

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Silvino Dias Capitão, pela disponibilidade, competência, conhecimentos transmitidos, esclarecimento de dúvidas e orientação.

A todos os que contribuíram com as suas palavras de apoio em todos os momentos de insegurança.

À minha família, pela paciência, incentivo e pelo apoio incondicional.

RESUMO

As Estradas de baixo volume de tráfego (EBVT) têm um importante papel para o desenvolvimento de um país porque representam uma extensão considerável da malha rodoviária existente, sendo de grande relevância social e económica.

A função económica da infraestrutura rodoviária traduz-se, por um lado, pelo montante de recursos investidos na sua construção e manutenção e, por outro lado, pelo suporte que garantem à mobilidade de pessoas e bens. Os pavimentos daquelas infraestruturas são uma componente fundamental para o seu bom desempenho, o que explica a importância de empregar bons métodos de dimensionamento. Pavimentos rodoviários subdimensionados e com estratégias de conservação deficientes sofrerão rotura prematura, o que conduzirá a altos custos de reconstrução e grandes perdas económicas. Por sua vez, pavimentos sobredimensionados envolverão desperdício dos recursos, os quais poderiam ser utilizados para melhorar outras características igualmente relevantes para a infraestrutura.

Verifica-se ainda que, nos últimos anos, as empresas construtoras portuguesas têm alargado a sua atividade para países africanos, nos quais as soluções de pavimentação utilizam solos naturais ou estabilizados nas camadas estruturais, e revestimentos betuminosos delgados colocados sobre aquelas, porquanto há escassez de materiais pétreos para uso rodoviário. Por isso, as técnicas de pavimentação utilizadas em Portugal e na Europa não são geralmente utilizadas nos países africanos. Essa realidade leva a que os técnicos portugueses ao serviço de empresas que atuam em mercados africanos necessitem de reunir informação sistematizada sobre o assunto, o que acarreta algumas dificuldades.

É, assim, de todo o interesse reunir informação dispersa sobre os materiais a utilizar para as situações referidas, assim como avaliar as metodologias de dimensionamento que poderão utilizar-se, de modo a estabelecer estruturas de pavimentos e as características dos materiais que as constituem, de modo conseguir infraestruturas de transporte rodoviário que suportem a economia de um território.

A par da conceção e do dimensionamento estão as estratégias e as técnicas de conservação das estruturas de pavimentos, de modo a contribuir para a durabilidade da infraestrutura e para o desenvolvimento da economia do território servido.

Pelas razões aduzidas, na presente dissertação procurou-se reunir informação dispersa sobre os aspetos relevantes da constituição, conceção, dimensionamento e conservação de pavimentos de estruturas pouco espessas de pavimentos, destinados a tráfego de pesados pouco significativo no seu ciclo de vida, mas com picos de solicitação importantes. A

sistematização e análise dos aspetos relevantes, e a aplicação a casos concretos, permitiu uma análise comparativa das soluções em confronto, quer no que diz respeito aos aspetos tecnológicos da construção e da conservação, quer no que se refere aos aspetos do dimensionamento deste tipo de pavimentos, constituindo uma contribuição útil para o setor.

Palavras-Chave

Pavimentos; dimensionamento; estradas de baixo volume de tráfego; pavimentos não revestidos; pavimentos revestidos; manutenção.

ABSTRACT

The low volume roads have an important role in the development of a country as they represent the majority of the existing road network's length, being of great social and economic relevance.

The economic function of the road infrastructure is represented, on the one hand, by the amount of resources invested on the construction and maintenance of roads and, on the other hand, by the support that the infrastructure ensures to mobility of people and goods. The pavements of the infrastructure are a key component to its adequate performance, which explains the importance of using good design methods. Under-designed road pavements which are submitted to inadequate maintenance strategies will suffer premature failure, leading to high reconstruction costs and major economic losses. In turn, over-designed pavements involve waste of resources, which could be used to improve other relevant characteristics for the infrastructure.

Over recent years, the Portuguese construction companies have also extended their activity to African countries, where the paving solutions use natural or stabilized soil in the structural layers as well as thin bituminous surfacing on them, because there is scarcity of rock materials for road use. Therefore, the paving techniques used in Portugal and Europe are not generally used in African countries. This reality means that the Portuguese engineers who work to the companies operating in the African market need to gather systematic information on the subject, which entails some difficulties.

It is therefore of great interest gather information about the materials to be used in such cases, as well as to evaluate the design methods which could be used in order to derive pavement structures and characteristics of their constituent materials, in order to obtain transport road infrastructures adequate to bear the economy of a territory.

Conception and design along with strategies and techniques of maintenance of pavements' structures contribute to durability of the infrastructure and to the development of the territory's economy involved.

For these reasons, in this dissertation we tried to bring together scattered information on relevant aspects of the formation, design and maintenance of pavements with low thickness structures, designed to low volume of heavy vehicles in their life cycle, but with important peaks of loading. The systematization and analysis of the relevant aspects, and their use in cases studies, allowed us to compare the solutions under study. This was carried out regard to

technological aspects of construction and maintenance as well as regarding aspects related to structural design of this type of pavements, being a useful contribution to the industry.

Key-Words

Pavements; pavement design; low volume roads; unsealed pavements; sealed pavements; maintenance.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO

1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e Metodologia de Trabalho.....	1
1.3	Organização do trabalho.....	2

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PAVIMENTOS DE EBVT

2.1	Enquadramento Geral	4
2.2	Classificação de Estradas de Baixo Volume de Tráfego	5
2.3	Ambiente Rodoviário	8
2.4	Aspetos Relativos à Geometria do Traçado	10
2.5	Pavimento	11
2.5.1	Conceção de Pavimentos.....	11
2.5.2	Requisitos Funcionais.....	13
2.5.3	Estruturas de pavimento utilizadas em EBVT	15
2.5.4	Materiais	18
2.5.4.1	<i>Utilização adequada dos materiais locais</i>	19
2.5.4.2	<i>Comportamento mecânico dos materiais</i>	20
2.5.4.3	<i>Problemas específicos com solos</i>	22
2.5.4.4	<i>Práticas de estabilização</i>	25
2.5.5	Camadas superficiais.....	27
2.5.5.1	<i>Nota introdutória</i>	27
2.5.5.2	<i>Camada superficial em solo ou material granular</i>	27
2.5.5.3	<i>Revestimentos betuminosos</i>	28
2.5.5.4	<i>Revestimentos não betuminosos</i>	31
2.5.5.5	<i>Camada superficial em solos estabilizados com cal</i>	33
2.5.5.6	<i>Camada superficial em solos estabilizados com emulsão betuminosa</i>	34

2.5.5.7	<i>Fatores que afetam a escolha da camada superficial</i>	35
2.5.6	Drenagem do Pavimento	36
2.6	Considerações Finais.....	37

3 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE EBVT

3.1	Introdução.....	38
3.2	Tráfego	39
3.2.1	Período de dimensionamento	40
3.2.2	Estimar o volume de tráfego inicial por classe de veículo	41
3.2.3	Estimar o número equivalente de eixos padrão por categoria de veículo (ESA).....	43
3.2.4	Estimativa do número médio diário de eixos padrão	44
3.2.5	Estimativa do crescimento do tráfego	44
3.2.6	Estimativa do número acumulado de eixos padrão (CESA) para todas as classes de veículos no período de dimensionamento	45
3.2.7	Distribuição do tráfego na faixa de rodagem.....	46
3.2.8	Estabelecer a classe de tráfego para o projeto de pavimento.....	46
3.3	Fatores ambientais	47
3.4	Fundação	47
3.5	Materiais de pavimentação	49
3.6	Métodos de dimensionamento	49
3.6.1	Nota introdutória	49
3.6.2	Abordagens empíricas	51
3.6.2.1	<i>Método baseado no CBR</i>	51
3.6.2.2	<i>Método baseado no DCP</i>	53
3.6.2.3	<i>Abordagem empírico-mecanicista</i>	54
3.6.3	Adequação dos métodos de dimensionamento	55
3.6.4	Guia de Pavimento de SATCC	56
3.6.4.1	<i>Classes de tráfego</i>	57
3.6.4.2	<i>Classes de fundação</i>	58
3.6.4.3	<i>Condições climáticas</i>	58
3.6.4.4	<i>Tipologia das estruturas</i>	58
3.6.5	Método do Penetrômetro Dinâmico (DCP)	60
3.6.5.1	<i>Número DCP (DN)</i>	60

3.6.5.2	<i>Número estrutural DCP</i>	61
3.6.5.3	<i>Procedimento de Projeto pelo método do DCP</i>	61
3.6.6	Método do catálogo Moçambicano	66
3.6.7	TRL/SADC	68
3.6.7.1	<i>Classes de fundação</i>	68
3.6.7.2	<i>Classes de tráfego</i>	68
3.6.7.3	<i>Procedimento de dimensionamento de um pavimento</i>	69
3.6.8	Guia de projeto de pavimentos da Austroads	69
3.6.9	Guia de Projeto da AASHTO	74
3.6.10	Projetos de pavimentos de estradas florestais	75
3.7	Comparação de Métodos de Dimensionamento	76
3.7.1	Caso Prático	77
3.7.1.1	<i>Determinação da classe de Tráfego</i>	78
3.7.1.2	<i>Método baseado no DCP</i>	79
3.7.1.3	<i>Método do catálogo Moçambicano</i>	80
3.7.1.4	<i>Método TRL/SADC</i>	81
3.7.1.5	<i>Método SATCC</i>	81
3.7.1.6	<i>Comparação da estrutura de Pavimento</i>	82
3.7.2	Estudo Paramétrico	83
3.8	Principais conclusões	86
4	CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS DE EBVT	
4.1	Enquadramento geral	87
4.2	Avaliação de Pavimentos	87
4.2.1	Avaliação funcional	88
4.2.2	Avaliação estrutural	89
4.2.2.1	<i>Métodos destrutivos</i>	90
4.2.2.2	<i>Métodos não destrutivos</i>	90
4.3	Tipos de Manutenção	91
4.4	Degradações do Pavimento	92
4.4.1	Deterioração da superfície	93
4.4.1.1	<i>Poeira</i>	93
4.4.1.2	<i>Perda de agregados</i>	94
4.4.1.3	<i>Falta de aderência</i>	94

4.4.2	Deformação da Superfície	95
4.4.2.1	Rodeiras	95
4.4.2.2	Ondulação	96
4.4.2.3	Depressões	97
4.4.2.4	Covas.....	97
4.4.2.5	Pontos fracos.....	98
4.5	Reperfilamento	98
4.6	Regularização	99
4.7	Recarga de Material Granular.....	100
4.8	Preenchimentos e Remendos	100
4.9	Controlo e supressão de pó.....	101
4.9.1	Paliativos de poeira	101
4.9.2	Inibidores químicos de poeira.....	102
4.10	Considerações finais	103

5 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1	Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais	104
5.2	Prosseguimento de Trabalhos Futuros	105
5.3	Considerações Finais.....	106

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 107

ANEXOS

ANEXO I - Materiais de Pavimentação..... 112

ANEXO II - Catálogos de projeto 114

ANEXO III - Fluxograma de dimensionamento do APDG 118

ANEXO IV - Controlo de poeira e Auxiliares de compactação 119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Impactos relativos do tráfego e outros fatores do ambiente rodoviário na deterioração de uma EBVT	8
Figura 2.2 - Fatores do ambiente rodoviário	8
Figura 2.3 - Fluxograma de concepção de pavimentos de EBVT	12
Figura 2.4 - Pavimento de EBVT com rodeiras	12
Figura 2.5 - Estrutura esquemática de um pavimento rodoviário.....	14
Figura 2.6 - Transferência de carga de uma roda através no pavimento.....	14
Figura 2.7 - Estrutura do pavimento de estradas não revestidas	17
Figura 2.8 - Estrutura do pavimento de estradas revestidas	18
Figura 2.9 - Perfil esquemático do pavimento (a) estrada de alto volume e (b) estrada de baixo volume.....	21
Figura 2.10 - Comportamento tensão-deformação de materiais granulares não ligados	21
Figura 2.11 - Movimentos da humidade em solos expansivos sob uma pavimento de uma estrada	22
Figura 2.12 - a) Solo expansivo b) Fendilhamento longitudinal típico e deformação do pavimento causados por uma fundação de solo expansivo	23
Figura 2.13 - Determinação da expansibilidade do solo	23
Figura 2.14 - a) Exemplo de dano grave num revestimento de pavimento devido ao ataque de sal após dois anos da construção b) Danos por ataque de sal podem aparecer sob a forma de "bolhas" no revestimento principal	25
Figura 2.15 - Exemplo de um pavimento com revestimento em solo	28
Figura 2.16 - Exemplo de estrada com revestimento de cascalho	28
Figura 2.17 - Exemplos de revestimentos betuminosos.....	29
Figura 2.18 - Exemplo de pavimento em calçada de pedra	31
Figura 2.19 - Exemplo de pavimentação com tijolo de barro	32
Figura 2.20 - Exemplo de pavimentação de blocos de betão	32
Figura 2.21 - Exemplo de pavimento de betão	33
Figura 2.22 - Seção transversal ideal de uma EBVT	36
 Figura 3.1 - Procedimento para determinar a ação do tráfego de projeto	40
Figura 3.2 - Vida útil estrutural do pavimento	40
Figura 3.3 - Padrão típico de crescimento de tráfego numa EBVT	42

Figura 3.4 - Desenvolvimento do tráfego de uma estrada cujo pavimento é melhorado	45
Figura 3.5 - Profundidade necessária para avaliação da resistência da fundação	48
Figura 3.6 - Famílias de métodos de dimensionamento de pavimentos utilizados	51
Figura 3.7 - Curvas para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários em função do CBR.....	52
Figura 3.8 - Diagrama da resistência das camadas	60
Figura 3.9 - Perfis de resistência coletivos e perfil de resistência médio e extremos	63
Figura 3.10 - Perfil de resistência de camada para várias classes de tráfego	64
Figura 3.11 - Comparação dos perfis de resistência necessário e <i>in situ</i>	65
Figura 3.12 - Procedimento de projeto para estradas revestidas	69
Figura 3.13 - Localização das deformações críticas num pavimento - <i>Austroads</i> (1992)	70
Figura 3.14 - Projeto para pavimentos granulares (80% de confiança) - <i>Austroads</i> (2009) ...	73
Figura 3.15 - Comparação das estruturas de pavimento obtidas com os diferentes métodos de dimensionamento	83
Figura 3.16 - Comparação das estruturas de pavimentos obtidas para os cenários estudados no estudo paramétrico	85
Figura 4.1 - Estrada com desagregação.....	94
Figura 4.2 - Superfície escorregadia durante os períodos chuvosos.	95
Figura 4.3 - Rodeiras em estrada de pavimento de solo.	96
Figura 4.4 - Estrada rural com ondulação	96
Figura 4.5 - Depressões em estrada rural	97
Figura 4.6 - Pavimento em cascalho com presença de covas na superfície	98
Figura 4.7 - Pavimento de solo com ocorrência de pontos fracos	98
Figura 4.8 - Manutenção de um pavimento granular com motoniveladora	99
Figura 4.9 - Estrutura de raspagem munido de lâminas de motoniveladoras.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS EM ANEXO

Figura III 1 - Sistema de projeto para pavimento flexível para pavimentos granulares com revestimento betuminoso delgado <i>Austroads</i> (1992)	118
---	-----

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Funções típicas de estrada e classificação	6
Quadro 2.2 - Classificação de estradas	7
Quadro 2.3 - Fatores do ambiente rodoviário que influenciam as soluções técnicas para pavimentos de EBVT	9
Quadro 2.4 - Funções dos principais componentes do pavimento	15
Quadro 2.5 - Características de principais estruturas de pavimentos EBVT	17
Quadro 2.6 - Vidas úteis de serviço de revestimentos, assumindo que as manutenções de rotina e periódica são realizadas de forma atempada	31
Quadro 2.7 - Fatores que afetam a escolha de revestimentos	35
Quadro 3.1 - Guia para seleção da vida útil de um projeto	41
Quadro 3.2 - Classificação dos veículos para contagens de tráfego	43
Quadro 3.3 - Coeficientes de equivalência entre diferentes valores de carga por eixo	44
Quadro 3.4 - Fatores de cargas de tráfego de projeto	46
Quadro 3.5 - Classes de tráfego para o projeto de pavimentação (MTPW, 2013 a)	46
Quadro 3.6 - Classes de tráfego (ERA, 2011)	47
Quadro 3.7 - Classes de Fundação (ERA, 2011)	48
Quadro 3.8 - Categorias de materiais de pavimento (SATCC, 2003)	49
Quadro 3.9 - Métodos de dimensionamento de pavimentos adequados para uso na SADC ...	56
Quadro 3.10 - Classes de Tráfego (SATCC, 1998)	57
Quadro 3.11 - Classes de Fundação (SATCC, 1998)	58
Quadro 3.12 - Reclassificação de condições climáticas para regiões húmidas	58
Quadro 3.13 - Tipologias de estruturas previstas no catálogo de estruturas	59
Quadro 3.14 - Frequência de ensaios DCP	61
Quadro 3.15 - Percentis da taxa máxima de penetração do DCP	63
Quadro 3.16 - Catálogo de projeto com base no DCP para diferentes classes de tráfego	64
Quadro 3.17 - Projeto de pavimento com revestimentos betuminosos	67
Quadro 3.18 - Projeto de pavimento betuminoso - Quadro 2 (ANE, 2014)	67
Quadro 3.19 - Classes de fundação (Gourley et al, 1999)	68
Quadro 3.20 - Classes de tráfego de projeto (Gourley et al., 1999)	68
Quadro 3.21 - Espessura total do pavimento em função do CBR do Manual FCE.....	76
Quadro 3.22 - TMDA em ambos os sentidos	77
Quadro 3.23 - Fatores de equivalência de veículos e eixos padrão (caso prático)	77

Quadro 3.24 - Valores DN - Percentil 80	78
Quadro 3.25 - Dados recolhidos	78
Quadro 3.26 - Avaliação da resistência da camada para cada secção uniforme	79
Quadro 3.27 - Identificação das melhorias a implementar nas secções uniformes	80
Quadro 3.28 - Relação aproximada entre os valores da CBR e DN obtidos laboratorialmente com diferentes teores de humidade.....	80
Quadro 3.29 - Cenários utilizados no estudo paramétrico	83
Quadro 3.30 - Estruturas de pavimento obtidas no estudo paramétrico	84
Quadro 4.1 - Estratégias de conservação de pavimentos	87

ÍNDICE DE QUADROS EM ANEXO

Quadro I 1 - Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados no Método do Catálogo para projeto de estradas revestidas e não revestidas (ANE, 2014)	112
Quadro I 2 - Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto (Gourley et al, 1999).....	113
Quadro I 4 - Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto (SATCC, 1998)	113
Quadro II 1- Gráfico 1 - Estruturas consideradas para o dimensionamento de pavimento para N<4 (Gourley et al, 1999).....	114
Quadro II 2- Gráfico 2 - Estruturas consideradas para o dimensionamento de pavimentos para N>4 (Gourley et al, 1999).....	115
Quadro II 3- Gráfico W1 para regiões húmidas (SATCC, 1998).....	116
Quadro II 4- Gráfico D1 para regiões secas (SATCC, 1998).....	117
Quadro IV 1 - Paliativos de poeira e auxiliares de compactação e estabilizadores (Henning et al, 2008; MAI, 2005)	119

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

AADT	Annual average daily traffic
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AFCAP	Africa Community Access Programme
ANE	Administração Nacional de Estradas (Moçambique)
APDG	Austrroads Pavement Design Guide
AUSTROADS	Association of Australia and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities
BS	British Standard
CBR	California Bearing Ratio
CESA	Cumulative Equivalent Standard Axles
CR	Compactação relativa (%), referido ao Proctor modificado
CSIR	Council for Scientific and Industrial Research
CUSUM	Cumulative Sum
DCP	Dynamic Cone Penetrometer
DESA	Design Equivalent Standard Axles
DN	Penetração média em mm/golpe do DCP na camada
DSN₈₀₀	Número total de golpes necessário para uma penetração no pavimento de 800 mm
DT	Tráfego total acumulado de projeto para cada categoria de veículos, por sentido
EBVT	Estrada de Baixo Volume de Tráfego
EF	Equivalence Factor (mean axle load)
EM	Métodos empírico-mecanicistas
ERA	Ethiopian Roads Authority
ESA	Equivalent Standard Axle (80 kN)
FWD	Falling weight deflectometer
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IP	Índice de Plasticidade
IRI	International Roughness Index
kgf	Quilograma-força
km	Quilómetro
kN	QuiloNewton
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LSP	Layer Strength Profile
m	Metro
MAI	Ministry of the Administration and Interior (Roménia)
MESA	Million Equivalent Standard Axles

MGNL	Materiais granulares não ligados
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MTPW	Ministry of Transport and Public Works of Malawy
N	Vida útil de projeto, em anos
NG	Natural Gravel
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
ORN	Overseas Road Note
PM	Plastic Modulus
PSI	PSI – Present Serviceability Index
r	Taxa de crescimento anual
SADC	Southern African Development Community
SATCC	Southern Africa Transport and Communications Commission
SB	Sub-base
SN	Structural Number
SSATP	Africa Transport Policy Program
T	Tráfego médio diário para cada categoria de veículos, por sentido
TMDA	Tráfego Médio Diário Anual
TMDA_p	Tráfego Médio Diário Anual de pesados
TRL	Transport Research Laboratory
WSDOT	Washington State Department of Transportation.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O foco de investimentos nas infraestruturas rodoviárias fica, geralmente, voltado para as estradas ditas de alto tráfego. No entanto, deverá ser dada também relevância às Estradas de Baixo Volume de Tráfego (EBVT), dada a sua importância económica e social. Estas, pela mobilidade de pessoas e bens que proporcionam, são responsáveis por permitir o acesso às necessidades básicas, assegurando a alimentação, a educação e os cuidados de saúde à população rural. São também responsáveis por grande parte do transporte de matérias-primas, o que torna evidente a sua importância para os territórios que as EBVT servem.

