dilatação: 0.2% Max. Dimensão e granulometria: Max dimensão 37.5mm, granulometria conforme especificado. PI: <6 ou conforme especificado (material específico).
G30	Cascalho Natural	Min. CBR: 30% @ 95/97% AASHTO T180 & maior teor de água esperado Max. Dilatação: 1.0% 1.5% @ 100% AASHTO T180 Max. Dimensão e granulometria: Max dimensão 63mm ou 2/3 da altura da camada. PI: <12 ou conforme especificado (material específico).
G25	Cascalho Natural	Min. CBR: 30% @ 95/97% AASHTO T180 & maior teor de água esperado Max. Dilatação: 1.0% 1.5% @ 100% AASHTO T180 Max. Dimensão e granulometria: Max dimensão 63mm ou 2/3 da altura da camada. PI: <12 ou conforme especificado (material específico).
G15	Cascalho /Solo	Min. CBR: 15% @ 93/95% AASHTO T180 & maior teor de água esperado Max. Dilatação: 1.5% 1.5% @ 100% AASHTO T180 Max. Dimensão: 2 ou 2/3 da altura da camada. PI: <12 ou 3GM + 10 ou conforme especificado (material específico).
G7	Cascalho /Solo	Min. CBR: 7% @ 93/95% AASHTO T180 & maior teor de água esperado Max. Dilatação: 1.5% @ 100% AASHTO T180 Max. Dimensão: 2/3 da altura da camada PI: <12 ou 3GM + 10 ou conforme especificado (material específico).
G3	Cascalho /Solo	Min. CBR: 3% @ 93/95% AASHTO T180 & maior teor de água esperado Max. Dimensão: N/A Max. Dimensão: 2/3 da altura da camada

ANEXO V (METODO DCP-CBR)

Quadro 9-Especificações recomendadas para estradas não pavimentadas (adaptado de I.Santos,2013)

	RURAIS	URBANAS	TRÁFEGO PESADO (minas e florestas)
Dimensão máxima (mm)	37,5	37,5	50
Índice de sobretamanhos (I_o)^a (%)	≤ 5	0	≤ 5
Produto de Retração (S_p)^b	100 - 365	100 - 240	100 - 365
Coefficiente granulométrico (G_c)^c	16 - 34	16 - 34	16 - 34
CBR embebido (95% Proctor Mod. ASSHTO) (%)	≥ 15	≥ 15	≥ 18
Valor de Impacto Treton (%)	20 - 65	20 - 65	20 - 65

a) I_o = Índice de sobretamanhos (% retida no #37,5mm)

b) S_p = Produto de retração = Retração linear × (%<0,425mm)

c) G_c = Coeficiente granulométrico = (%<26,5mm - %<2,0mm) × (%<4,75mm) / 100

APÊNDICE A.6

1.Método de TRL/SADC (1999)

Classe de fundação: a classe de fundação para um solo com índice CBR=23% é S4, conforme se pode observar na Tabela 8.

Tabela 8-Classe de Fundação (Adaptado ERA,2011b)

Classe de Fundação					
	S2	S3	S4	S5	S6
CBR (%)	3 - 4	5 - 8	9 - 14	15 - 29	>30

Classe de tráfego: considerou-se todas classes dentro de limite admitido para EBVT (0.01 a 1.0 Milhão ESA), conforme a Tabela 10.

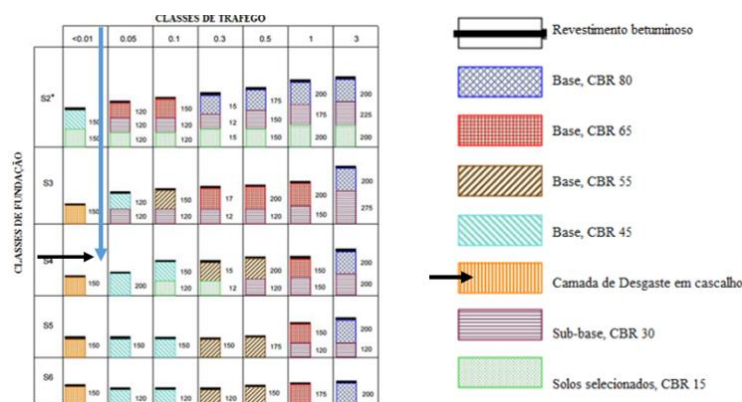
Tabela 10 - Classes de tráfego de projeto (adaptado de Gourley et al., 1999)

Classe de tráfego	Intervalo de número acumulado de eixos padrão
0.01M	10 000
0.05 M	10 000 a 100 000
0.1 M	50 000 a 100 000
0.3 M	100 000 a 300 000
0.5 M	300 000 a 500 000
1.0 M	500 000 a 1 milhão
3.0 M	1 a 3 milhões

Condições climáticas: Bragança, é uma zona com clima moderado a seco, conforme a JAE,1999.