É indiscutível que o transporte eficaz desempenha um papel crucial no desenvolvimento rural, socioeconómico e na redução da pobreza. A situação típica na maioria dos países pobres é o facto de uma grande parte da população rural ter a economia baseada na agricultura. Nestas situações é imperativo fornecer às comunidades rurais um acesso seguro e sustentável aos serviços básicos. Esses países geralmente apresentam uma rede de estradas rurais não pavimentadas, sendo difícil implementar soluções de pavimentação com os materiais de construção convencionais, por serem muitas vezes escassos ou estarem somente disponíveis a alto custo. É, portanto, cada vez mais importante incentivar o desenvolvimento de redes de estradas rurais de uma forma acessível e sustentável, utilizando de forma eficiente os recursos locais para fornecer infraestruturas de transporte de baixo custo.

A utilização máxima de materiais locais não processados é um pilar central da filosofia de projeto das EBVT. As especificações atuais, particularmente nas zonas do mundo mais desenvolvidas, tendem a excluir o uso de muitos materiais naturais, não transformados (solos naturais, misturas de solo-cascalho e cascalho) em camadas de pavimentos, em favor de materiais britados mais caros. Esta é a abordagem padrão das especificações, a qual estabelece requisitos orientados para as estradas de alto volume de tráfego. No entanto, trabalhos recentes têm demonstrado que os chamados materiais "não-padrão" podem, muitas vezes, ser usados com sucesso e de forma rentável em pavimentos de EBVT, desde que sejam tomadas precauções adequadas (ERA, 2011).

1.2 Objetivos e Metodologia de Trabalho

A presente dissertação tem como objetivos reunir num documento um conjunto de abordagens desenvolvidas para EBVT, incluindo a evolução no projeto deste tipo de pavimento, as

tecnologias de pavimentação e o uso de técnicas de construção e de manutenção que permitem tirar partido do uso de materiais locais.

Neste sentido, o objetivo deste documento é fornecer um conjunto básico de requisitos de qualidade para projetar, realizar e supervisionar a construção e manutenção de pavimentos de estradas de baixo volume de tráfego.

Tem-se ainda como objetivo a análise de alguns métodos disponíveis para o dimensionamento de pavimentos para EBVT, de modo a ser possível fazer uma estudo paramétrico de várias estruturas de pavimentos, para diferentes combinações de tráfego, condições climáticas e materiais disponíveis, utilizando várias metodologias.

Um objetivo adicional é o de sistematizar informação sobre as estratégias e as técnicas de conservação de pavimentos com baixo volume de tráfego, de modo a evidenciar as mais vantajosas.

Como metodologia de trabalho, a dissertação centra-se principalmente em tarefas de revisão bibliográfica que possibilitem reunir num único documento, escrito em língua portuguesa, a informação mais relevante no que diz respeito à conceção, dimensionamento, construção e conservação de pavimentos de EBVT.

Além disso, uma vez que os métodos de dimensionamento utilizados com mais frequência em vários países têm diferentes configurações e pressupostos, a metodologia de trabalho inclui a realização de um estudo paramétrico de dimensionamento que permite averiguar as eventuais diferenças entre os diferentes procedimentos, quer no que diz respeito à recolha de dados de projeto, quer no que diz respeito às estruturas de pavimentos a que se chega para situações de solicitação similares.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos e quatro anexos.

Neste Capítulo 1 é apresentado o tema da pesquisa, os objetivos pretendidos e a metodologia seguida para os atingir, e descreve-se a organização do documento.

No Capítulo 2 é apresentada uma síntese do conhecimento relativo às características gerais dos pavimentos das estradas com baixo volume de tráfego (EBVT). Apresentam-se as classificações deste tipo de estradas adotadas em diversos países, descreve-se o ambiente rodoviário típico e referem-se alguns aspetos relativos à geometria do traçado. São ainda, particularmente descritos os tipos de estruturas de pavimentos utilizados, as opções existentes para as camadas superficiais, bem como outros aspetos relacionados, tais como a drenagem dos pavimentos e os requisitos estabelecidos para os materiais. São ainda apresentadas algumas questões de ordem prática, tais como as relacionadas com a presença de solos problemáticos.

O Capítulo 3 centra-se na problemática da conceção e dimensionamento de pavimentos de estradas de baixo volume de tráfego, incluindo aspetos inerentes à avaliação da capacidade de

suporte do solo existente, aos volumes de tráfego e aos procedimentos de dimensionamento dos pavimentos mais utilizados atualmente. Apresentam-se também orientações sobre vários aspectos do processo de concepção das EBVT e dos seus pavimentos, e mostra-se a influência dos fatores ambientais no dimensionamento.

Faz-se, ainda a apresentação de um caso prático onde se descreve em particular a aplicação de 4 dos métodos apresentados e um estudo paramétrico com 3 dos métodos descritos e uma análise comparativa dos resultados obtidos para os cenários simulados.

O Capítulo 4 é dedicado à manutenção deste tipo de estruturas, sendo abordados os tipos de deterioração habitualmente manifestados nestas estradas e as técnicas disponíveis para as corrigir.

O Capítulo 5 tem como propósito a sistematização do conhecimento gerado durante a pesquisa, suas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PAVIMENTOS DE EBVT

2.1 Enquadramento Geral

Um estudo desenvolvido pela OCDE (1986) mostrou que as estradas de baixo volume de tráfego (EBVT) representam 60 a 70% de toda a rede rodoviária dos países desenvolvidos¹ pesquisados, podendo chegar até 95% nos países em desenvolvimento (Sant'ana, 2009). No subcapítulo 2.2 apresentam-se algumas formas de classificação deste tipo de estradas.

Segundo o *Low Volume Rural Roads Manual* (ANE, 2014), as abordagens de projeto para EBVT diferem significativamente das utilizadas nas estradas de alto volume de tráfego, pelas seguintes razões:

- O nível de serviço necessário é significativamente inferior ao das vias convencionais;
- Os padrões de projeto para a geometria do traçado e pavimento apropriados para estradas convencionais não se aplicam às EBVT, nas quais os volumes de tráfego e as cargas transportadas são muito mais baixos.
- A proporção de veículos pesados na composição do tráfego é muito menor;
- Os requisitos para a qualidade dos materiais são diferentes, uma vez que podem ser aplicados materiais com menor resistência e durabilidade em EBVT, o que significa que muitos materiais disponíveis localmente podem ser usados com sucesso nos pavimentos destas estradas;
- Os requisitos para as EBVT são menos exigentes, conseguindo-se, por exemplo, melhorar estradas não pavimentadas, sem grande necessidade de alteração do traçado geométrico, tirando partido da resistência *in-situ* dos materiais existentes, podendo, assim, ser construído um pavimento a um custo baixo;
- Projetos de EBVT permitem o uso de tecnologias de construção simples, o que facilita o recurso a empreiteiros locais de pequena dimensão.

Projetam-se EBVT de maneiras diversas e de acordo com as condições de cada país. Embora o conceito de EBVT seja geralmente definido em relação aos referenciais de cada local, as circunstâncias de baixa disponibilidade de recursos para planeamento, projeto, construção,

¹ O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da Organização das Nações Unidas (ONU) é uma medida estatística que mede o nível de desenvolvimento humano de um país, englobando três dimensões: riqueza, educação e esperança média de vida. Os países desenvolvidos geralmente são os que apresentam IDH elevado. Países que não entram em tais definições são classificados como países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos.

manutenção e gestão deste tipo de estradas são comuns em todo mundo. Estas realidades desafiam os engenheiros a procurarem soluções tecnológicas menos correntes em cada uma das fases de desenvolvimento de uma EBVT.

2.2 Classificação de Estradas de Baixo Volume de Tráfego

Em muitos países, a classificação das estradas cujo traçado se desenvolve em extensas zonas rurais baseia-se em critérios administrativos ou políticos, e não nas características do tráfego que a estrada irá suportar. No entanto, estas estradas precisam de ser projetadas para comportar os diversos tipos de veículos, o volume de tráfego e o número de utentes motorizados e não-motorizados previstos.

De modo a evidenciar a falta de consenso generalizado sobre quais as vias a considerar como EBVT, nos parágrafos seguintes apresentam-se as regras consideradas para o efeito em diversos países e por vários organismos. As estradas podem ser classificadas como sendo de alto volume de tráfego e de baixo volume de tráfego, não existindo um critério único para aquelas classificações.

No Reino Unido, a hierarquia das estradas é feita de acordo com a sua função e capacidade para escoar o tráfego. A classificação básica consiste em seis grandes grupos: Autoestradas; Estradas primárias A; Estradas não-primárias A; Estradas B; Estradas C; Estradas não classificadas. Enquanto os três primeiros grupos são responsáveis por fornecer as principais rotas para viagens longas e de transporte de mercadorias entre os principais centros urbanos, os três últimos grupos proporcionam o acesso a zonas menos povoadas e viagens mais curtas, sendo nestes grupos que se enquadram as EBVT (Brito, 2011).

Em França, consideram-se como veículos pesados os que têm carga útil acima de 5 toneladas. O número de veículos é medido para a via com maior tráfego por sentido, para o ano de abertura ao tráfego. As classes T5, T4 e T3 são as que podem ser consideradas de baixo volume, as quais consideram valores abaixo de 150 veículos pesados, na via mais solicitada, no ano de abertura ao tráfego (Sant'ana, 2009).

A *Southern Africa Transport and Communications Commission* (SATCC) é constituída por Angola, Botswana, Lesotho, Malawi, Moçambique, Namíbia, Swazilândia, Tanzânia, Zâmbia e Zimbabué. Segundo a (SATCC, 2003), com exceção da África do Sul, grande parte das principais estradas do território da SATCC têm volumes de tráfego modestos, havendo pouco mais de 10% das mesmas com 2000 veículos por dia. A percentagem de veículos pesados no tráfego destas estradas é de cerca de 25%, embora muitas vezes circulem com excesso de carga. Em estradas rurais, os volumes de tráfego são relativamente mais baixos e grande parte desta rede apresenta valores de tráfego num intervalo entre 50 e 200 veículos por dia. Perto das povoações o tráfego não motorizado, incluindo o de bicicletas, constitui muitas vezes uma parte significativa do tráfego total. As estradas na região da SADC (*Southern African Development Community*) são tipicamente classificadas de acordo com a função, conforme mostrado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Funções típicas de estrada e classificação (adaptado de SATCC, 2003)

Função da Estrada				Classe de Projeto	Fluxo de tráfego (TMDA)	Tipo de superfície típica
Es	P	S	Te			
				A	>2000	Pavimentada
				B	500 – 2000	Pavimentada
				C	200 – 500	Pavimentada/ Não pavimentada
				D	50 - 200	Não pavimentada
				E	<50	Não pavimentada
Es – Estruturante; P – Primárias; S – Secundárias; Te – Terciárias/acessos						

Um amplo estudo conduzido pela OCDE (1986) em vários países mostra que as EBVT são geralmente estradas locais, eventualmente coletoras, podendo fazer a ligação entre pequenas cidades, ou entre estas e centros de maior importância. Nos países desenvolvidos pesquisados, as EBVT apresentam, em geral, uma ou duas vias e um tráfego total inferior a 1.500 veículos por dia (em 70% das estradas TMDA < 900 veículos). Cerca de 80 a 90% dos veículos à época do estudo eram ligeiros, sendo os restantes veículos pesados (Sant'ana, 2009).

Para os países em desenvolvimento incluídos no estudo da OCDE foram identificados três tipos de categorias de estradas: (i) estradas com várias vias de tráfego em cada sentido; (ii) estradas com tráfego baixo a médio, com duas vias; (iii) estradas com um volume de tráfego baixo a muito baixo, subdivididas em estradas locais e de serviço. As estradas classificáveis como EBVT são as indicadas em (ii), as quais apresentam menos de 2000 veículos por dia (quase 50% destas com TMDA < 400), e as estradas indicadas em (iii), as quais têm um TMDA menor que 100 veículos (Sant'ana, 2009).

De acordo com a recolha de informação feita por Fortunato et al. (2013), a classificação de estradas compreende:

- Itinerário principal: vias destinadas a assegurar ligações entre grandes centros urbanos ou ligações internacionais. Geralmente, destinam-se a elevados níveis de tráfego, maiores velocidades de projeto, e correspondem a maiores percursos;
- Vias coletoras ou distribuidoras: vias de ligação entre zonas rurais e centros urbanos, ou entre itinerários principais, com níveis de tráfego e distâncias de percurso intermédios;
- Vias de acesso: vias destinadas a tráfego pouco intenso, relacionadas com distâncias de percurso pequenas, muitas vezes utilizadas por tráfego não motorizado (pedonal, ciclistas, ...).

No Quadro 2.3 resumem-se as características típicas associadas a EBVT em função da sua classificação.

Quadro 2.2 - Classificação de estradas (Fortunato et al, 2013)

Prioridade	Primária	Secundária	Terciária	
Função	Itinerário principal	Coletora ou distribuidora	Acesso	
	Elevada importância económica		Função social	
Características típicas				
Físicas	2 ou + vias	2 vias	1 via	Trilho
	Revestidas	Revestida com macadame ou solos	Macadame ou solos	Solos
Tráfego (TMDA)*	>2000	50 – 2000	< 50	< 10
Função	Mobilidade		Acesso	
Distância de viagem	Longa		Curta	

*A classificação e características físicas associadas a cada classe variam de país para país. O valor da carga adotado como referência para o cálculo do número de eixos padrão é também variável.

Nos Estados Unidos, aproximadamente 80% da rede rodoviária tem um TMDA inferior a 400 veículos. A AASHTO (2001) publicou um guia para o projeto geométrico do traçado de EBVT no qual especifica que o limite de TMDA é de 400 veículos (ligeiros e pesados), sendo ainda consideradas subcategorias de TMDA (< 100, 100-250, 250-400).

De acordo com a AASHTO (1993), as EBVT pavimentadas devem ter entre 0,7 e 1 milhão de número equivalente de eixos padrão (*Equivalent Single Axle - ESA*) num dado período de dimensionamento, com 50.000 ESA como mínimo admissível na prática. Para as EBVT, o Departamento de Transportes do estado de *Washington* (WSDOT, 1995) dos Estados Unidos limita o tráfego a 50.000 ESA por ano, para um horizonte de projeto de 20 anos. O Manual de Pavimentos da AASHTO – *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* – (referido por Behak, 2013), sugere como número máximo de veículos pesados (na vida útil do pavimento) a considerar para o dimensionamento de pavimentos de EBVT o valor de 750.000 ESA.

Sant’ana (2009) refere, ainda, que Hudson et al (1997), dividem as EBVT em duas classes:

- Classe I, com TMDA < 50 veículos – são estradas cujo pavimento é formado essencialmente pelo terreno natural, podendo possuir revestimento primário, mas raramente com algum tipo de superfície de circulação tratada;
- Classe II, com TMDA entre 50 e 400 veículos – são estradas cujos pavimentos possuem revestimentos primários com algum tipo de estabilização e, para tráfegos mais próximos do limite superior, podem apresentar algum tipo de tratamento superficial.

Como se mostrou, as EBVT de certas regiões de países desenvolvidos podem apresentar um tráfego equivalente a um tráfego alto ou médio em outras regiões de países em desenvolvimento, com diferentes densidades populacionais e tipos de ocupação do solo. Assim, os problemas enfrentados pelas autoridades rodoviárias são diferentes de região para região, ou de país para país, pois estão relacionados com a qualidade do material de pavimentação, clima e com os volumes de tráfego.

Há claramente a necessidade de se estabelecer um limite superior para o volume de tráfego nas estradas que possam ser incluídas dentro da abordagem de EBVT. Em termos gerais, esse

limite corresponde às situações em que o tráfego deixa de ser o fator dominante de deterioração das estradas, havendo outros fatores do ambiente rodoviário que condicionam o futuro estado da infraestrutura, tal como pode ser observado na Figura 2.1.

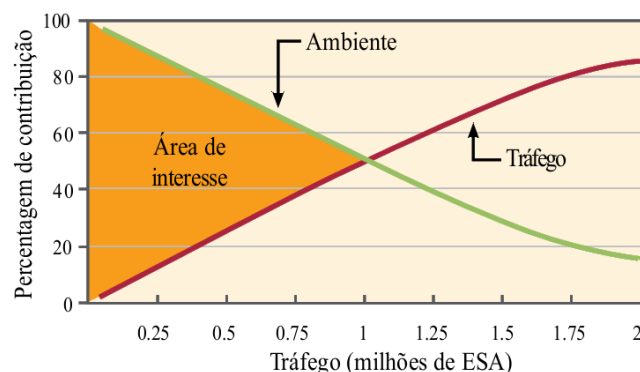


Figura 2.1 - Impactos relativos do tráfego e outros fatores do ambiente rodoviário na deterioração de uma EBVT (adaptado de MTPW, 2013 b)

Em geral, pode considerar-se que as EBVT são estradas que têm baixa utilização (um TMDA inferior a 400 veículos por dia), baixas velocidades base (normalmente menos de 80 km/h), e características geométricas correspondentes à baixa velocidade base considerada. A maioria das estradas em áreas rurais são EBVT.

2.3 Ambiente Rodoviário

Torna-se cada vez mais reconhecido que o desempenho ao longo do tempo de serviço de uma EBVT é influenciado de forma significativa pelos impactes do denominado "ambiente rodoviário" e, em particular, pelos fatores relacionados com as condições de serviço e propriedades dos materiais nesse ambiente, tal como indicado esquematicamente na Figura 2.2 e no Quadro 2.3.

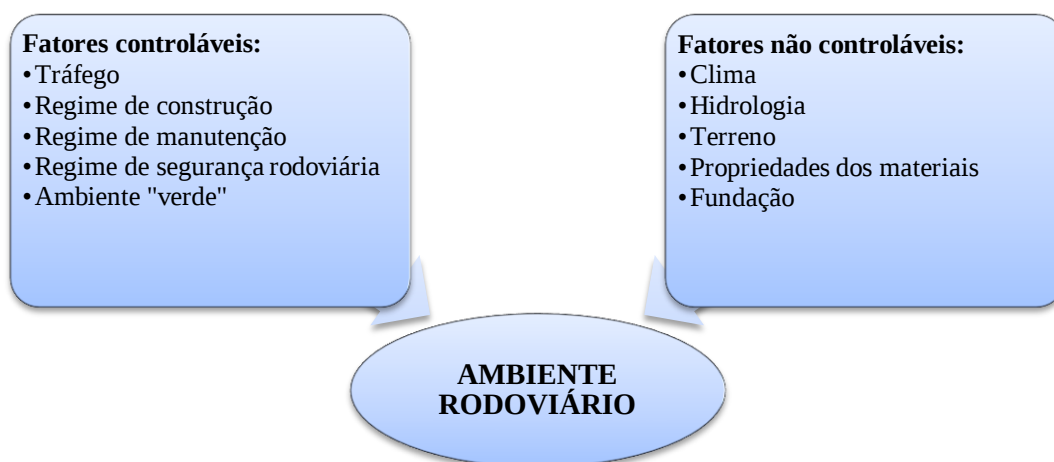


Figura 2.2 - Fatores do ambiente rodoviário (ERA, 2011)

Quadro 2.3 - Fatores do ambiente rodoviário que influenciam as soluções técnicas para pavimentos de EBVT (ERA, 2011)

Fator	Descrição
Clima	Os parâmetros climáticos influenciam a seleção de opções de pavimento, podendo estudar-se parâmetros de projeto em condições "molhadas" ou "secas". O desempenho de uma superfície de terra batida, por exemplo, é particularmente influenciado pela quantidade e intensidade de precipitação, bem como pelo regime de escoamento.
Hidrogeologia	Por vezes, é a interação da água ou, mais especificamente, o seu movimento no interior e na zona adjacente à estrutura de estrada que tem um impacto mais significativo sobre o desempenho de pavimentos, da terraplenagem e estruturas de drenagem.
Terreno	O terreno reflete a história geológica e geomorfológica. Além da sua óbvia influência sobre a geometria da estrada e dos requisitos de terraplenagem, as características do terreno também irão influenciar a disponibilidade de materiais e recursos.
Propriedades dos materiais	A natureza, as características e a localização dos materiais de construção são os principais aspetos da avaliação do ambiente rodoviário. Para EBVT, onde o uso de materiais locais é uma prioridade, a questão-chave deve ser procurar opções de projeto compatíveis com os materiais disponíveis.
Fundação	A fundação é essencialmente a camada de suporte para o pavimento e a avaliação do seu estado em serviço é fundamental para o projeto do pavimento.
Tráfego	Embora os estudos recentes indiquem que a influência relativa do tráfego nas EBVT é muitas vezes menor do que a de outros parâmetros do ambiente rodoviário, ainda necessita de ser considerada a influência do tráfego e, em particular, o risco de sobrecarga por tipo de eixo em estradas com pavimentos delgados. O tráfego tem uma grande influência no desempenho das superfícies não revestidas.
Regime de Construção	O regime de construção determina se a conceção de estrada é aplicada de uma maneira apropriada. Os elementos-chave incluem: – Quadro contratual adequado; – Experiência de empreiteiros ou grupos de construção; – Habilidades e formação da mão de obra e supervisores; – Disponibilidade, uso e adequação do equipamento de construção; – Seleção e colocação de materiais; – A garantia da qualidade; e de conformidade com a especificação; – Supervisão técnica.
Regime de Manutenção	Todas as estradas concebidas e construídas exigem manutenção regular para garantir que a sua função básica é mantida ao longo da vida útil. Conseguir isso depende das estratégias de manutenção adotadas, a oportunidade das intervenções, a capacidade local e financiamentos disponíveis para a realização das obras necessárias.

Ao escolher soluções de baixo custo para EBVT é importante entender os mecanismos de degradação em primeiro lugar. A deterioração das EBVT não pavimentadas existentes é regida pelo tipo de material utilizado na superfície (cascalho ou solo), a capacidade de carga do solo subjacente (brando, erodível e/ou expansivo), o tipo de ação e de tráfego (desde veículos pesados até ao tráfego pedonal) e, provavelmente, o mais importante, a influência do "ambiente rodoviário". O termo "ambiente rodoviário" neste contexto inclui tanto o ambiente natural ou biofísico, como o ambiente humano. Alguns dos fatores são incontornáveis, como os decorrentes do ambiente natural, tais como a interação da infraestrutura com o clima (por exemplo, vento, precipitação e intensidade), da hidrologia local com a drenagem, e do solo com a orografia. Coletivamente, estes fatores irão influenciar o desempenho da estrada, sendo necessário reconhecer tal influência logo na fase de projeto, através da consideração de opções que minorem os efeitos negativos daqueles fatores. Outros aspetos, tais como o regime de construção e manutenção, a segurança e exigências ambientais, e da magnitude e tipo de

tráfego, são em grande parte controláveis, podendo ser mais facilmente incorporados nos estudos de projeto.

2.4 Aspectos Relativos à Geometria do Traçado

A definição de requisitos geométricos do traçado das EBVT e o estabelecimento de uma classificação adequada para aquele tipo de estradas são informações importantes para as fases de avaliação da viabilidade, conceção e construção do pavimento.

O projeto da geometria é o processo pelo qual as características geométricas do traçado da estrada é projetado para atender às necessidades dos utentes. Os requisitos de projeto do traçado devem ter em consideração aspetos geralmente antagónicos tais como o custo de construção da estrada e os benefícios para os seus utentes. Normalmente, quanto mais exigentes são os requisitos da geometria, maior o custo de construção e maiores os benefícios para os utentes. Por isso, habitualmente, em função da classificação da estrada, estabelece-se um nível mínimo de requisitos que devem ser alcançados ao longo do tempo de serviço da estrada.

Os parâmetros da geometria do traçado são estabelecidos de modo a fornecer níveis mínimos de segurança e conforto para os utentes, assegurando, entre outros aspetos, as distâncias de visibilidade adequadas, os coeficientes de atrito e o espaço viário para manobras adequados. Os requisitos geométricos comandam o projeto económico e asseguram a consistência do traçado. O projeto da geometria abrange aspetos como a largura da estrada, a inclinação transversal do pavimento, e a geometria da diretriz e do perfil longitudinal.

Os principais fatores que afetam o traçado geométrico de uma EBVT são (ERA, 2011):

- Custo e nível de serviço;
- Orografia do terreno;
- Tipo de solo;
- Clima;
- Tipo de pavimento;
- Tráfego (volume e composição);
- População local (em campo aberto ou áreas povoadas);
- Segurança;
- Tecnologia de construção;
- Classificação administrativa ou funcional da estrada.

A largura da plataforma (faixa de rodagem e bermas) é uma das características geométricas mais importantes, uma vez que o seu valor está diretamente relacionado com o custo (construção e manutenção).

Uma avaliação adequada do tráfego é um aspeto fundamental para o projeto de traçado e também para o do pavimento. Contudo, é de salientar a diferença entre a natureza dos dados de tráfego necessários para cada um daqueles projetos. Para o estudo do pavimento, o tráfego é geralmente baseado numa avaliação cumulativa de repetições de cargas por eixo que o

pavimento terá de suportar. Em termos da geometria de traçado tem mais relevância o número e tipos de veículos e, eventualmente, outro tráfego não motorizado que a estrada terá de acomodar.

2.5 Pavimento

O pavimento é uma estrutura formada por múltiplas camadas, destinada a resistir no tempo à ação do tráfego de veículos e do meio ambiente, de forma técnica e economicamente adequada, proporcionando condições de circulação confortáveis e seguras. À semelhança de outras estruturas da engenharia civil, o pavimento necessita de ser dimensionado de modo a fornecer um nível de serviço adequado, para determinados volumes de tráfego e condições ambientais.

Assim, a estrutura do pavimento tem como finalidade:

- Resistir e transferir à fundação as cargas transmitidas pelo tráfego, sem sofrer alterações significativas ao longo do período para o qual foi projetado;
- Oferecer condições de segurança e conforto aos utentes;
- Possibilitar menores custos operacionais dos veículos e, em geral, menores custos para os utentes.

2.5.1 Conceção de Pavimentos

Os aspetos relacionados com a engenharia de EBVT concentram-se, por um lado, na avaliação estrutural, uma vez que esta está diretamente ligada aos custos de transporte – tempo de viagem, consumo de combustível, desgaste de pneus, manutenção de veículos, entre outros – e, por outro lado, na avaliação funcional, a qual diz respeito às questões de irregularidade superficial e limites de velocidade, pois estes influenciam diretamente os custos operacionais e o grau de conforto para o utente (Brito et al, 2007).

Em geral, os aspetos a ter em consideração na conceção de pavimentos de EBVT são os seguintes (Fortunato et al, 2013):

- Importância da estrada, de modo a minorar os condicionamentos de trânsito relacionados com a conservação e reabilitação em estradas de elevada importância estratégica;
- Orografia, com o objetivo de adequar as soluções de pavimentação às características do traçado em planta e em perfil longitudinal;
- Aspetos geotécnicos ao longo do traçado:
 - . Homogeneidade das condições de fundação;
 - . Condições de suporte do pavimento;
- Tráfego:
 - . Tipo de veículos e velocidades praticadas;

- . Número de veículos pesados – Tráfego Médio Diário Anual de pesados (TMDAp);
- . Agressividade do tráfego pesado;
- Condições climáticas:
 - . Precipitação média anual;
 - . Precipitação máxima (24 h);
 - . Temperaturas (em particular nos pavimentos com revestimento betuminoso);
- Disponibilidade de materiais / técnicas construtivas na zona da obra:
 - . Utilização de materiais naturais existentes na zona;
 - . Possibilidade de aplicação de materiais reciclados / alternativos disponíveis;
 - . Equipamentos / mão-de-obra disponíveis;
 - . Experiência adquirida anteriormente.

Na Figura 2.3 representa-se a estrutura genérica da metodologia de conceção de pavimentos para EBVT.



Figura 2.3 - Fluxograma de conceção de pavimentos de EBVT (adaptado de Fortunato et al, 2013)

A metodologia para a conceção deste tipo específico de estruturas de pavimentos deve ser suficientemente precisa para que a principal causa de ruína em EBVT - deformação permanente ou rodeiras - possa ser evitada e o nível de manutenção sustentável, conforme evidenciado na Figura 2.4. Por este motivo, a previsão da capacidade do pavimento para resistir à deformação permanente é um dos aspetos mais importantes a ser estudado.



Figura 2.4 - Pavimento de EBVT com rodeiras (Pinard, 2006)

Segundo Brito (2011), a maioria dos guias de projeto para pavimentos correntes (TRL, 1993; HMSO, 1994; Austroads, 1995) assumem que a deformação permanente ocorre principalmente na fundação, negligenciando a contribuição para a totalidade da rodeira do material granular não ligado (MGNL) das camadas de base. No entanto, estudos efetuados à escala real têm mostrado que os MGNL desempenham um papel importante no processo de formação de rodeiras (Little 1992; Arnold 2004; Dawson et al, 2005), o que mostra a necessidade da consideração do contributo daqueles materiais para a deformação permanente em guias de projeto e/ou de avaliação de pavimentos.

Apesar da importância das rodeiras nas estradas com MGNL, especialmente em pavimentos com baixo tráfego, não há métodos bem estabelecidos para estudar a deformação permanente, por exemplo em laboratório, que permitam prever a magnitude da profundidade das rodeiras nos pavimentos. De acordo com Brito (2011), na ausência de um método satisfatório para prever a profundidade das rodeiras, a conceção de pavimentos com camadas de materiais granulares permanece, na maior parte dos métodos, muito empírica. Por se tratar de métodos simplificados, torna-se difícil aproveitar ao máximo as capacidades de uma estrada com pavimentos constituídos por materiais granulares não ligados. Há uma forte necessidade de melhorar esta situação, sendo aconselhável desenvolver e introduzir na prática atual:

- Ensaios de desempenho mecânico apropriados que permitam determinar a resistência à deformação permanente do material granular solto;
- Modelos mais adequados para prever a deformação permanente em pavimentos formados em grande parte por MGNL.

Nos últimos anos, alguns estudos têm procurado compreender melhor o comportamento do material granular, as suas propriedades e desempenho em relação à deformação permanente. Como se mostrará no capítulo 3, têm sido feitos avanços consideráveis, apesar das dificuldades envolvidas no estudo dos MGNL cujo comportamento é complexo, não tendo ainda sido produzida uma abordagem mecanicista definitiva.

2.5.2 Requisitos Funcionais

De forma a cumprir os requisitos de desempenho, os pavimentos devem apresentar a sua superfície com determinadas características, designadas por características funcionais, destacando-se a regularidade geométrica, a aderência e a capacidade de drenagem de águas superficiais. Presentemente é também dada uma crescente importância aos aspetos de natureza ambiental, tais como a mitigação do ruído induzido pela circulação dos veículos ou os aspetos paisagísticos.

As estruturas dos pavimentos danificam-se progressivamente sob os efeitos da passagem do tráfego, em particular os veículos pesados, sobre a sua superfície. Caso não sejam tomadas medidas de conservação adequadas a acumulação de degradações levará à ruína estrutural.

Para que possa desempenhar adequadamente o seu papel funcional, proporcionando a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, economia e conforto, um pavimento rodoviário deverá possuir também uma estrutura adequada que garanta que aquelas

condições se mantêm acima de determinados limites ao longo da sua vida útil, sob a ação do tráfego e das condições ambientais. Além disso, as características estruturais conferem ao pavimento a capacidade de carga suficiente para o tráfego a que se destina.

A estrutura de um pavimento rodoviário geralmente apresenta a constituição que pode ser observada na Figura 2.5, sendo as funções de cada camada resumidas no Quadro 2.5.

A função principal das camadas do pavimento (base e sub-base) é fornecer cobertura suficiente sobre a fundação para limitar as tensões e deformações induzidas pelas cargas das rodas, de tal modo que não ocorra ruína por corte na fundação. A função principal do revestimento é manter o pavimento seco e protegido da água.

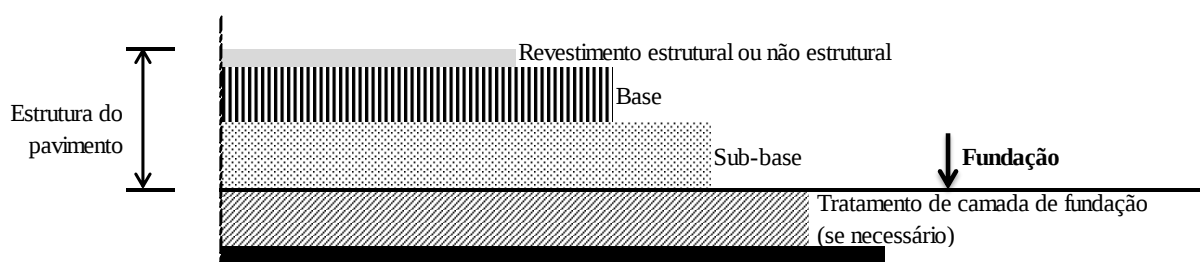


Figura 2.5 - Estrutura esquemática de um pavimento rodoviário (adaptado de ERA, 2011)

A Figura 2.6 ilustra conceitualmente o modo como o pavimento funciona sob a ação de carga. Em geral, a carga da roda, W , é transmitida à superfície do pavimento através do pneu, através de uma tensão vertical, sensivelmente uniforme, P_0 . O pavimento, em seguida, distribui a carga da roda para o aterro de modo a que o máximo de tensão sobre o aterro é apenas P_1 . Através de uma seleção apropriada de materiais de pavimentação e com uma espessura de pavimentação adequada, P_1 será suficientemente pequena para ser facilmente suportada pela fundação (MTPW, 2013 b).

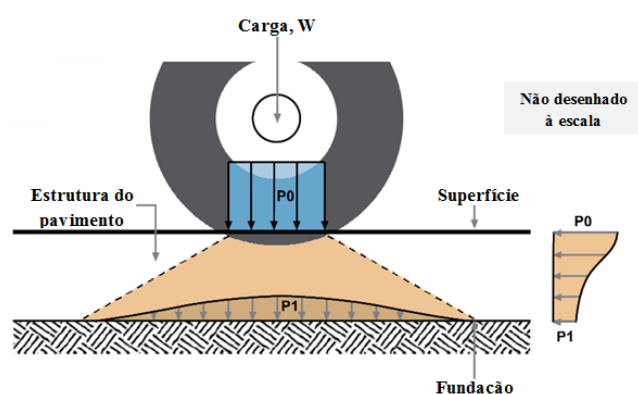


Figura 2.6 - Transferência de carga de uma roda através no pavimento (adaptado de MTPW, 2013 b)

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 (por exemplo, tratamentos superficiais betuminosos, tal como o revestimento superficial) não contribuem para a resistência estrutural global do pavimento, enquanto outros (por exemplo, macadame de penetração) o fazem. No caso de pavimentos não revestidos, o solo natural ou cascalho é o principal componente estrutural. As principais funções das camadas do pavimento são apresentadas no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Funções dos principais componentes do pavimento (adaptado de MTPW, 2013 a)

Componente	Função
Revestimento	– Fornece uma superfície suave de circulação; – Fornece uma superfície segura, económica, durável e adequada às diversas condições atmosféricas; – Reduz os custos operacionais e de manutenção de veículos; – Reduz a infiltração de água no pavimento; – Fornece propriedades adequadas para os utilizadores, por exemplo, redução de poeira, resistência à derrapagem e textura da superfície; – Delimita faixas de tráfego e bermas, ciclovias e dispositivos de acalmia de tráfego; – Melhora o ambiente da estrada em termos visuais, para os utentes da estrada e para as comunidades existentes ao longo do traçado.
Base	– Fornece a maior parte da capacidade estrutural, em termos de degradação de tensões, através da resistência ao corte e coesão; – Reduz as variações de resistência ao longo do tempo por ter relativamente baixa suscetibilidade à humidade; – Minimiza a entrada de humidade no pavimento por ter retração adequada e propriedades de resistência à fadiga; – Fornece uma superfície de rolamento desempenada por ter estabilidade de volume ao longo do tempo, sob a ação de cargas;
Sub-base	– Fornece uma plataforma estável para a construção da base e do revestimento; – Auxilia no desempenho da estrutura do pavimento para que as tensões na fundação sejam mantidas dentro de limites aceitáveis.
Fundação	– Material que ocorre naturalmente ao longo do traçado da estrada e que constitui um suporte para as camadas do pavimento.

Os pavimentos sofrem degradações com o tempo associadas a várias patologias, como é o caso de deformações permanentes excessivas, fendilhamento por fadiga e por retração térmica, entre outras. As duas primeiras estão mais relacionadas com o tráfego atuante e a estrutura do pavimento, enquanto que o fendilhamento está relacionado com as características dos materiais utilizados e as condições ambientais.

2.5.3 Estruturas de pavimento utilizadas em EBVT

A descrição que se apresenta nesta secção segue de perto o que é referido por MTPW (2013 a), MTPW (2013 b), SATCC (2003), ERA (2011) e Fortunato et al, (2013) a propósito de estruturas de pavimentos de EBVT.

Pelo seu baixo volume de tráfego, os pavimentos das EBVT não são habitualmente dotados de uma camada superficial de revestimento. São construídos diretamente com o material

natural, ou sobre uma camada constituída geralmente por um solo local com alguma percentagem de cascalho, o qual torna o pavimento mais resistente à ação do tráfego e das intempéries. A ausência de um revestimento adequado para materializar a superfície de circulação inibe o aumento de tráfego e o desenvolvimento regional, além de constituir uma solução agressiva para o meio ambiente, pois requer, a médio e a longo prazo, mais material para a sua conservação em comparação com uma superfície de circulação com revestimento.

A adoção de uma estrutura de pavimento adequada traz grandes benefícios para a sociedade, como conforto aos utentes, diminuição dos custos operacionais dos veículos e, consequentemente, menores custos de transporte, desenvolvimento regional e qualidade de vida.

Numa estrutura de pavimento para EBVT as espessuras das camadas, os materiais e as técnicas utilizados devem ser função do tráfego solicitante e da disponibilidade de materiais locais, resultando assim num custo menor.