Catálogo de projeto: tratando-se de uma região com clima moderado ($N > 4$), e com uma largura da faixa de 6m usa-se o catálogo 2 (Anexo I).

Quadro 10-Catálogo 2- estruturas consideradas para projeto de pavimento para $N > 4$ (SATCC,2003)



Estrutura de Pavimento: a estrutura terá 150 mm de espessura da camada de desgaste em cascalho, podendo levar um revestimento em betuminoso.

Na Tabela 30, apresenta-se os resultados das cambiações de estruturas de pavimento para todo troço usando o método TRL/SADC

Tabela 35-Estruturas de pavimentos de todas as secções pelo método TRL/SADC:

Método de TRL/SADC (1999)									
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)					
				T1 (<0.01)	T2 (0.05)	T3 (0.1)	T4 (0.3)	T5 (0.5)	T6 (1.0)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
2-Escavação	0.9 km	20			200 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45 e 120 mm de Sub-base, CBR 15	150 mm de Base, CBR 55 e 120 mm de Sub-base, CBR 15	200 mm de Base, CBR 55 e 120 mm de Sub-base, CBR 30	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4		150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5		150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30
5-Escavação	0.25 km	21			150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 45	150 mm de Base, CBR 55	175 mm de Base, CBR 55	150 mm de Base, CBR 65 e 120 mm de Sub-base, CBR 30

APÊNDICE B.6

2.Método SATCC

Classe de fundação: A classe de fundação a considerar é a S4 conforme pode ser observado no Tabela 8

Tabela 8-Classe de Fundação (Adaptado ERA,2011b)

Classe de Fundação					
	S2	S3	S4	S5	S6
CBR (%)	3 - 4	5 - 8	9 - 14	15 - 29	>30

Classe de tráfego: Da análise da Tabela 12 resulta que a classe de tráfego correspondente será de T1 para um tráfego <300 000 ESA.

Tabela 12 – Classe de tráfego (Adaptado da SATCC, 1997)

Intervalo de tráfego (milhões de eixos padrão de 80 kN)	Classe de tráfego							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	<0.3	0.3-0.7	0.7-1.5	1.5 - 3	3 - 6	6 -10	10 - 17	17- 30

Estrutura de Pavimento: Considera-se a utilização do catálogo D1 para regiões seca, para pavimentos com base e sub-base granulares (Anexo II – Quadro 11), para $N > 4$, por se tratar de uma estrada em clima seco e com largura da faixa inferior a 7 metros. Os tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto são obtidas através Quadro 11. Resulta, assim, que a estrutura do pavimento a considerar é de uma camada de base com 125 mm de espessura (CBR > 80%) e uma camada de sub-base com 150 mm (CBR > 30%) e um de revestimento em mistura betuminosa.

Na Tabela 36 apresenta-se os resultados de estruturas de pavimentos correspondentes a todas secções do traçado.

Tabela 36-Estruturas de pavimento de todas secções pelo método SATCC

Método de SATCC (1998)					
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)	
				T1 (≤ 0.3)	T2 (0.3 - 0.7)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	200 mm de Base, CBR>80%	200 mm de Base, CBR>80%
2-Escavação	0.9 km	20			
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4	150 mm de Base, CBR >80% e 100 mm de Sub-base, CBR>30%	151 mm de Base, CBR >80% e 150 mm de Sub-base, CBR>30%
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5	200 mm de Base, CBR>80%	200 mm de Base, CBR>80%
5-Escavação	0.25 km	21			

Quadro 11-Catálogo D1 para regiões secas (SATCC, 1998)