Existe uma vasta gama de revestimentos de pavimentos, tanto betuminosos como não betuminosos, os quais podem ser usados em várias combinações, sendo geralmente adequados para incorporação em pavimentos de EBVT. Estas opções permitem o máximo uso dos materiais disponíveis localmente e a redução de materiais de pavimentação mais caros e de melhor qualidade, especialmente quando têm de ser processados ou transportados por longas distâncias.

Os pavimentos das EBVT são muito sensíveis à variação das características dos materiais (granulometria, índices de consistência, capacidade de suporte, por exemplo), às falhas de execução, às intempéries e ao excesso de carga, justamente por apresentarem uma estrutura de camadas simplificada, materiais por vezes pouco resistentes e revestimentos, quando existem, geralmente bastante delgados e constituídos por tratamentos superficiais. As camadas usuais nos pavimentos das EBVT são as já indicadas na Figura 2.5.

Assim, os pavimentos das EBVT têm estruturas em parte semelhantes às dos utilizados noutros tipos de estradas, embora não incluam geralmente camadas ligadas por terem custos elevados, devido à utilização de ligantes hidráulicos ou betuminosos. Por conseguinte, as camadas granulares são, tradicionalmente, as camadas estruturalmente mais importantes e têm a função de distribuir as cargas induzidas pelo tráfego, de modo a que a fundação, em geral com menor capacidade de carga, possa suportar o nível de tensão que a solicita.

O grau de sofisticação dos estudos de projeto de pavimentação tendem a aumentar à medida que a importância da estrada aumenta. No entanto, isso não significa que estradas com pavimentos de solo ou com cascalho sejam mais fáceis de projetar. Dada a complexidade do comportamento dos materiais envolvidos, ocorre precisamente o contrário.

No Quadro 2.5 apresentam-se as características das estruturas de pavimento mais utilizadas.

Quadro 2.5 - Características de principais estruturas de pavimentos EBVT (adaptado de Fortunato et al, 2013)

Estrutura	Características
Revestimento com solo ou cascalho	Menores custos iniciais Requer manutenção frequente Requer uso contínuo de recursos (agregados) Custos de conservação elevados Utilização condicionada pelas condições climáticas
Revestimento betuminoso	Maiores custos iniciais Maior durabilidade Custos de conservação inferiores, se bem executado Utilização em quaisquer condições climáticas
Revestimentos não betuminosos (Blocos, pedra)	Utilização de mão-de-obra intensiva Boa durabilidade, se bem executados Facilidade de realizar reparações localizadas Utilização em quaisquer condições climáticas

As estradas com pavimento em cascalho ou solo são particularmente vulneráveis aos efeitos do ambiente rodoviário. A gama de opções de revestimentos mais duráveis inclui revestimentos betuminosos delgados e revestimentos não betuminosos, tais como blocos de rocha e betão.

No caso dos revestimentos em calçada, por exemplo, apesar de serem executados com recursos disponíveis localmente, exigem pouca manutenção, dando origem a uma superfície de circulação relativamente áspera. Quanto aos tratamentos superficiais, proporcionam superfícies mais suaves de circulação, mas podem exigir terraplenagem e camadas de pavimento mais caras, bem como betume importado, equipamentos especializados e operadores qualificados. Deste modo, os tratamentos superficiais não devem ser construídos onde não há capacidade para manutenção corrente, incluindo reparação de covas e de fendas, bem como uma reabilitação periódica. Nas Figuras 2.7 e 2.8 ilustra-se a constituição de pavimentos de EBVT com e sem revestimento.

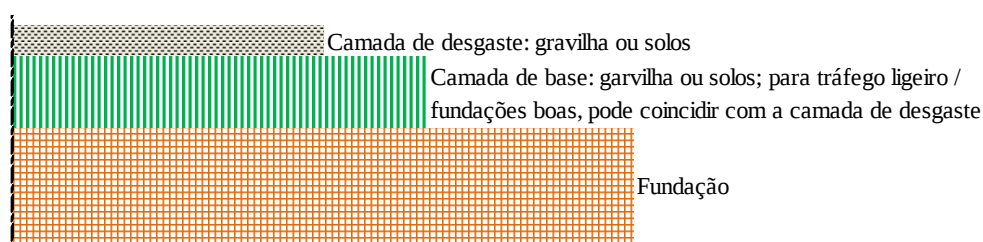


Figura 2.7 - Estrutura do pavimento de estradas não revestidas (adaptado de Fortunato et al, 2013)

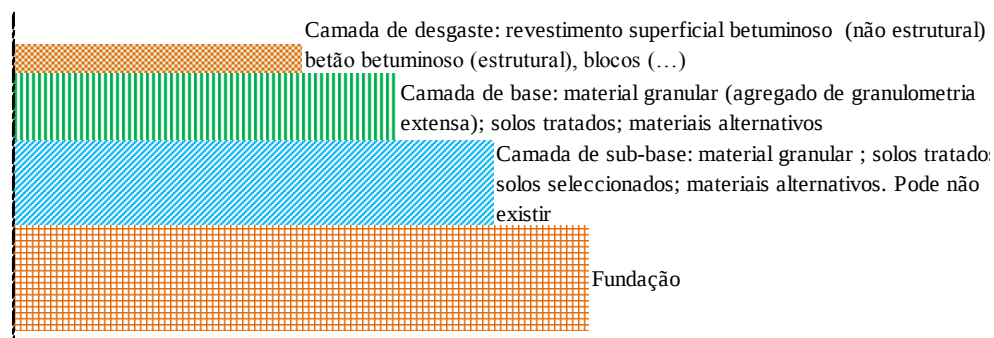


Figura 2.8 - Estrutura do pavimento de estradas revestidas (adaptado de Fortunato et al, 2013)

A natureza e a resistência do solo subjacente são fundamentais para determinar o desempenho dos pavimentos das EBVT, em particular nos períodos de tempo húmido. Em muitas estradas desenvolvem-se rodeiras profundas porque a fundação do pavimento não é suficientemente resistente para suportar as cargas do tráfego. Alguns pavimentos têm materiais de revestimento soltos e/ou pedregosos, levando à formação de poeira e à ocorrência de superfícies ásperas e/ou escorregadias.

O cascalho para obras rodoviárias é um recurso natural não-renovável. Em estradas com pavimentos não revestidos aquele material é usado em camadas de desgaste, devendo ser substituído periodicamente porquanto é possível o pavimento perder até 150 mm de cascalho por ano. Estradas com pavimentos granulares requerem um ciclo contínuo de regularização e recarga de material para manter a superfície com o nível de serviço desejado.

A escolha do tipo de pavimento, em cada caso, envolve um compromisso entre o custo inicial e o nível dos requisitos de serviço e de manutenção.

2.5.4 Materiais

Conforme se referiu anteriormente, na construção dos pavimentos das EBVT são utilizados usualmente solos, agregados e materiais betuminosos:

- Solos - A capacidade de suporte dos solos é um dos principais fatores a ser considerado no projeto do pavimento. O Índice de Suporte Californiano, conhecido por CBR (*California Bearing Ratio*) é um dos parâmetros empíricos que pode ser utilizado para quantificar a capacidade de carga dos solos para resistirem a cargas em condições de deformação aceitáveis. Trata-se de um ensaio mecânico que mede a resistência do solo, submetendo-se um provete à penetração de um pistão de aço, em condições normalizadas. Os solos devem atender também a certos requisitos de granulometria e plasticidade.
- Agregados - Consideram-se incluídos neste grupo a rocha britada, os blocos e seixos rolados e britados, a areia e o pó de pedra. São caracterizados principalmente pela sua granulometria e resistência mecânica. O ensaio de resistência usualmente utilizado é o Ensaio de *Los Angeles* que mede a resistência à fragmentação. Consiste na colocação de uma amostra com granulometria normalizada, em conjunto com esferas metálicas, dentro de um tambor rotativo que, ao girar, provoca a fragmentação do material. O

indicador de resistência à fragmentação utilizado é a percentagem da massa de material que passa num peneiro especificado, após o ensaio, em relação à massa total da amostra.

- Materiais betuminosos - Os materiais betuminosos são utilizados em pavimentação como ligantes, sendo caracterizados pela sua consistência (ou viscosidade). O betume tem viscosidade elevada à temperatura ambiente, sendo necessário diminuir a sua viscosidade antes da sua aplicação, tanto nas misturas em central como nos tratamentos superficiais, podendo conseguir-se isso por aquecimento, diluição ou emulsificação.

2.5.4.1 Utilização adequada dos materiais locais

Em muitas partes do mundo, existem abundantemente na natureza solos, misturas de solo com brita e/ou cascalho suscetíveis de utilização em obras rodoviárias. Estes materiais, não processados industrialmente, são um recurso valioso dado que são relativamente baratos para explorar quando comparados com os materiais processados, como, por exemplo, a rocha britada. Além disso, são muitas vezes a única fonte de material disponível numa distância de transporte razoável do trajeto da estrada. Assim, a fim de reduzir os custos de construção, deverá ser feita uma utilização máxima dos materiais disponíveis localmente. No entanto, o seu uso requer, por um lado, um bom conhecimento das suas propriedades e comportamento e, por outro lado, uma análise das solicitações do tráfego, das características do ambiente físico e das interações entre elas.

Embora muitos materiais naturais não satisfaçam os requisitos técnicos convencionais, poderão, no entanto, proporcionar um desempenho satisfatório. A sua escolha deve ser baseada em critérios de seleção desenvolvidos localmente, utilizando eventualmente ensaios de uso não generalizado, tendo em consideração as técnicas de construção a implementar.

Segundo Cook et al (2013), os principais fatores a serem considerados na seleção de materiais são:

- Localização de materiais, qualidade e quantidade;
- Variabilidade das propriedades;
- Características de comportamento;
- Aptidão para uso em pavimentos;
- Requisitos de processamento;
- Controlo de qualidade em escavação e aplicação;
- Impactes ambientais.

Os mesmos autores referem, ainda, que a falta de materiais locais considerados adequados pelos requisitos convencionais pode ser superada através de:

- Adaptação das especificações de projeto para atender aos materiais locais disponíveis;
- Adaptação ou modificação dos materiais de acordo com requisitos estabelecidos tendo em conta a realidade local.

Deverá ser feita uma avaliação da fonte e disponibilidade dos materiais necessários para a construção de todas as camadas do pavimento, incluindo a água, bem como dos custos envolvidos. Devem envidar-se todos os esforços para a obtenção de materiais o mais próximo possível do itinerário da estrada, de modo a reduzir os custos de transporte.

Em determinados contextos, podem ser utilizados materiais locais que não cumprem integralmente os requisitos estabelecidos em especificações internacionais. Um exemplo disso é a utilização de solos lateríticos como camada de revestimento. Estes materiais contêm limites de consistência de *Atterberg* superiores aos habitualmente utilizados, mas quando aplicados nas camadas de pavimentos apresentam reduzida tendência para formação de lama. A laterite é um material predominante em climas tropicais quentes e húmidos, apresenta baixa expansibilidade e uma capacidade de retenção de água relativamente fraca, evitando a formação de poeiras e ondulações² na estação seca (Fortunato et al, 2013).

2.5.4.2 Comportamento mecânico dos materiais

Como se mostrou, uma 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).

Brito (2011), referindo Dawson et al (2007), salienta que em estruturas de pavimentos de EBVT com uma camada de revestimento betuminoso com funções estruturais, esta deve ter uma espessura de cerca de 40 mm, para permitir uma distribuição eficaz de carga e reduzir significativamente a tensão sobre as camadas de base inferiores de agregado.

Segundo Brito (2011), 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

² A formação de ondulações (também designadas por cremalheiras) consiste num defeito funcional que, à semelhança das rodeiras, se identifica 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 cremalheiras.

do pavimento. Não sendo possível garantir este nível de desempenho, será necessário realizar intervenções de manutenção para garantir um determinado estado do pavimento.

Os agregados pétreos são o principal material estrutural constituinte dos pavimentos de uma EBVT. Em contraste com os pavimentos flexíveis usados em estradas de alto volume de tráfego, nas EBVT são os agregados os responsáveis pela degradação de tensões, como mostra esquematicamente a Figura 2.9. 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.

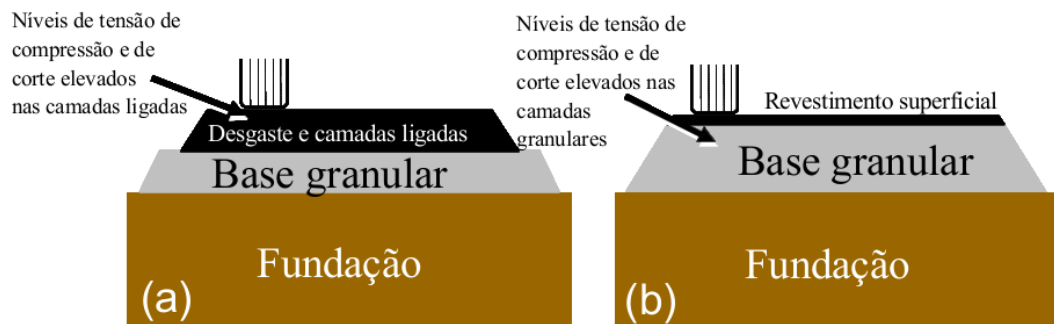


Figura 2.9 - Perfil esquemático do pavimento (a) estrada de alto volume e (b) estrada de baixo volume (adaptado de Brito, 2011)

A resistência à deformação dos materiais granulares não ligados depende da tensão aplicada. A magnitude desta depende, entre outros parâmetros, do valor da carga, da velocidade do veículo, da disposição dos eixos, das características dos pneus e da estrutura de pavimento. O comportamento mostrado na Figura 2.10 é típico para materiais granulares não ligados.

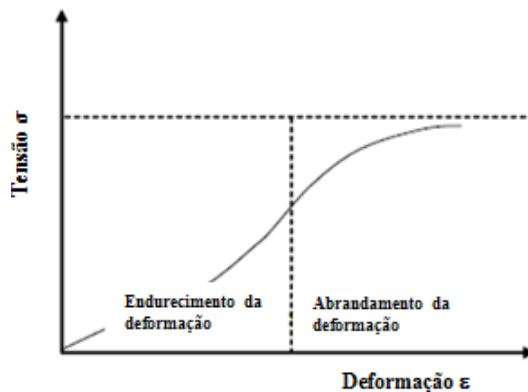


Figura 2.10 - Comportamento tensão-deformação de materiais granulares não ligados (Brito, 2011)

Com baixos níveis de tensão, o módulo de deformabilidade do material aumenta com o aumento das magnitudes da carga (endurecimento da deformação). Os materiais granulares não ligados compactados tornam-se ainda mais compactos, dado que os seus componentes (partículas) imbricados são forçados a novas posições. Para níveis de tensão mais elevados, à

medida que a tensão vertical aumenta, para valores mais próximos da rotura, a curva tensão-extensão fica menos inclinada, ou seja, verifica-se a diminuição do módulo de deformabilidade (Brito, 2011).

2.5.4.3 Problemas específicos com solos

Em virtude das suas propriedades desfavoráveis para a construção de pavimentos, vários solos de fundação enquadram-se na categoria de "solos problemáticos" e, quando encontrados, normalmente requerem um tratamento especial antes da sua utilização. Os tipos de solos problemáticos, identificados com frequência em países africanos, que merecem consideração especial são os seguintes (ERA, 2011):

- Argilas expansivas;
- Solos micáceos;
- Solos de baixa resistência;
- Solos salinos.

Ao avaliar a adequação das medidas disponíveis para lidar com solos problemáticos, tem de ser alcançado um equilíbrio entre o custo das medidas e os benefícios a serem obtidos.

Isso exigiria a realização de uma análise do ciclo de vida para determinar se os custos das medidas seriam, no mínimo, compensados pelos benefícios. Tendo em conta os benefícios relativamente pequenos para os utentes das EBVT quando comparados com os gerados pelas estradas com maior tráfego, é improvável que as medidas mais amplas e caras tenham justificação (MTPW, 2013 a).

• Solos expansivos (ERA, 2011 ; MTPW, 2013 b)

Solos expansivos são aqueles que apresentam grandes mudanças volumétricas (dilatação e contração) com variações dos teores de humidade. A Figura 2.11 ilustra o mecanismo de expansão e retração que ocorre sazonalmente com o movimento do nível freático. Aquele comportamento assume normalmente a forma de fendilhamento longitudinal, ocorrendo inicialmente na berma e desenvolvendo-se posteriormente na faixa de rodagem. Ocorre também irregularidade geral na superfície do pavimento, fendilhamento em arco, assentamento perto de árvores e fendas nos locais de passagens hidráulicas (Figura 2.12).

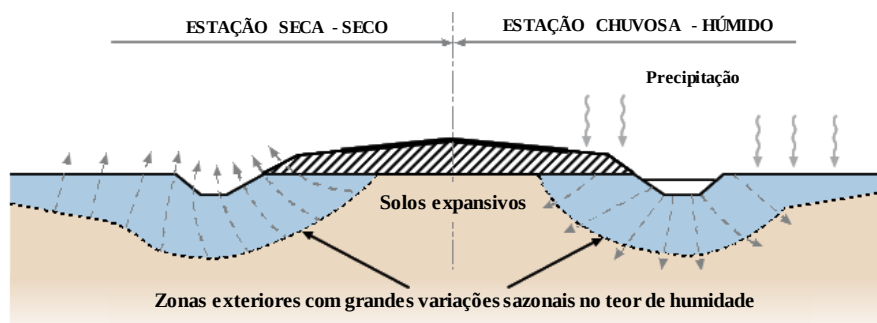


Figura 2.11 - Movimentos da humidade em solos expansivos sob um pavimento de uma estrada (adaptado de MTPW, 2013 b)



Figura 2.12 - a) Solo expansivo b) Fendilhamento longitudinal típico e deformação do pavimento causados por uma fundação de solo expansivo (ERA, 2011)

As medidas escolhidas para minimizar ou eliminar os efeitos de solos expansivos em pavimentos de EBVT dependerá do seu grau de expansividade. Esta propriedade pode ser determinada a partir da relação entre o índice de plasticidade (IP) e o teor de argila do solo, conforme ilustrado na Figura 2.13.

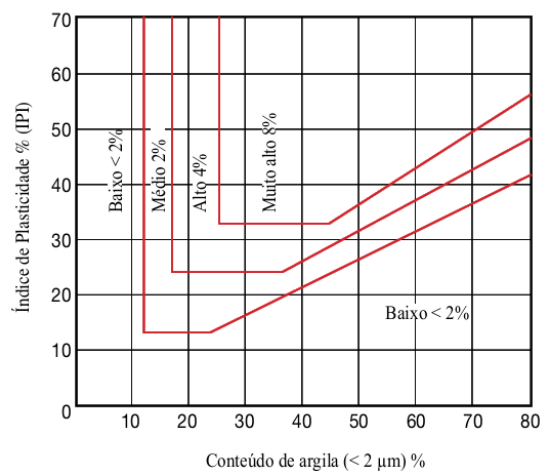


Figura 2.13 - Determinação da expansibilidade do solo (Gráfico Modificado de Van de Merwe) (adaptado de MTPW, 2013 b)

As medidas para trabalhar com solos expansivos têm de ser ponderadas, tendo em consideração os custos de construção e o risco de dano potencial do pavimento. Além disso, deve ainda ter-se em conta o eventual aumento de custos futuros de manutenção e os custos suportados pelos utentes. As medidas típicas para ultrapassar os problemas associados a solos expansivos incluem (MTPW, 2013 b):

- A aceitação do problema, sem medidas adicionais, tendo como estratégia refazer o pavimento a médio prazo (por exemplo, após 10 anos);
- Alterar a diretriz da estrada, sempre que possível, para evitar o atravessamento da zona com solos expansivos;
- Substituição de solos;
- Estabilização química do solo;

- Reduzir as alterações de humidade dos solos, através da impermeabilização das bermas.

- **Solos micáceos (MTPW, 2013 b)**

Solos micáceos contêm grandes quantidades de mica (moscovite) e ocorrem, por exemplo, em materiais como os granitos e gnaisses. Estes solos apresentam habitualmente problemas de compactação por causa do "efeito de mola" dos materiais micáceos que impedem a obtenção da baridade pretendida, podendo causar deformação na camada compactada numa fase posterior.

Os métodos para trabalhar com solos micáceos incluem:

- A remoção da camada de solo micáceo na zona da fundação;
- A estabilização do solo micáceo com cal ou cimento.

Nas EBVT, geralmente tem de aceitar-se a degradação do perfil transversal do pavimento, associada a fundações com solos micáceos, a menos que a estrutura sobrejacente do pavimento justifique os custos inerente à aplicação das medidas corretivas acima indicadas.

- **Solos de baixa resistência (MTPW, 2013 b)**

Os solos saturados com um CBR inferior a 3% (<2 % em climas secos) são geralmente considerados de baixa resistência. Estes solos podem ser extremamente moles no seu estado natural ou tornarem-se extremamente moles quando saturados. Trata-se de solos fáceis de identificar, quer *in situ* durante as prospeções no local, quer através de ensaios laboratoriais de avaliação da sua resistência quando saturados.

As medidas típicas de tratamento para estes solos incluem:

- A remoção e substituição por material adequado;
- A estabilização química, com cal, ou mecânica;
- O uso de produtos geossintéticos no reforço do solo;
- Correção da rasante da estrada, aumentando a espessura de aterro sobre os solos de baixa resistência.

Na fase de projeto devem ser especificados com mais detalhe os métodos de tratamento para solos de baixa resistência, tendo em atenção as propriedades do solo, as condições do local, os equipamentos disponíveis, os materiais disponíveis, e a experiência obtida noutros locais com condições e construção similares.

- **Solos salinos (ERA, 2011)**

Os solos salinos ocorrem principalmente nas regiões áridas ou semiáridas em alguns países, como é o caso da Etiópia, onde o clima seco combinado com a presença de materiais salinos e/ou água subterrânea salina ou de superfície, criam condições propícias para a ocorrência de danos provocados pelo sal. A presença de sais solúveis nos materiais de pavimentação ou

fundação pode causar danos nos revestimentos betuminosos dos pavimentos. Tais danos ocorrem quando os sais dissolvidos migram para a superfície do pavimento, principalmente devido a evaporação da água que os mantém em solução e, em seguida, a superfície torna-se supersaturada, havendo uma cristalização com alteração de volume associada. Isso cria pressões que podem levantar e degradar fisicamente o revestimento betuminoso, e quebrar a aderência com a camada de pavimento subjacente, tal como ilustrado na Figura 2.14. Geralmente, quanto mais fina a camada de revestimento mais provável é a ocorrência de danos deste tipo.



Figura 2.14 - a) Exemplo de dano grave num revestimento de pavimento devido ao ataque de sal após dois anos da construção (Botswana), (ERA, 2011); b) Danos por ataque de sal podem aparecer sob a forma de "bolhas" no revestimento principal (ERA, 2011)

Como os danos provocados por sais solúveis resultam da acumulação e cristalização de sais sob o revestimento do pavimento, a redução de sais nas camadas do pavimento pode ser conseguida com o uso de revestimentos impermeáveis. Tais revestimentos inibem a passagem de vapor de água e, como resultado, a cristalização não ocorre debaixo do revestimento. A construção deverá então ocorrer tão rapidamente quanto possível para reduzir a migração do sal através das camadas. A adição de cal para aumentar o pH do solo para valores superiores a 10 também pode contribuir para suprimir a solubilidade dos sais mais solúveis (ERA, 2011).

2.5.4.4 Práticas de estabilização

Segundo Henning et al (2008), a estabilização de pavimentos é normalmente utilizada em estradas não revestidas para reduzir os custos de manutenção, melhorar as propriedades dos materiais da camada de base e proporcionar uma melhor superfície para quaisquer condições climáticas. Ao retificar as deficiências dos materiais, a estabilização permite que os materiais de alguma forma inadequados possam ser utilizados com vantagem em pavimentos de estradas.

Em pavimentos de solo com a estabilização obtém-se uma melhoria das condições da superfície através da redução da ocorrência de poeira, rodeiras, covas e ondulação. Além dos custos de manutenção reduzidos, os custos operacionais dos veículos também podem ser reduzidos. No entanto, algumas formas de estabilização podem ser inadequadas ou demasiado onerosas em estradas sem revestimento. Os problemas podem surgir, quer pela seleção de um

método de estabilização inadequado para o material e para as condições locais, quer pela utilização de técnicas incorretas.

Segundo Henning et al (2008) o uso correto de estabilização exige que as propriedades do material a ser melhorado sejam claramente identificadas. As propriedades mais importantes são:

- Resistência à abrasão;
- Permeabilidade;
- Resistência;
- Estabilidade de volume;
- Durabilidade.

A maioria dos tratamentos de estabilização tem um efeito sobre todas estas propriedades. Cada propriedade, no entanto, é influenciada em graus diferentes por vários estabilizadores, os quais devem ser selecionados para melhorar os efeitos no material.

A estabilidade de volume é um problema associado às argilas que expandem e contraem com alterações de humidade sazonais. Ao interagir com os minerais de argila, a estabilização (por exemplo, com cal) pode tornar tais materiais menos propensos a variações de volume.

Numa estrada não revestida, o material de superfície deve ter resistência à abrasão causada pelos pneus dos veículos. A estabilização pela adição de finos coesivos que fornecem uma melhor ligação dos grãos dos materiais pode ser utilizada, de modo a reduzir a desagregação, a aumentar a resistência à derrapagem ou reduzir a formação de poeira.

Os métodos mais comuns de estabilização utilizados incluem (Henning et al, 2008):

- Estabilização mecânica;
- Estabilização com cal;
- Estabilização de cimento;
- Estabilização incluindo emulsões betuminosas;
- Estabilização química.

As condições climáticas extremas podem ter uma influência sobre a escolha correta do estabilizador, inibindo o uso de alguns e incentivando o uso de outros, independentemente do seu custo.

Quando os materiais com uma granulometria e/ou plasticidade adequada não estão disponíveis localmente, a estabilização mecânica pode ser possível através da mistura de dois ou mais materiais selecionados nas proporções necessárias, para modificar a distribuição granulométrica do material e/ou a plasticidade. A mistura pode ser efetuada no local, por exemplo, utilizando uma grade de discos e uma motoniveladora, antes da regularização final e compactação.

Uma aplicação comum da estabilização mecânica é a mistura de um material granular com falta de finos com uma mistura de areia com argila. Esta mistura de materiais tem o potencial de melhorar a resistência, a resistência à abrasão, a impermeabilidade, e melhorar a compactação. A técnica é, por vezes, utilizada como uma operação de “rejuvenescimento” após a perda de finos da superfície pela ação de tráfego e/ou das condições climáticas.

A estabilização mecânica, com algumas precauções, pode ser utilizada sob quaisquer condições. Para regiões quentes e húmidas é mais adequada a estabilização com cal enquanto que a estabilização com betume é aconselhada para regiões quentes e secas. A estabilização com cimento, embora tenha uma ampla aplicação, pode encontrar dificuldades em qualquer uma dessas condições extremas.

O estudo mais detalhado das técnicas de estabilização com cal e com cimento pode ser consultado em Cook et al (2013).

2.5.5 Camadas superficiais

2.5.5.1 Nota introdutória

O revestimento é uma parte muito importante de um pavimento de uma EBVT, pois impede a perda de material granular, elimina a poeira, melhora a resistência à derrapagem e reduz a entrada de água no pavimento. A prevenção da entrada de água no pavimento é especialmente importante em EBVT nas quais podem ser usados materiais sensíveis à humidade.

Há um grande número de opções de camadas de revestimento disponíveis para pavimentação de EBVT. As várias opções permitem responder a diferentes necessidades, variando com os níveis esperados de tráfego e de carga, os materiais disponíveis localmente, os métodos de construção disponíveis, os regimes de manutenção e as condições ambientais da zona da EBVT. Por isso, a escolha deve ser criteriosa, de modo a proporcionar um desempenho satisfatório e minimizar os custos de ciclo de vida.

Nesta secção apresenta-se uma visão geral dos revestimentos utilizados em EBVT orientada para os seguintes aspetos:

- Descrição dos vários tipos de revestimentos, betuminosos e não betuminosos, potencialmente adequados para utilização em EBVT, incluindo os seus constituintes;
- Apresentação das características de desempenho e durabilidade típica esperada dos vários tipos de revestimentos;
- Síntese dos fatores que afetam a escolha de revestimentos.

2.5.5.2 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. Nestes casos, é fundamental construir pavimentos com cerca de 3 a 6% de pendente transversal e um sistema de drenagem eficaz (Figura 2.15). 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*.



Figura 2.15 - Exemplo de um pavimento com revestimento em solo (ERA, 2011)

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 (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Exemplo de estrada com revestimento de cascalho (ERA, 2011)

2.5.5.3 Revestimentos betuminosos

Os principais tipos de revestimentos betuminosos delgados normalmente utilizados em EBVT e que apresentam um custo relativamente baixo são os seguintes (MTPW, 2013 b):

- 1) Revestimentos Superficiais Simples ou Duplo (*Single Surface Dressing* ou *Double Surface Dressing*);
- 2) *Cape Seal*;
- 3) *Otta Seal*;
- 4) Misturas betuminosas a frio (*Cold Mix Asphalt*);
- 5) Lama asfáltica (*Slurry seal*);
- 6) *Sand Seal*.

Estes revestimentos betuminosos são mostrados na Figura 2.17 e descritos abaixo. 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.

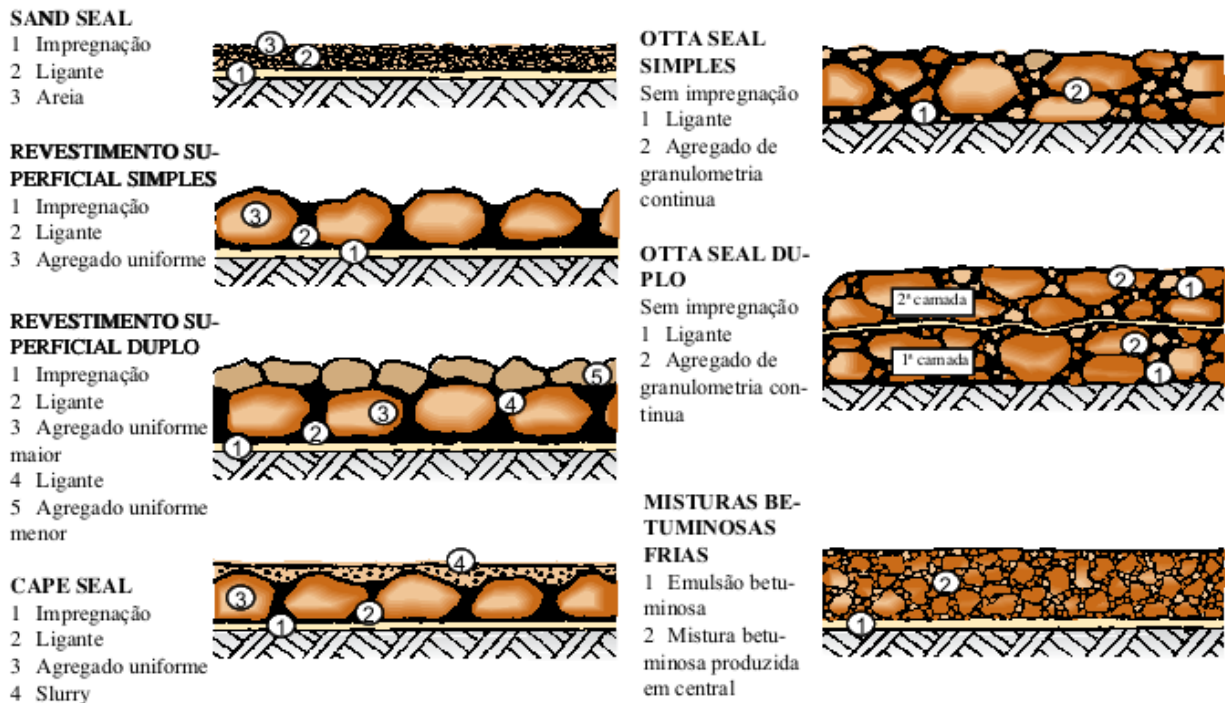


Figura 2.17 - Exemplos de revestimentos betuminosos (MTPW, 2013 b)

• Tipos de Revestimentos Betuminosos

- **Revestimento Superficial** - 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** - É constituído por uma única camada de agregado com 13 milímetros ou 19 milímetros de dimensão nominal, penetrada com aglutinante betuminoso, e coberta com uma lama asfáltica. Se for utilizada uma camada de agregado com 19 milímetros, a mistura é aplicada em duas camadas. A função da lama asfáltica é de proporcionar um enchimento denso para melhorar a estabilidade da camada de agregado grosso de granulometria uniforme. O agregado graúdo 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).

- **Mistura betuminosa a frio** – Trata-se de uma mistura aplicada à temperatura ambiente, constituída por agregado grosseiro, 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 condução apeada para a 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.

A vida de um revestimento depende de uma ampla gama de fatores, como sejam a qualidade do projeto, o clima, a resistência do pavimento, a durabilidade do aglutinante, a qualidade do acabamento, a adequação da manutenção, entre outros. Em geral, os revestimentos betuminosos delgados, normalmente utilizados como medidas temporárias ou permanentes, incluem-se numa estratégia de pavimentação em fases, têm vidas úteis de serviço mais curtas (geralmente menos de 10 anos) do que revestimentos duplos ou combinados (geralmente com durações superiores a 10 anos).

O Quadro 2.6 resume algumas indicações relativas à vida útil de serviço dos diferentes tipos de tratamentos superficiais, de modo a servir de apoio para a escolha do tipo de revestimento no contexto de uma análise de custo no ciclo de vida.

Quadro 2.6 - Vidas úteis de serviço de revestimentos, assumindo que as manutenções de rotina e periódica são realizadas de forma atempada (adaptado de MTPW, 2013 a)

Tipo de Revestimento	Vida útil de serviço típica (anos)
Revestimento delgado / estratégia faseada	
<i>Sand seal</i> simples	2-3
<i>Sand seal</i> duplo	3-6
Lama asfáltica (<i>Slurry seal</i>)	3-5
Revestimento superficial simples	6-8
Estratégia combinada de revestimento	
Revestimento superficial duplo	8-10
Mistura betuminosa a frio	8-10
<i>Otta seal</i> simples	8-10
<i>Otta seal</i> simples + <i>Sand seal</i>	10-12
<i>Cape seal</i> (13 mm + Lama asfáltica simples)	10-12
<i>Cape seal</i> (19 mm + Lama asfáltica dupla)	10-12
<i>Otta seal</i> Duplo	15-18

2.5.5.4 Revestimentos não betuminosos

Os principais tipos de revestimentos não betuminosos potencialmente adequados para utilização em EBVT incluem os seguintes (MTPW, 2013 a):

- Pavimentação com blocos de rocha;
- Tijolos de barro;
- Blocos de betão;
- Betão simples (não armado).

O revestimento em blocos de rocha (calçada) é composto por uma camada de blocos, de forma aproximadamente cúbica, tipicamente de espessura entre 100 e 120 mm. Os blocos são cortados a partir de rocha dura e modelados manualmente numa forma cúbica com um acabamento liso e plano em, pelo menos, uma das faces, usando martelos e cinzéis.

Os blocos são assentes sobre uma camada de areia com uma espessura entre 20 e 70 mm, e colocados na posição final, cobertos com areia solta e compactados com um rolo pesado. Poderá ser usada argamassa de cimento e areia para refechar as juntas, aumentando a durabilidade e evitando que a água penetre nas camadas suscetíveis à humidade, enfraquecendo-as (Figura 2.18).



Figura 2.18 - Exemplo de pavimento em calçada de pedra (ERA, 2011)

Os tijolos cerâmicos são também uma solução para pavimentos de EBVT (Figura 2.19). Estes materiais devem atingir uma certa resistência, forma e requisitos de durabilidade. Os tijolos são geralmente colocados sobre uma camada de areia, ou de uma mistura de cimento e areia, numa configuração com juntas semelhantes entre si. Aplicam-se tipicamente tijolos com 100 milímetros de espessura.



Figura 2.19 - Exemplo de pavimentação com tijolo de barro (ERA, 2011)

O recurso a pavimentação com blocos de betão (Figura 2.20) é uma técnica bem estabelecida para aplicações em vias pedonais, estradas rurais e até em vias com tráfego de veículos muito pesados. O sucesso da técnica baseia-se na capacidade dos blocos individuais para distribuírem eficazmente a carga dos blocos adjacentes através das juntas de areia. Os pavimentos de blocos de betão têm boa capacidade para a degradação de cargas, especialmente em fundações com fracas características de resistência. A sua utilização também é adequada em zonas muito solicitadas, como é o caso de áreas de viragem ou cruzamentos, sendo passíveis de reutilização no caso de ocorrer falha da base da estrada. Os blocos podem ser dispostos numa variedade de padrões, dependendo do nível de travamento desejado. Em geral, o travamento é mais efetivo quando as juntas não são contínuas na direção do movimento dos veículos.



Figura 2.20 - Exemplo de pavimentação de blocos de betão (MTPW, 2013 a)

Também podem ser usados pavimentos com laje de betão simples ou armado, de espessura variável (Figura 2.21). Em geral, a espessura tem um mínimo de 50 mm em revestimentos armados ultrafinos para fornecer uma superfície de alta resistência, durável e com necessidades de manutenção muito baixas. O betão tem de ter uma resistência mínima à compressão de 20 MPa para ser usado. A laje de betão é construída com juntas, as quais

permitem a expansão e contração térmica da laje, evitando a ocorrência de degradações. Embora, normalmente, seja difícil justificar o uso de pavimentação em betão em EBVT, isso pode ser necessário em rampas muito íngremes, especialmente em áreas de alta pluviosidade, onde as camadas betuminosas, ou outros revestimentos não betuminosos, podem não ter um desempenho adequado (MTPW, 2013 a).



Figura 2.21 - Exemplo de pavimento de betão (MTPW, 2013 a)

A vida útil de serviço de um revestimento semelhante aos referidos nesta secção, do tipo não betuminoso, é relativamente maior que a de um revestimento betuminoso. Isto é devido, em grande parte, à durabilidade superior do material de revestimento, principalmente no caso de blocos de pedra natural, os quais são muito resistentes às ações climáticas e ambientais. Desde que seja garantida uma fundação adequada e uma drenagem eficaz, os revestimentos não betuminosos requerem relativamente pouca manutenção e duram muito tempo.

2.5.5.5 Camada superficial em solos estabilizados com cal

A estabilização de solos coesivos com cal é uma das práticas mais antigas de construção, sendo empregada pelo homem há mais de 2000 anos. Com esta técnica são desenvolvidos materiais mais resistentes, menos deformáveis e mais duráveis que, além disso, reduzem as tensões transmitidas à fundação pela ação do tráfego. Consegue-se, assim, melhorar o desempenho estrutural dos pavimentos e, consequentemente, reduzir a relação entre o custo de obra e a sua vida útil.

A caracterização laboratorial de materiais estabilizados para pavimentos de EBVT foi recentemente completada pela *Austroads* (Gonzalez et al, 2010). O trabalho realizado concluiu que é necessário fazer-se uma revisão substancial dos processos de dimensionamento de espessura para materiais tratados. Os efeitos benéficos da estabilização com cal resultam de várias reações entre os argilo-minerais dos solos e a cal. Os solos finos, tais como as argilas e as argilas siltosas, são os que permitem atingir melhores resultados após estabilização. É desejável que os solos a tratar contenham um teor mínimo de argila de aproximadamente 10% e um IP maior que 10%, embora tenham sido observados benefícios para solos siltosos de menor IP e contendo menos argila (Behak, 2013).