Subgrade Class	Traffic Class and Traffic Limits (million ESAs)							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
S1 2%								
S2 3-4%								
S3 5-7%								
S4 8-14%								
S5 15-29%								
S6 >30%								

- Revestimento betuminoso ou mistura betuminosa, conforme indicado
- Base Granular (CBR > 80%)
- Sub-base Granular (CBR > 30%)
- Solos selecionados (CBR > 15%)

APÊNDICE C.6

2.Método Road Note 31

Classe de fundação: A classe de fundação a considerar é a S4 conforme pode ser observado no Tabela 3.10

Tabela16-Classe de fundação (TRL,1993)

Classe de Fundação	Intervalo de CBR (%)
S1	2
S2	3-4
S3	5-7
S4	8-14
S5	15-29
S6	>30

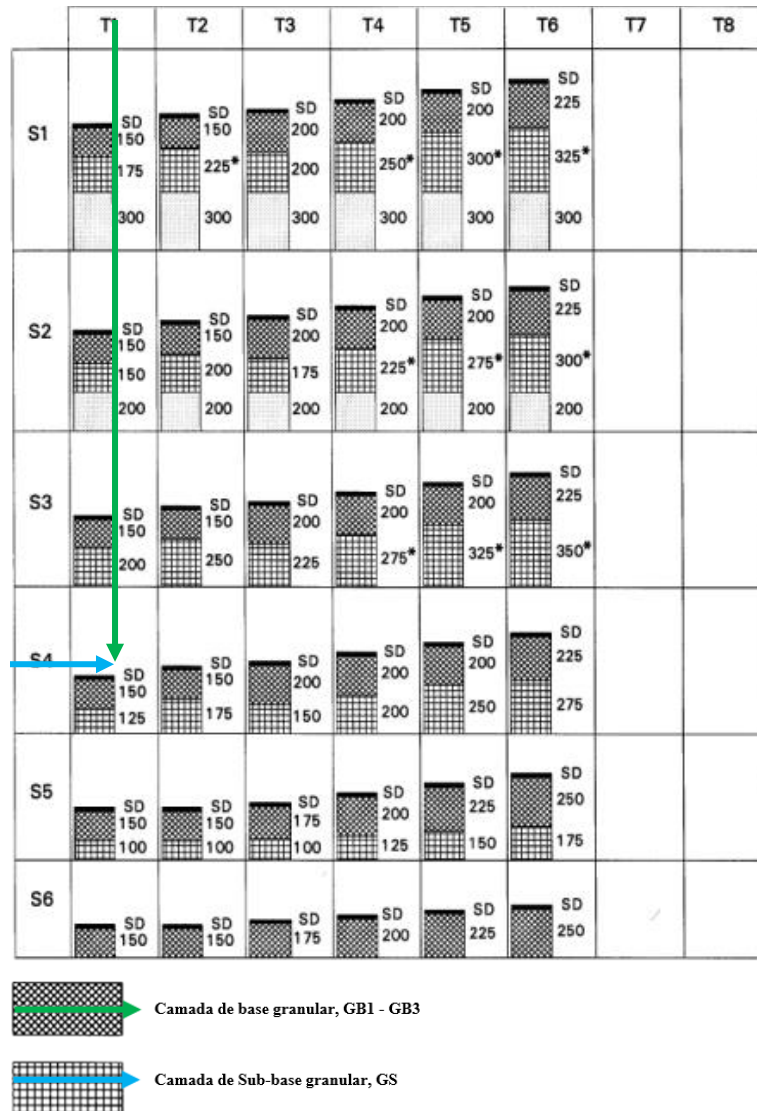
Classe de tráfego: Da análise da Tabela 15 resulta que a classe de tráfego correspondente será de T1 para um tráfego <300 000 ESA.

Tabela 15- Classes de tráfego de projeto (TRL,1993)

Classe de trafego	Intervalo de número acumulado de eixos padrão
T1	<0.3
T2	0.3 – 0.7
T3	0.7 – 1.5
T4	1.5 – 3.0
T5	3.0 – 6.0
T6	6.0 – 10
T7	10 – 17
T8	17 - 30

Estrutura de Pavimento: Considera-se a utilização do catalogo1 para camada de base e de sub-base em material granular. Os tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto são obtidas através do Quadro 12 Anexo III. A estrutura do pavimento a considerar é de uma camada de base com 150 mm de espessura e uma camada de sub-base com 125 mm e uma espessura fina de revestimento de betuminoso.