2.5.5.6 Camada superficial em solos estabilizados com emulsão betuminosa

Sant'ana (2009), descreve a estabilização betuminosa como um processo de adição de ligante betuminoso aos solos para a melhoria das suas propriedades, com vista à aplicação como material de pavimentação, uma vez que estes solos no estado natural ou compactado não oferecem resistência adequada e estabilidade para os esforços induzidos pelo tráfego. A estabilização de solo com materiais betuminosos justifica-se pela possibilidade de utilização de materiais locais e métodos de mistura *in situ*, tratando-se, assim, de uma solução económica. No caso dos ligantes que podem ser utilizados na estabilização, destacam-se as emulsões e o betume. A utilização de um equipamento para o aquecimento do betume aumenta o custo da estabilização com betume, pelo que a aplicação de emulsão betuminosa é uma alternativa mais viável economicamente. No caso da aplicação em pavimentação para EBVT, deve limitar-se o teor de emulsão a um nível compatível com a exequibilidade da obra, ou seja, solos que necessitem de teores elevados de emulsão para atingirem uma estabilização adequada não devem ser utilizados por questões de custos.

Assim, o solo-emulsão aparece como alternativa de mistura para constituir camada de pavimento nas EBVT, atuando como base ou camada superficial. O solo-emulsão pode viabilizar a utilização de solos locais estabilizados com baixos teores de emulsão, de maneira a que a mistura solo-emulsão atinja resistência e estabilidade suficientes para fazer face à ação do tráfego, tanto no que se refere aos esforços de compressão, como no que diz respeito à ação abrasiva dos pneus. Além disso, proporciona maior impermeabilização da superfície, reduzindo os problemas de infiltração de água da chuva e perda de resistência dos materiais pelo contato com água. O uso de solo-emulsão pode melhorar a traficabilidade da estrada, melhorar o conforto do utente e reduzir a necessidade de reposição de material na conservação de pavimentos das EBVT.

Sant'ana (2009) refere, ainda, que há vários fatores a considerar para que a estabilização com emulsão seja bem-sucedida: a granulometria do solo utilizado, a quantidade de água deste no momento da mistura com emulsão, o teor ótimo de emulsão, o tipo de emulsão, o tempo que decorre entre o processo de mistura e compactação, e o tempo de cura. Os materiais betuminosos quando empregados como agentes estabilizadores produzem efeitos que podem ser agrupados do seguinte modo:

- Promover a resistência de materiais sem coesão, como areias ou solos muito arenosos (areia-betume);
- Estabilizar ou inibir a humidade contida nos finos dos solos argilosos (solo-betume);
- Aumentar a coesão e a impermeabilidade aos materiais cuja resistência depende principalmente do atrito entre os grãos (cascalho-areia emulsão).

O aumento da resistência do solo arenoso pela estabilização betuminosa está relacionado com a coesão entre partículas promovida pelo betume que as envolve, além do atrito já existente. Porém, acima de determinado teor em betume residual, o filme de betume que envolve as partículas de solo fica exageradamente espesso, afastando-as, promovendo a perda de resistência ao corte devido ao menor atrito interno. De acordo com a bibliografia (Sant'ana,

2009), os solos mais adequadas para estabilizar com emulsões betuminosas devem ter um valor de IP < 18% e uma quantidade de passados no peneiro de abertura 0,075 mm até 35%. Devem evitar-se solos com uma quantidade elevada de fração fina porque isso exigiria altos teores de emulsão para a estabilização.

2.5.5.7 Fatores que afetam a escolha da camada superficial

A Administração Nacional de Estradas de Moçambique (ANE, 2014) elenca os vários fatores que afetam a escolha de alguns revestimentos, em relação aos requisitos operacionais, conforme pode ser observado no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Fatores que afetam a escolha de revestimentos (adaptado de ANE, 2014)

Revestimento	Aplicabilidade
Revestimento superficial	– Viável tanto em EBVT como em estradas de alto volume de tráfego; – Barato; – Durabilidade em EBVT (Simples – cerca de 4 a 7 anos, Duplo. 7-12 anos; – Execução rápida.
Otta Seal	– Não é adequado para estradas de volume muito baixo porque este tipo de pavimento necessita da ação do tráfego para curar corretamente; – Mais caro que o revestimento superficial duplo; – Execução difícil – necessita de um período aproximado de 2 semanas para a abertura ao tráfego, quando os volumes de tráfego são baixos; – Ciclo de vida longo – aproximadamente 10-13 anos; – Baixa manutenção; – Utiliza cascalhos naturais disponíveis localmente.
Macadame de penetração	– Menos restritivo na qualidade do agregado; – Ciclo de vida longo: 12-20 anos nas EBVT; – Superfície mais áspera; – Mais caro que o revestimento superficial duplo; – Viável em bases fracas, por exemplo, bases de areia; – Baixa manutenção.
Lama asfáltica (Slurry seal)	– Caro; – Lento quando executado manualmente, mas rápido com equipamento específico; – Slurry mais espesso (15mm) é durável (aproximadamente 7 anos) e resistente; – Slurry mais fino (5mm) é muito menos durável (aproximadamente 4 anos); – Útil em áreas arenosas onde não há material para outras opções de revestimento.
Sand seal	– Sand seal simples não é durável (aproximadamente 3 anos), e Sand seal duplo é mais durável (aproximadamente 5 – 6 anos); – Útil em áreas arenosas onde não há material para outras opções de revestimento. – Barato; – Fácil e de execução rápida.
Pavimentação com pedra	– Adequado para intervenções curtas; – Execução lenta; – Baixo custo quando a pedra está disponível localmente; – Baixa manutenção; – Baixa-tecnologia de construção (mão de obra local); – Alternativa mais barata para construção que as lajes de betão; – Muito úteis em zonas íngremes e pantanosas.
Lajes de betão	– Altamente durável (> 40 anos); – Baixa manutenção; – Construção cara; – Construção lenta e difícil; – Baixa-tecnologia de construção (mão de obra local).

2.5.6 Drenagem do Pavimento

Segundo ERA (2011), mais do que qualquer outro fator, a gestão de humidade num pavimento de uma EBVT durante a construção e o tempo em que está em serviço afeta o resultado final, sendo claro que deverá ser dada grande ênfase a este aspeto no dimensionamento, construção e manutenção do pavimento.

A humidade é um dos fatores que mais afeta o desempenho do pavimento e os custos de manutenção a longo prazo. Assim, um dos grandes desafios enfrentados pelo projetista é o de fornecer uma estrutura de pavimento, na qual os efeitos prejudiciais da humidade estejam contidos dentro de limites aceitáveis. Isso deve acontecer em relação às cargas de tráfego, à natureza dos materiais a serem usados, às disposições de construção e de manutenção, e ao grau de risco aceitável. Este desafio é acentuado pelo facto da maioria das EBVT ser construída a partir de materiais naturais que tendem a ser sensíveis à humidade.

A criação de um sistema de drenagem eficaz é uma questão crítica no projeto de pavimentação e construção de uma EBVT que, embora enfatizado em manuais e diretrizes, é muito frequentemente pouco considerado na prática.

Os elementos de drenagem de uma estrada que estão geralmente mais relacionados com a conceção do pavimento são:

- Permeabilidade das camadas de pavimento;
- Cota do pavimento em relação aos órgãos de drenagem;
- Inclinação transversal;
- Órgãos de drenagem longitudinal.

A cota do pavimento em relação aos órgãos de drenagem, como, por exemplo, as valetas de plataforma, é um parâmetro crítico do qual depende muito a vida dos pavimentos construídos a partir de cascalhos naturais ($d \geq 0,75$ m). Na Figura 2.22 mostra-se a posição relativa do pavimento e da valeta de plataforma.

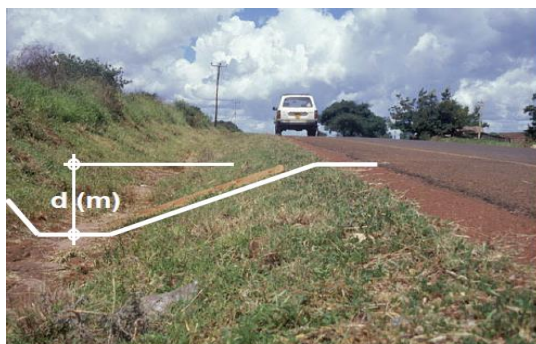


Figura 2.22 - Seção transversal ideal de uma EBVT (Pinard, 2006)

É impossível garantir que os pavimentos vão permanecer impermeáveis ao longo da sua vida. Se qualquer camada de pavimento e a fundação são compostas por materiais que são

seriamente enfraquecidos pela presença de água, é importante assegurar que, nesses casos, a água que aceda ao pavimento seja rapidamente drenada. Para facilitar isso, a inclinação transversal correta deve ser mantida em todas as camadas impermeáveis, e deve garantir-se a existência de um caminho adequado para a água drenar, mantendo, por exemplo, a mesma estrutura de pavimento na berma.

2.6 Considerações Finais

As condições genéricas para a construção e conservação de pavimentos de EBVT no mundo são similares, embora as condições climáticas e geológicas de cada país sejam diferentes. Trata-se de vias localizadas em áreas remotas e que são importantes para a vida das populações locais, e também para a economia da área onde estão situadas.

A crescente procura de materiais de pavimentos capazes de suportarem as maiores exigências de carga de tráfego obriga a melhorar a seleção e a caracterização dos materiais existentes em cada região, racionalizar o seu uso, levando em conta que são recursos finitos.

Os materiais de qualidade adequada para pavimentação são recursos finitos e cada vez mais escassos, e a exploração de novos empréstimos ou pedreiras é cada vez mais limitada por restrições ambientais e de ocupação de áreas urbanas e rurais. Assim, para preservar os recursos naturais e diminuir os custos de construção, a estabilização de solos locais surge como uma alternativa para o revestimento deste tipo de pavimentos.

O desafio para o engenheiro de projeto de uma EBVT é atingir o nível exigido de cumprimento dos requisitos, usando abordagens apropriadas para reduzir os custos ao longo da vida da estrada.

3 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE EBVT

3.1 Introdução

O objetivo do projeto de um pavimento é estabelecer uma estrutura, ou seja, as espessuras e a composição das camadas, de forma adaptada ao meio ambiente local, capaz de distribuir cargas de tráfego de forma compatível com a capacidade de suporte da fundação e de fornecer um nível de serviço satisfatório aos utilizadores. Adicionalmente, pode procurar-se uma redução do custo no ciclo de vida do pavimento, ou seja, considerando os custos de construção e de manutenção subsequentes. Os principais fatores que devem ser considerados no projeto de um pavimento podem ser resumidos da seguinte forma:

- As solicitações do tráfego;
- As características dos solos e demais materiais disponíveis;
- Os custos das diversas soluções alternativas possíveis.

A capacidade de carga do pavimento é função da espessura e rigidez dos materiais utilizados nas suas camadas e do apoio prestado pela 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 internos e externos, também afetam criticamente o desempenho da estrutura do pavimento e devem ser tomados em consideração no processo de dimensionamento.

Segundo o SATCC (2003), existem vários fatores que condicionam o desempenho do pavimento e, por isso, devem ser identificados, de modo a serem levados em linha de conta para projetar e construir um pavimento de uma EBVT numa ampla gama de ambientes, com o objetivo de obter uma confiança razoável. Esses fatores são os seguintes:

- Cargas de tráfego (representadas pelo número equivalente de eixos padrão de projeto);
- Ambiente (representado pelo *Weinert N-value*³);

³ *Weinert N-value* - Para fins de conceção do pavimento, o clima de um país pode ser dividido num certo número de zonas com base no valor *N-Weinert*, um índice climático que está principalmente relacionado com a precipitação anual prevalente. O valor *N-Weinert* é calculado a partir de dados climáticos como se segue: $N = 12E_j/P_a$, em que E_j – é a evaporação durante o mês mais quente e P_a – Precipitação anual (SATCC, 2003)

- Propriedades do material (representadas pelo chamado módulo de plasticidade do material, o qual é calculado multiplicando o IP pela percentagem passada no peneiro de 0,425 milímetros);
- Configuração do pavimento (secção transversal).

Brito (2011) afirma que os requisitos habituais de engenharia rodoviária tradicional podem não ser apropriados e que, além disso, há poucos dados disponíveis sobre o custo e o desempenho dos pavimentos das EBVT.

A maioria dos métodos de dimensionamento de pavimentos considera comportamentos elástico-lineares dos materiais que constituem os pavimentos. Tais métodos dão bons resultados para pavimentos com camadas de base e sub-base betuminosa, ou tratada com cimento. No entanto, para pavimentos com baixo volume de tráfego, constituídos em grande parte por camadas granulares, aqueles métodos de dimensionamento são consideravelmente menos satisfatórios por causa da dependência do comportamento dos materiais relativamente à tensão que lhes é aplicada, por um lado, e por causa da variabilidade do comportamento associada à origem dos materiais e às variações climáticas, por outro.

Além disso, o projeto de pavimentos de estradas com alto volume de tráfego considera requisitos que não são apropriados para EBVT e que, quando utilizados, resultam em soluções desnecessariamente caras, tornando impraticáveis alguns projetos que, de outra forma, poderiam ser realizados.

3.2 Tráfego

A recolha de informações credíveis sobre o volume e a composição do tráfego são essenciais para diferentes aspetos do projeto de estradas, nomeadamente:

- Projeto geométrico - o volume e a composição do tráfego, tanto motorizado como não-motorizado, influenciará, entre outros aspetos, as dimensões do perfil transversal (faixa de rodagem e bermas);
- Projeto de pavimento - a deterioração dos pavimentos causada pelo tráfego resulta da magnitude e da frequência das cargas por eixo, pelo que o dimensionamento do pavimento requer informações sobre o número total de veículos que previsivelmente utilizarão a estrada e as cargas por eixo;
- Segurança rodoviária - o volume, tipo e características do tráfego que utilizarão a estrada, irão influenciar o tipo de medidas de segurança rodoviária necessárias para garantir um ambiente rodoviário seguro, nomeadamente no que diz respeito à forma de acomodar os utentes mais vulneráveis da estrada, incluindo o tráfego não motorizado e pedonal.

Os danos nos pavimentos causados pelo tráfego resultam da magnitude das cargas individuais e do número de vezes que essas cargas são aplicadas. Isto é, será necessário considerar não

apenas o número total de veículos que utilizarão a estrada mas também as cargas sobre os eixos desses veículos. Os volumes de tráfego devem ser convertidos num número equivalente de cargas de um eixo padrão. Por isso, os estudos de tráfego devem distinguir os diferentes tipos de veículos.

O processo pelo qual a ação do tráfego de projeto é estimada é ilustrada na Figura 3.1.

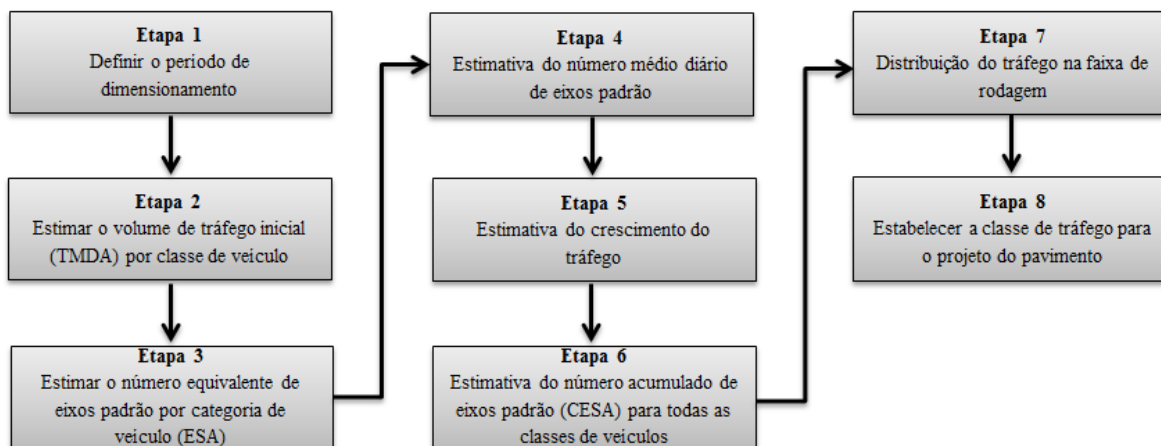


Figura 3.1 - Procedimento para determinar a ação do tráfego de projeto (adaptado de MTPW, 2013 a)

3.2.1 Período de dimensionamento (Etapa 1)

O número acumulado de cargas aplicadas pelo tráfego é calculado para o período de vida útil selecionado para o pavimento, servindo de base para o seu dimensionamento. 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 estado de conservação considerado terminal, após o qual será necessário realizar operações de reabilitação ou de reconstrução significativas. A Figura 3.2 ilustra a definição do período de dimensionamento e da variação no tempo do estado de conservação (ou capacidade de serviço), até atingir um nível de serviço terminal, traduzido, por exemplo, pela qualidade proporcionada à circulação de veículos (irregularidade superficial), ou por um índice global de qualidade que incorpora o efeito de várias patologias.

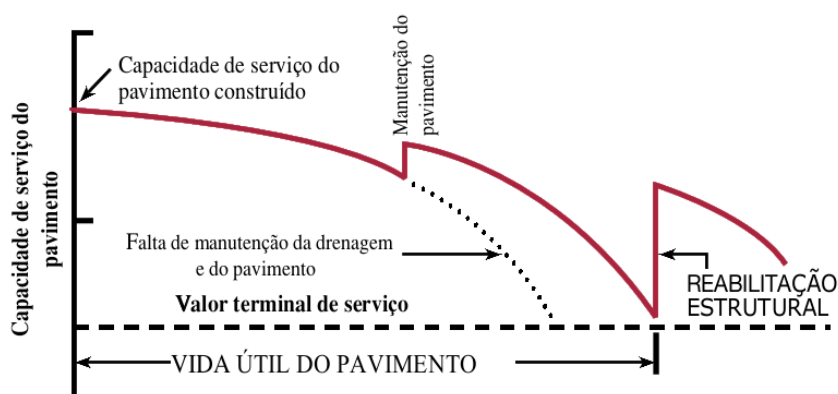


Figura 3.2 - Vida útil estrutural do pavimento (adaptado de MTPW, 2013 b)

A vida útil de um pavimento depende de alguns fatores, incluindo, em particular, a sua função. Assim, para o caso de um eixo principal rodoviário que cumpre uma função económica óbvia e transporta grandes volumes de tráfego, onde qualquer perturbação importante se torna dispendiosa, normalmente, será projetado para uma vida útil mais longa do que uma estrada terciária/acesso que cumpre uma função principalmente de desenvolvimento primário ou social e que transporta volumes relativamente baixos de tráfego.

Segundo o MTPW (2013 b), os vários fatores que influenciam a escolha do período de dimensionamento incluem:

- A importância estratégica da estrada (ou seja, a sua classificação);
- Estratégias de manutenção (estradas com altos volumes de tráfego exigem longos períodos de baixa atividade de manutenção);
- Considerações de financiamento;
- O tempo previsto para a reabilitação estrutural da estrada;
- A probabilidade de que outros fatores para além do tráfego (por exemplo, uma fundação altamente reativa) causem problemas que impliquem uma grande reabilitação antes da ocorrência de danos relacionados com as cargas do tráfego.

O Quadro 3.1 fornece algumas orientações sobre a seleção de vida útil de um projeto.

Quadro 3.1 - Guia para seleção da vida útil de um projeto (adaptado de SATCC, 2003)

Fiabilidade dos dados de Projeto	Importância / Nível de Serviço	
	Baixo	Alto
Baixa	10 anos	10 – 15 anos
Alta	10 – 15 anos	15 – 20 anos

3.2.2 Estimar o volume de tráfego inicial por classe de veículo (Etapa 2)

A estimativa do tráfego inicial é determinada com base em contagens na estrada para a qual se pretende dimensionar o pavimento ou, caso ainda não exista, a partir 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.

Os danos que os veículos provocam nos pavimentos das estradas (mesmo quando o pavimento é praticamente formado por solo), são muito dependentes da magnitude das cargas por eixo dos veículos e do número de vezes que elas são aplicadas. Os dados de carga por eixo para fins de projeto devem, preferencialmente, ser obtidos a partir de levantamentos do número dos veículos que utilizam a estrada existente ou, no caso de novos itinerários, das estradas existentes que são utilizadas por tráfego similar. Se tal não é possível, poder-se-á recorrer a informação histórica.

O MTPW (2013 b) indica que os dois tipos mais usados de levantamentos de tráfego nas EBVT são:

- Levantamento automático de tráfego (contadores de tráfego e sensores de pesagem em movimento);
- Levantamento manual de tráfego.

O objetivo de realizar qualquer dos tipos mencionados de contagens de tráfego é obter uma estimativa do TMDA, decomposto por tipos de veículos. A previsão do TMDA é geralmente imprecisa, especialmente quando as estradas têm uma função hierarquicamente menos importante. Assim, deverá ser definido de forma cuidadosa o tempo, a frequência e a duração dos levantamentos de tráfego, de modo a encontrar um equilíbrio entre o custo e a precisão dos dados obtidos.

Os erros na estimativa do tráfego nas EBVT podem ser reduzidos, seguindo-se as seguintes regras (MTPW, 2013 b):

- Contagem em sete dias consecutivos;
- Realizar contagens para um total de 24 horas, de preferência numa contagem de 24 horas num dia da semana e durante um fim de semana; nos outros dias realizar contagens de 16 horas (normalmente 06:00 – 22:00 horas) e fazer a extrapolação da contagem para 24 horas;
- Evitar contagens nos momentos de aumento anormal de viagens rodoviárias, por exemplo, logo após o pagamento de salários, ou na época de colheitas, feriados ou em qualquer outra ocasião em que o tráfego é anormalmente alto ou baixo;
- Se possível, repetir a contagem de sete dias várias vezes ao longo do ano.

O 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 na conceção do pavimento como mostrado na Figura 3.3 (SATCC, 2003).

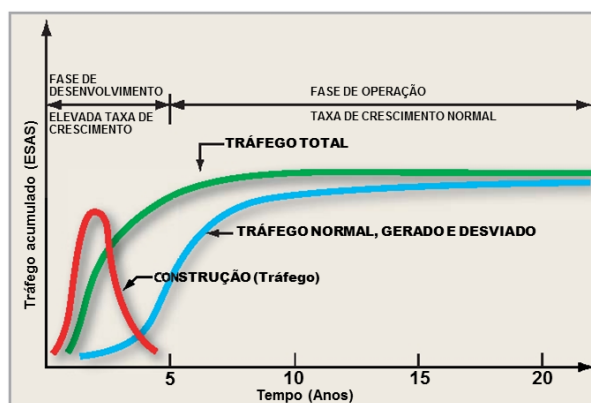


Figura 3.3 - Padrão típico de crescimento de tráfego numa EBVT (adaptado de SATCC, 2003)

Os dados de tráfego, tal como outros, podem ser muito imprecisos e as previsões sobre o crescimento do tráfego também são propensas a grandes erros. Os valores precisos de tráfego

acumulado são, portanto, muito difíceis de apurar. Para reduzir esses erros, não há alternativa à realização de contagens de tráfego específicas para cada projeto.

O MTPW (2013 b) propõe que todo o tráfego, motorizado e não motorizado, seja agrupado numa de treze categorias, conforme se mostra, a título de exemplo, no Quadro 3.2. A zona sombreada corresponde às categorias de veículos considerados no dimensionamento de pavimentos, devendo atribuir-se, sempre que possível, cargas por eixo a cada uma das categorias para o projeto do pavimento.

Quadro 3.2 - Classificação dos veículos para contagens de tráfego (MTPW, 2013 b)

Classificação de veículos												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Carro	Pick-up	4x4	Autocarro pequeno	Autocarro grande	Autocarro médio	Carrinha	Camião médio	Camião pesado	Trator	Mota	Bicicleta	Carro de tração animal
Análise da capacidade				Análise de carga por eixo					Análise da capacidade			

3.2.3 Estimar o número equivalente de eixos padrão por categoria de veículo (ESA) (Etapa 3)

São necessários dados da carga dos veículos que, se espera, irão utilizar a estrada, para determinar o coeficiente médio de equivalência – *EF* (*Equivalence Factor*) para cada categoria de veículos. Trata-se de um parâmetro que permite transformar os veículos de cada uma das classes em eixos padrão.

O poder que um eixo, com determinada carga, tem para induzir dano estrutural no pavimento é geralmente expresso em termos de um número equivalente de eixos padrão. Esta simplificação reduz de forma conveniente a natureza variada das cargas do tráfego, transformando a diversidade de eixos existente num único parâmetro – o eixo padrão (ESA) – para efeitos da quantificação de danos estruturais no pavimento.

Para determinar o dano estrutural no pavimento, ou seja, a percentagem da capacidade resistente que é consumida pelo tráfego, é necessário determinar o número acumulado de eixos padrão que o pavimento suporta durante a sua vida útil. Isso é efetuado com base no número total de veículos pesados que previsivelmente utilizará a estrada ao longo deste período (ERA, 2011).

A relação entre o coeficiente de equivalência de um eixo, *EF*, e a carga por eixo é dada por:

$$EF = (P/8160)^n \quad (\text{cargas em kgf}) \quad (3.1)$$

$$EF = (P/80)^n \quad (\text{cargas em kN}) \quad (3.2)$$

em que:

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

P - Carga por eixo (em kgf ou kN);

n - Expoente de dano relativo.

O valor n é influenciado por vários fatores, sendo os mais significativos o tipo de materiais utilizados na estrutura do pavimento (por exemplo, granular / granular, granular / estabilizado com cimento, betuminoso / estabilizado com cimento) e a espessura do pavimento.

Para fins de projeto, é geralmente aceite que o expoente, n , se encontra entre 4 e 4,5, o que corresponde ao que em geral se utiliza em pavimentos flexíveis. O SATCC (2003) refere que n se toma normalmente com o valor de 4,2. Segundo o *Design Manual for Low Volume Roads*, (ERA, 2011), nas EBVT que normalmente são constituídas por materiais granulares, tanto na base e sub-base, o expoente recomendado n é de 4 (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Coeficientes de equivalência entre diferentes valores de carga por eixo (adaptado de ERA, 2011)

Cargas por eixo medidas em kgf		Cargas por eixo medidas em kN	
Intervalo de carga por eixo (kgf)	EF	Intervalo carga por eixo (kN)	EF
< 1500	-	< 15	-
1500 - 2499	-	15 - 24	-
2500 - 3499	0,02	25 - 34	0,02
3500 - 4499	0,06	35 - 44	0,06
4500 - 5499	0,15	45 - 54	0,15
5500 - 6499	0,30	55 - 64	0,32
6500 - 7499	0,56	65 - 74	0,58
7500 - 8499	0,95	75 - 84	0,99
8500 - 9499	1,5	85 - 94	1,6
9500 - 10499	2,3	95 - 104	2,4
10500 - 11499	3,3	105 - 114	3,6
11500 - 12499	4,7	115 - 124	5,0
12500 - 13499	6,5	125 - 134	6,9
13500 - 14499	8,7	135 - 144	9,3
14500 - 15499	11,5	145 - 154	12
15500 - 16499	15	155 - 164	16
16500 - 17499	19	165 - 174	20
17500 - 18499	24	175 - 184	25
18500 - 19499	30	185 - 194	32
19500 - 20499	36	295 - 204	39

3.2.4 Estimativa do número médio diário de eixos padrão (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:

$$DESA = TMDA \times EF \quad (3.3)$$

3.2.5 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 (Figura 3.4):

- **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.

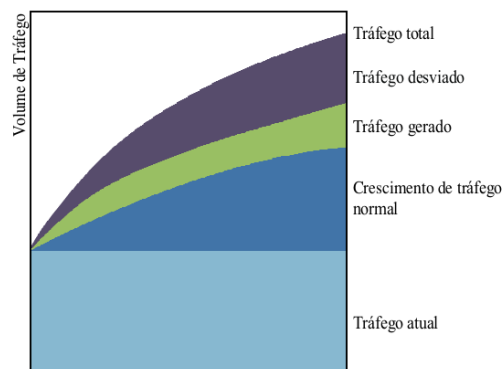


Figura 3.4 - Desenvolvimento do tráfego de uma estrada cujo pavimento é melhorado (adaptado de MTPW, 2013 b)

3.2.6 Estimativa do número acumulado de eixos padrão (CESA) para todas as classes de veículos no período de dimensionamento (Etapa 6)

O número acumulado esperado de eixos padrão na via mais solicitada – CESA (*cumulative equivalent standard axles*) durante a vida útil do pavimento pode ser obtido a partir da Equação (3.4):

$$CESA = 365 \times DESA \times [(1 + r)^N - 1]/r \quad (3.4)$$

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.

O número acumulado de eixos padrão (CESA) para todas as classes de veículos é o valor a utilizar para efeitos de dimensionamento do pavimento.

3.2.7 Distribuição do tráfego na faixa de rodagem (Etapa 7)

Segundo o *Design Manual for Low Volume Roads* (ERA, 2011), em estradas estreitas o tráfego tende a ser mais canalizado do que em estradas mais largas. A ação do tráfego de projeto (ESA) tem de ser considerada na via de projeto, ou seja, deve fazer-se a distribuição de veículos pesados pelas vias que constituem a faixa de rodagem, de acordo com o Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Fatores de cargas de tráfego de projeto (adaptado de ERA, 2011)

Perfil Transversal	Largura Pavimentada	Carga corrigida de tráfego de projeto (ESA)	Notas explicativas
Faixa de rodagem única	< 3,5 m	Total do ESA em ambos os sentidos	Tráfego muito canalizado neste tipo de perfil transversal
	3,5 m < largura < 4,5 m	Total do ESA em ambos os sentidos	O tráfego em ambos os sentidos usa a mesma zona da faixa de rodagem
	4,5 m < largura < 6,0 m	80% do total do ESA em ambos os sentidos	Sobreposição do tráfego nos dois sentidos na zona central do pavimento
	> 6,0 m	Total do ESA no sentido mais solicitado	Sobreposição pequena do tráfego na zona central do pavimento
Mais do que uma via em cada sentido		90% do total do ESA no sentido estudado	A maioria dos veículos usa uma via diferente em cada sentido

3.2.8 Estabelecer a classe de tráfego para o projeto de pavimento (Etapa 8)

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. A título de exemplo, apresenta-se no Quadro 3.5, as classes de tráfego de projeto do Método de catálogo baseado no DCP (MTPW, 2013 a).

Quadro 3.5 - Classes de tráfego para o projeto de pavimentação (adaptado de MTPW, 2013 a)

Classe de tráfego	Número acumulado de ESA (CESA – na via de projeto, milhões)
LE 0,01	0,003 – 0,01
LE 0,03	0,01 – 0,03
LE 0,10	0,03 – 0,10
LE 0,30	0,10 – 0,30
LE 0,70	0,30 – 0,70
LE 1,0	0,70 – 1,0

O *Design Manual for Low Volume Roads* (ERA, 2011) afirma que nos casos em que a estimativa do número acumulado de eixos padrão está longe dos limites de uma determinada classe de tráfego, a consideração de uma classe de tráfego não é suscetível de afetar a escolha

da estrutura de pavimento. No entanto, se as estimativas de tráfego acumulado estão próximos dos limites de uma determinada classe, deverão ser reavaliados os dados de tráfego e as previsões e realizadas análises de sensibilidade para garantir que a escolha da classe de tráfego é apropriada. Se houver qualquer dúvida sobre a precisão das estimativas de tráfego, é prudente selecionar a classe de tráfego superior, imediatamente mais próxima. No Quadro 3.6 apresentam-se as classes de tráfego consideradas pelo manual referido.

Quadro 3.6 - Classes de tráfego (adaptado de ERA, 2011)

Classes de Tráfego					
Intervalo de tráfego (ESA, em milhões)	LV1	LV2	LV3	LV4	LV5/T2 ⁽¹⁾
	< 0,01	0,01 – 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 1,0

Nota

⁽¹⁾ LV5 / T2 é a zona de transição entre o tráfego para EBVT e para estradas de alto volume

3.3 Fatores ambientais

Os fatores ambientais, em particular a humidade e a temperatura, têm um efeito profundo sobre o desempenho do pavimento. Nas EBVT os fatores ambientais têm um papel preponderante no desempenho dos pavimentos, podendo suplantam o papel do tráfego no desempenho do pavimento.

Para a grande proporção de EBVT com menos de 0,3 milhões de ESA ao longo da sua vida útil, deverá ser dada atenção particular na mitigação dos efeitos do ambiente no seu desempenho, particularmente a precipitação e a temperatura, como se discutiu no ponto 2.3.

3.4 Fundação

As fundações têm características muito variáveis e refletem diferentes condições da geologia, topografia, tipo de solo, drenagem e clima de cada região. Tratando-se do elemento que serve de apoio ao pavimento da estrada, a avaliação da fundação em termos da capacidade de apoio conferida à estrutura de pavimento é um dos fatores mais importantes. Além disso, a determinação da espessura do pavimento e da sua constituição dependem da fundação e da carga exercida pelo tráfego sobre o pavimento.

A capacidade de suporte da fundação, caracterizada pela sua resistência, é dependente do tipo de solo, humidade e baridade, quer em condições de construção, quer durante o período de serviço. Assim, a seleção de um valor de resistência da fundação requer uma análise cuidadosa dos dados disponíveis.

A caracterização da fundação no projeto pode ser feita através do CBR (*California Bearing Ratio*). Na prática, isso significa determinar o CBR para as condições de humidade mais prováveis de ocorrer durante a vida de projeto e para a baridade do solo a ser previsivelmente alcançada no campo.

Como exemplo, apresentam-se as classes de fundação apresentadas pelo *Design Manual for Low Volume Roads*. Este manual fornece um catálogo estrutural que requer que a resistência da fundação para utilização em projeto seja atribuída a uma de cinco classes de resistência indicadas no Quadro 3.7 (ERA, 2011).

Quadro 3.7 - Classes de Fundação (adaptado de ERA, 2011)

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

Complementarmente ao que se indicou no Quadro 3.7, devem seguir-se as seguintes indicações do manual acima referido:

- Não é considerada uma classe de fundação para valores de CBR inferiores a 3% porque, tanto do ponto de vista técnico como económico, seria inadequado 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.

É muito importante que a resistência nominal da fundação esteja disponível até uma profundidade razoável, de modo a que a estrutura do pavimento tenha um desempenho satisfatório. Por isso, é habitual estabelecer a profundidade abaixo do nível acabado do pavimento onde as características do solo têm um efeito significativo sobre o comportamento do pavimento (entre 700 e 800 mm, consoante a categoria da estrada). Abaixo dessa profundidade, considera-se que a resistência e a baridade dos solos têm um efeito negligenciável sobre o pavimento. A Figura 3.5 mostra de forma esquemática como se mede a profundidade de solo para efeitos de análise da sua capacidade de suporte em relação aos principais componentes estruturais do pavimento da estrada.

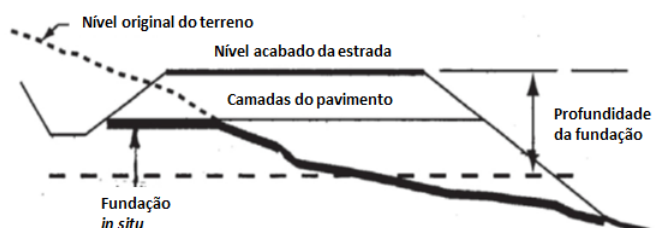


Figura 3.5 - Profundidade necessária para avaliação da resistência da fundação (adaptado de ERA, 2011)

3.5 Materiais de pavimentação

O Quadro 3.8 resume as características dos diferentes tipos de materiais que condicionam a forma como podem ser incorporados na configuração de pavimento, tendo em conta as condições prevaletentes de tráfego, clima, economia e avaliação de riscos (SATCC, 2003).

Quadro 3.8 - Categorias de materiais de pavimento (adaptado de SATCC, 2003)

Parâmetro	Tipo de Pavimento			
	Não ligado			Ligado
	Não transformado	Transformado	Altamente transformado	Muito altamente transformado
Tipo de Materiais	Cascalho como escavado	Cascalho selecionado	Rocha britada	Gravilha estabilizada
Variabilidade	Alta	Intermédia		Baixa
Módulo de plasticidade	Alta	Intermédia		Baixa
Desenvolvimento de resistência ao corte	Coesão e sucção	Coesão, sucção e imbricamento de partículas	Imbricamento de partículas	Imbricamento de partículas e ligações químicas
Suscetibilidade à humidade	Alta	Intermédia		Baixa
Filosofia de projeto	Resistência do material mantida apenas em estado seco	Os critérios de seleção reduzem materiais com sensibilidade à humidade, moles e mal graduados		Resistência do material mantida mesmo no estado mais húmido
Uso adequado	Baixa carga de tráfego em ambiente muito seco	Carregamento de tráfego intermédio e condições do ambiente relativamente húmidas		Carregamento de tráfego alto e ambiente húmido
Custo	Baixo	Intermédio	Alto	Alto
Fiabilidade de manutenção	Alta	Intermédia		Baixa

3.6 Métodos de dimensionamento

3.6.1 Nota introdutória

Os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis podem ser classificados em duas categorias. Na primeira categoria estão os métodos empíricos, baseados em informações obtidas a partir da observação do comportamento de pavimentos. Os métodos empíricos usam especificações empíricas, isto é, as propriedades e características dos materiais são avaliadas mediante ensaios simples que relacionam as propriedades de suporte com propriedades físicas dos materiais ou comparando-os com o comportamento de outros materiais similares. São métodos de dimensionamento simples que só podem ser aplicados dentro dos limites da experiência na qual se baseiam. Extrapolações destas experiências, por exemplo, maiores cargas por eixo, configuração de pneus, materiais não convencionais ou marginais, ou diferentes condições ambientais, podem conduzir a grandes erros. Além disso, podem conduzir a estruturas sobredimensionadas nos casos em que consideram um grande fator de segurança para os parâmetros de dimensionamento.

Na segunda categoria estão os métodos mecanicistas, baseados nas propriedades mecânicas dos materiais propriamente ditas, as quais são obtidas para condições de solitação mais representativas da ação do tráfego e do meio ambiente. A vida útil pode ser estimada considerando-se valores críticos de tensão e deformação em pontos específicos da estrutura do pavimento.

Os tipos de métodos referidos complementam-se entre si. Os métodos empíricos necessitam da compreensão teórica para ajudar a estendê-los a diferentes condições. No entanto, os métodos mecanicistas requerem informação empírica para a sua calibração. Nenhum método é ideal por si só, sendo necessária uma combinação dos dois tipos de métodos para proporcionar uma base competente de dimensionamento, denominando-se, assim, os métodos mais generalizáveis por métodos empírico-mecanicistas (EM).

Enquanto que a abordagem puramente empírica é consideravelmente mais simples e não é capaz de antecipar o comportamento de um pavimento em relação a um cenário para o qual não há experiência, a abordagem empírico-mecanicista permite aos projetistas a extrapolação de resultados para novos cenários. No entanto, o resultado da extrapolação realizada é normalmente baseado num grande número de hipóteses que podem ou não verificar-se (Brito et al, 2009).

A abordagem empírico-mecanicista, por sua vez, visa o estabelecimento de leis constitutivas dos materiais (capacidade de descrever o comportamento do material através de modelos teóricos da mecânica dos materiais) e utiliza calibrações para uma melhor aproximação de modelos teóricos à prática. No entanto, para situações menos generalizadas, este tipo de abordagem está ainda pouco desenvolvida, atendendo à sua complexidade e à necessidade de grandes investimentos financeiros para a calibração destes modelos (Brito et al, 2009).

Face à pouca fiabilidade dos métodos de projeto empírico nalgumas circunstâncias de utilização, por um lado, e às dificuldades impostas pela complexidade dos projetos mecanicistas, por outro lado, os projetos de pavimento acabam por utilizar uma abordagem empírico-mecanicista. Os projetistas usam princípios mecanicistas para o dimensionamento de estruturas do pavimento, baseando-se, ao mesmo tempo, em considerações empíricas (Brito et al, 2009).

O propósito das metodologias de dimensionamento é o de projetar uma estrutura de pavimento que resista ao tráfego de projeto. Entende-se por resistir, a capacidade do pavimento para suportar as cargas provenientes do tráfego mantendo a sua capacidade estrutural e de serviço dentro de um certo intervalo de variação. Podem incluir-se nos parâmetros cuja magnitude é necessário controlar a profundidade de rodagem, a irregularidade longitudinal, a deflexão da camada, a superfície de área fendilhada, entre outros.