Quadro 12-Catalogo 1- para camada de base e de sub-base em material granular usado no Road Note31
(TRL,1993)



A combinação de estruturas para todas secções está apresentado na Tabela 1 do Anexo IV.

Tabela 32 – Estruturas de pavimentos obtidos pelo método de catálogo Road Note 31

Método de Road Note 31					
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)	
				T1 (≤ 0.3)	T2 (0.3 - 0.7)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	150 mm de Base granular e 100 mm de Sub-base granular	200 mm de Base, CBR >80%
2-Escavação	0.9 km	20			
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4	150 mm de Base granular e 125 mm de Sub-base granular	150 mm de Base e 175 mm de Sub-base
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5	150 mm de Base granular e 100 mm de Sub-base granular	150 mm de Base e 100 mm de Sub-base
5-Escavação	0.25 km	21			

APÊNDICE D.6

Método de Catálogo de Moçambique

Classe de fundação: a classe de fundação para um solo com índice CBR=23% é S4, conforme se pode observar na Tabela 7.

Tabela7-Classe de Fundação (Adaptado ERA,2011b)

Classe de Fundação					
	S2	S3	S4	S5	S6
CBR (%)	3 - 4	5 - 8	9 - 14	15 - 29	>30

Classe de tráfego: considerou-se todas classes dentro de limite admitido para EBVT (0.01 a 1.0 Milhão ESA), conforme a Tabela 8.

Tabela 8-Classe de tráfego (Adaptado MRB,2013c)

Faixa de Tráfego (ESA em milhões)	LV1	LV2	LV3	LV4	LV5*
	<0.01	0.01-0.1	0.1-0.3	0.3-0.5	0.5-1.0

**LV5/T2 é a zona de transição de tráfego entre estradas de baixo volume e maior volume*

Condições climáticas: Bragança, é uma zona com clima moderado a seco, conforme a JAE,1999.

Catálogo de projeto: tratando-se de uma região com clima moderado (N>4), e com uma largura da faixa de 6m usa-se o Quadro 2 (anexo IV), para pavimentos betuminosos.

Quadro 8- Catalogo 2-Projeto de pavimento betuminoso (adaptado de Jorge,2014)

CBR Fundação	CLASSES DE TRÁFEGO				
	LV1	LV2	LV3	LV4	LV5
	< 0,01	0,01 – 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 1,0
S2 (3-4%)	150 G45 150 G15	150 G65 120 G30 120 G15	150 G80 150 G30 150 G15	175 G80 150 G30 150 G15	200 G80 175 G30 175 G15
S3 (5-7%)	125 G45 125 G15	150 G55 150 G30	175 G65 175 G30	200 G65 200 G30	200 G65 250 G30
S4 (8-14%)	150 G45	150 G45 100 G30	150 G55 150 G30	175 G55 175 G30	175 G65 200 G30
S5 (15-29%)	150 G45	175 G55	175 G55	175 G55	175 G65
S6 (>30%)	150 G45	150 G45	150 G55	150 G55	175 G65

Estrutura de Pavimento: a estrutura terá 150 mm de espessura da camada de base em e revestimento em betuminoso.

Na Tabela 33, apresenta-se os resultados das mudanças de estruturas de pavimento para todo troço usando o método TRL/SADC

Tabela 33-apresenta-se a combinação para todas as secções pelo método Catálogo de Moçambique

Método de Catálogo de Moçambique (ANE,2014)								
Secções	Extensão (m)	CBR (95%)	Classe de Fundação	Classe de Tráfego (em milhões de eixos padrão)				
				T1 (<0.01)	T2 (0.01 -0.1)	T3 (0.1-0.3)	T4 (0.3-0.5)	T5 (0.5-1.0)
1-Aterro	0.3 km	23	S5	150 G45	175 G55	175 G55	175 G55	175 G65
2-Escavação	0.9 km	20						
3-Escavação	0.7 km	12.2	S4		150 G45	150 G55	175 G55	175 G65
					100 G30	150 G30	175 G30	200 G30
4-Aterro	0.9 km	26.4	S5		175 G45	175 G55	175 G55	175 G65
5-Escavação	0.25 km	21						