Brito et al (2009) ilustra através da Figura 3.6 a evolução da utilização dos métodos de dimensionamento de pavimentos no mundo.



Figura 3.6 - Famílias de métodos de dimensionamento de pavimentos utilizados (adaptado de Brito et al, 2009)

Apesar de todo o caminho percorrido, não é surpreendente que se utilize ainda na prática atual os métodos empíricos, uma vez que muitos países dispõem de pouca tecnologia de pavimentação e, aqueles que a têm, ainda procuram validar os modelos mecanicistas e a forma de os inserir com sucesso na prática rodoviária (Brito et al, 2009).

3.6.2 Abordagens empíricas

Os principais métodos de dimensionamento de base empírica que podem ser usados para o dimensionamento de pavimentos rodoviários de EBVT são (MTPW, 2013 a):

- Os métodos de dimensionamento baseados no CBR;
- O método do DCP – *Dynamic Cone Penetrometer*.

3.6.2.1 Método baseado no CBR

O parâmetro de referência mais comum em procedimentos de dimensionamento de pavimentos para avaliar a capacidade de suporte da fundação é o CBR. Este ensaio foi desenvolvido pelo *California State Highways Department*. Uma das desvantagens do método baseado no CBR é que este toma em consideração os resultados do ensaio laboratorial de CBR para avaliar a resistência dos materiais de pavimentação *in situ*, o que pode ser pouco representativo nas condições existentes no local (Brito, 2011).

O ensaio de CBR tem sido utilizado para determinar a espessura das camadas do pavimento. No entanto, este procedimento prevê apenas uma análise qualitativa acerca da capacidade de suporte do material. Uma vez que as condições de confinamento e de carregamento num ensaio de CBR não são iguais às existentes num pavimento real, os resultados devem ser utilizados com cautela. Mesmo assim, o CBR continua a ser um método geralmente aceite para determinar a resistência da fundação. Neste método, esta informação juntamente com a relativa aos fluxos e crescimento futuro do tráfego são a base utilizada para dimensionar pavimentos rodoviários (Brito et al, 2009).

Quanto mais resistente a fundação (quanto maior o valor do CBR), menor a espessura necessária para a estrutura a construir no pavimento da estrada, o que conduz a uma redução considerável de custos. O método não prevê soluções de estruturas para valores de CBR muito baixos, ou seja, inferiores a 3%, os quais são indicativos de uma fundação fraca.

O método do CBR faz uma avaliação da capacidade de carga dos materiais do tipo *bottom-up* (de baixo para cima). Para uma dada capacidade resistente de um material de uma camada, representada pelo seu CBR, determina-se a espessura de pavimento necessária acima dessa camada, considerando uma determinada carga por roda atuando sobre o pavimento (Figura 3.7). Quando se pretende utilizar várias camadas constituídas por materiais diferentes, aplica-se a regra referida em cada uma das camadas.

Por exemplo, caso o solo de fundação tivesse um CBR de 5% e se pretendesse dimensionar o pavimento para cargas por roda de 7.000 lbs (~ 30 kN), deveria dimensionar-se um pavimento com 14 polegadas (~ 35 cm) de espessura acima da camada de fundação. Se sobre esta se colocasse uma camada granular com um CBR de 15%, seria necessária uma espessura de cerca de 8 polegadas (~ 20 cm) de espessura acima desta. Assim, o pavimento teria 20 cm de camada granular de camada superficial e 15 cm de camada granular intermédia (35-20 cm) sobre a fundação.

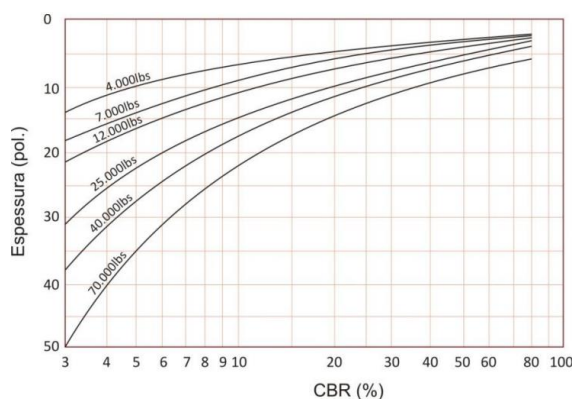


Figura 3.7 - Curvas para o dimensionamento de pavimentos aeroportuários em função do CBR (Yoder e Witczak, 1975, referidos por Brito et al, 2009)

O método do TRRL (*Transport and Road Research Laboratory*) para o dimensionamento de pavimentos flexíveis (Powell et al, 1984, referido por Brito, 2011) baseia-se no desempenho de trechos experimentais interpretadas à luz da mecânica estrutural. O método consiste, numa fase inicial, em determinar a necessidade de uma camada de revestimento sobre a fundação, usada para melhorar a capacidade de suporte da fundação para o tráfego de obra. A espessura que se determina é função do CBR dos materiais da fundação. Para um CBR superior a 5 % é dispensada a camada de revestimento. Quando o valor de CBR varia entre 2 % e 5 %, a camada de revestimento deverá ter 350 mm de espessura. Para um CBR inferior a 2% é prescrita uma camada de revestimento com 600 mm de espessura. As espessuras de sub-base, base e revestimento são determinadas com o uso de gráficos de projeto baseados em pesquisa experimental anterior. Para uma análise mais detalhada deste método deverá ser consultado o relatório 1132 do TRRL designado por *The structural design of bituminous roads* (Powell et al, 1984).

Segundo o *Design Manual for Low Volume Sealed Roads* (MTPW, 2013 a) a aplicabilidade do ensaio de CBR para a seleção de materiais e dimensionamento de pavimentos, especialmente para EBVT, tem sido questionada por uma série de razões, incluindo:

- 1) Muito baixa repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados de CBR, com um coeficiente de variação total da ordem de 20%;
- 2) O ensaio de CBR é um indicador da resistência de solos, o qual não está diretamente relacionado com o desempenho, o que pode explicar a ocorrência frequente de comportamentos deficientes dos pavimentos rodoviários dimensionados e construídos com materiais de baixo CBR.

Em complemento ao referido, deve referir-se que muito poucos métodos baseados no CBR determinado em laboratório foram desenvolvidos especificamente para o dimensionamento de pavimentos de EBVT. Por isso, foram desenvolvidos métodos alternativos, tal como o método de dimensionamento do DCP, o qual se tem mostrado especialmente adequado no caso de EBVT.

3.6.2.2 Método baseado no DCP

Nesta secção é apresentada uma descrição que segue de perto o que é referido por MTPW (2013 a), MTPW (2013 b), SATCC (2003), ERA (2011), Cook et al (2013) e Brito (2011). sobre a aplicação do método DCP em dimensionamento de pavimentos de EBVT.

O *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) consiste num método de ensaio rápido, de baixo custo, não-destrutivo, para estimar a resistência *in situ* de fundações, tendo sido desenvolvido para situações em que ele pode, só por si, apoiar o dimensionamento de pavimentos para EBVT.

A vantagem do DCP é que a informação pode ser recolhida sem perturbar o material *in situ*. Além disso, as características de resistência dos solos da fundação (até 800 mm de profundidade) podem ser obtidas diretamente nas condições de humidade e baridade *in situ*. O equipamento é leve e portátil, e também é útil para investigar as características de todas as camadas do pavimento de estradas existentes para projetos de reabilitação (MTPW, 2013 b).

O uso do DCP ajuda a obter seções de fundação homogéneas ao longo da estrada e a identificar pontos fracos da fundação, podendo avaliar-se a mesma de forma mais aprofundada, utilizando poços e trincheiras.

O ensaio com DCP consiste em cravar uma vara no solo, através da aplicação sucessiva de golpes de um martelo, com uma determinada massa, deixado cair de uma altura fixa. No ensaio mede-se a penetração por golpe no material constituinte das diferentes camadas do pavimento. Esta taxa de penetração é uma função da resistência ao corte *in situ* do material, a qual depende do teor de humidade e da baridade *in situ* dos materiais no momento da realização do ensaio. O perfil de profundidade do pavimento dá uma indicação das propriedades dos materiais em todas as camadas do pavimento até à profundidade de penetração.

O método do DCP é útil quando uma estrutura de pavimento já está em serviço e precisa de ser melhorada ou beneficiada. Essa beneficiação pode ser efetuada à custa do uso de materiais locais e das condições *in situ*, os quais podem ser caracterizados com vantagem através do DCP. A ação do tráfego sobre os pavimentos ao longo dos anos sobrecompacta a fundação, particularmente em pavimentos sem camadas ligadas. Mesmo áreas localizadas mais fracas tendem a tornar-se mais resistentes. Também a acumulação de cascalho na superfície, por exemplo, poderá fornecer um suporte ou fundação para um novo pavimento. Levando em linha de conta tais condições resulta, geralmente, numa redução das necessidades de incorporação de materiais e, assim, podem obter-se soluções de pavimentos mais económicas.

Uma das principais vantagens da utilização do método do DCP é que o pavimento é testado em condições razoavelmente representativas do estado em que ele irá operar. A simplicidade do ensaio permite a repetição de ensaios para reduzir os erros e também para ter em conta a variação das características dos materiais no tempo. No entanto, o DCP não deve ser utilizado como um indicador absoluto da resistência de um material, devendo ser também conjugado com o ensaio de CBR. Os materiais devem ser avaliados também em termos da sua granulometria, dimensão máxima, plasticidade e dureza.

De ressaltar que, de acordo com o estudo desenvolvido por Brito (2011), no caso de estradas florestais, dado que os pavimentos tendem a ter cerca de 100 a 150 milímetros de espessura, o DCP produz valores artificialmente baixos quando comparado com o CBR, possivelmente devido ao efeito perturbador na ponta do cone nos primeiros centímetros de penetração.

Embora os procedimentos empíricos de dimensionamento de pavimento tenham como principal vantagem o facto de se basearem numa vasta experiência relacionada com o desempenho dos pavimentos existentes e, portanto, estão em grande medida validados, os métodos empíricos só têm uma fiabilidade suficiente dentro dos limites da experiência em que se baseiam.

3.6.2.3 Abordagem empírico-mecanicista (Brito et al, 2009)

Um método de dimensionamento é dito mecanicista (ou analítico) quando utiliza a mecânica de pavimentos para prever as tensões e deformações induzidas pelo tráfego e pelo clima na estrutura do pavimento, e procura compatibilizá-las com as leis de comportamento dos materiais.

Com este tipo de análise simula-se o funcionamento da estrutura quando solicitada, com a aproximação que o modelo permite, possibilitando modificações quanto à natureza dos materiais constituintes, bem como quanto às espessuras das camadas.

Entre as vantagens de um método empírico-mecanicista para o dimensionamento de pavimentos podem ser citados:

- Melhor fiabilidade no dimensionamento;
- Possibilidade de prever mecanismos de degradação estruturais;
- Maior compatibilização entre custo e benefício das obras;

- Possibilidade de prever as consequências estruturais de novas configurações de carregamento;
- Melhor utilização dos materiais disponíveis;
- Possibilidade de se considerar explicitamente os efeitos sazonais.

Os aspetos-chave do dimensionamento mecanicista estão nos modelos de comportamento dos materiais utilizados. Um procedimento mecanicista pode considerar um simples modelo de comportamento elástico do material, sem variação do valor do módulo de camadas betuminosas com a temperatura, até à consideração de um modelo visco-elasto-plástico das mesmas camadas, com variação horária das suas propriedades em função das condições climáticas locais.

Nas análises mais simples, a extensão de tração na base das camadas betuminosas e a extensão de compressão no topo da fundação são os parâmetros resposta para o dimensionamento do pavimento. Noutras, levam-se em consideração os modelos de desempenho para simular o comportamento do pavimento ao longo de toda a sua vida útil, podendo antecipar, assim, as manutenções sugeridas ao longo de todo o projeto, tendo por base parâmetros de referência do comportamento mecânico das camadas e seu desempenho funcional.

A parcela empírica das metodologias empírico-mecanicistas é representada por fatores de calibração que contribuem para ajustar a resposta dos modelos ao desempenho de estruturas reais. A dificuldade fica, naturalmente, na determinação destes parâmetros que, muitas vezes, podem levar a significativas mudanças na solução de dimensionamento com pequenas variações nos coeficientes.

3.6.3 Adequação dos métodos de dimensionamento

Idealmente um método adequado de dimensionamento de pavimentos deve ser baseado na experiência e na teoria fundamental do comportamento do material e da estrutura, tendo em conta as condições locais de clima, do tráfego, dos materiais locais disponíveis e outros fatores ambientais. Deve, assim, permitir que o projetista possa dimensionar uma estrutura de pavimento adequada, com capacidade de carga suficiente para o tráfego esperado durante a sua vida útil, de modo a que o pavimento fique, no final da sua vida, num nível de serviço terminal pré-determinado.

Segundo o SATCC (2003), deverão ser analisados os seguintes fatores para a verificação da adequação dos métodos de dimensionamento de pavimentos para EBVT baseados em manuais:

- Classes de fundação: as classes devem ser suficientemente estreitas para tirar vantagem da gama de materiais de fundação que possam ocorrer;
- Classes de tráfego: estas devem ser relativamente estreitas para atenderem de forma incremental a valores do número acumulado de eixos padrão de projeto até 500.000 ESA;

- Classes de materiais: deve haver um número suficiente de classes para atender a toda a gama de materiais disponíveis e às suas diferentes propriedades;
- Especificações dos materiais: devem ser baseadas no desempenho comprovado em campo relativamente a fatores como o tráfego, classe de fundação, tipo de revestimento da superfície, características geológicas e climáticas do local.

Com base nos critérios referidos, os vários métodos de dimensionamento geralmente usados na região da SADC foram avaliados quanto à sua aplicabilidade em EBVT. Os mencionados no Quadro 3.9 foram geralmente considerados adequados, na condição de serem usados de forma flexível e não de forma rígida, tal como estão prescritos.

Quadro 3.9 - Métodos de dimensionamento de pavimentos adequados para uso na região da SADC (adaptado de SATCC, 2003)

Métodos Empírico-mecanicistas	Métodos Empíricos
Método S-N (AASHTO, 1993) TRH4 (CSIR, 1981)	Método DCP (Kleyn, 1982). SATCC <i>Pavement Design Guide</i> (SATCC, 1998) TRL RN 31 (TRL, 1993) TRL/SADC <i>Pavement Design Guide</i> (Gourley et al, 2009)

Há ainda uma série de guias e/ou manuais publicados em alguns países, dos quais se destacam os que se indicam a seguir (SATCC, 2003):

- *Zimbabwe Pavement Design Guide* (Mitchell et al, 1975);
- *Botswana Roads Design Manual* (MWTC, 1982);
- *Tanzania Pavement and Materials Design Manual* (MW, 1999).

Estes métodos não são diretamente comparáveis, pois diferem em vários aspetos, como a gama de classes de tráfego e de fundação, etc. Alguns são mais conservadores do que outros, embora todos se baseiem em trabalhos levados a cabo em cada região, especificamente para aplicação em EBVT.

Em seguida, apresenta-se uma descrição breve sobre alguns métodos de dimensionamento de EBVT de uso mais relevante.

3.6.4 Guia de Pavimento de SATCC (SATCC, 1998)

O manual da SATCC - *Draft Code of Practice for the Design of Road Pavements* (1998) é um manual 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.

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

- i) Estimativa do tráfego acumulado esperado durante a vida do pavimento;

- ii) Definição da resistência da fundação (solo) sobre a qual o pavimento será construído;
- iii) Definição do clima operacional (seco ou molhado);
- iv) Determinação de aspetos práticos complementares que irão influenciar a seleção do pavimento;
- v) 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.

3.6.4.1 Classes de tráfego

O tráfego é a principal ação considerada para o dimensionamento do pavimento. Apesar disso, a sua definição reveste-se sempre de incertezas, pois é preciso fazer projeções para o período de vida útil do pavimento. No caso do 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 da SATCC 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 (3.5):

$$DT = T \times 365 \times \frac{[1 + r/100]^N - 1}{r/100} \quad (3.5)$$

Em que:

DT = Tráfego total acumulado de projeto para cada categoria de veículos, por sentido;

T = Tráfego médio diário para cada categoria de veículos, por sentido;

r = Taxa média de crescimento anual, em percentagem;

N = Vida útil de projeto, em anos.

O número de veículos de cada categoria é multiplicado por um fator de equivalência, EF , obtendo-se o número equivalente de eixos padrão dessa categoria. O fator EF depende também da tipologia do pavimento em causa (valores de n diferentes) e pode ser obtido a partir da Equação (3.2).

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 no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 - Classes de Tráfego (adaptado de 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 - 0,7	0,7 - 1,5	1,5 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 17	17 - 30

3.6.4.2 Classes de fundação

Em conjunto com a classe de tráfego, a classe de fundação é outro dado de entrada no catálogo de estruturas do manual da SATCC. A fundação é classificada em função do seu valor de CBR, seguindo o exposto no Quadro 3.11:

Quadro 3.11 - Classes de Fundação (adaptado de SATCC, 1998)

Intervalo do valor de CBR da fundação (%)	Classe de Fundação					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	2	3 - 4	5 - 7	8 - 14	15 - 29	30 ou +

3.6.4.3 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 estruturas 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 do Quadro 3.12.

Quadro 3.12 - Reclassificação de condições climáticas para regiões nominalmente húmidas (adaptado de SATCC, 1998)

Drenagem prevista	Nível de manutenção previsto		
	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 (Dry); W = Condições nominalmente húmidas (Wet)

3.6.4.4 Tipologia das estruturas

Após definição da classe de tráfego, da classe de fundação e das condições climáticas da região onde será construído o pavimento, tem de definir-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/ou adequabilidade dos materiais, mas importa referir que, de acordo com o manual, nem todos os tipos de materiais podem ser aplicados para todas as classes de tráfego. O Quadro 3.13 apresenta as tipologias de estruturas (camada de base e camada de sub-base) previstas e tece alguns comentários relativos à sua utilização.

Quadro 3.13 - Tipologias de estruturas previstas no catálogo de estruturas (adaptado de SATCC, 1998)

Catálogo	Estrutura do pavimento ¹	Comentários
D1 & W1	Base granular e sub-base granular	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.
D2 & W2	Base granular e sub-base tratada	Base: como indicado para D1 & W1. Sub-base pode incluir tratamento com cal (para classes T3, < $0,75 \times 10^6$ eixos padrão de 80 kN) ou com emulsão betuminosa (para classe T4, até 3×10^6 eixos padrão de 80 kN)
D3 & W3	Base tratada e sub-base tratada	Normalmente base tratada com cimento; a base tratada com emulsão betuminosa é permitida na classe T3 (até $1,5 \times 10^6$ eixos padrão de 80 kN) ² . A sub-base pode incluir tratamento com cal (para classes T3, < $0,75 \times 10^6$ de eixos padrão de 80 kN) ou com emulsão betuminosa (para classe T4, até 3×10^6 de eixos padrão de 80 kN)
D4 & W4	Base betuminosa e sub-base granular	Base em misturas betuminosas a quente fabricadas em central
D5 & W5	Base betuminosa e sub-base tratada	Base: como indicado para D4 & W4. A sub-base pode incluir tratamento com cal (para classes T3, < $0,75 \times 10^6$ de eixos padrão de 80 kN) ou com emulsão betuminosa (para classe T4, até 3×10^6 de eixos padrão de 80 kN)
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.		

O tipo de material para a camada de desgaste está estabelecido de forma invariável em cada caso, decorrendo a sua seleção de todos os condicionalismos atrás indicados. Nos diversos catálogos estão identificadas as situações onde se consideram misturas betuminosas e revestimentos superficiais.

Da análise do manual da SATCC, conclui-se que, em geral, para uma região com determinadas características climáticas, considerando uma dada classe de fundação e uma dada classe de tráfego, existem 5 tipologias de estruturas de pavimento alternativas (D1 a D5 ou W1 a W5) no catálogo. Infere-se, por isso, que estas 5 estruturas deverão ser estruturalmente equivalentes de acordo com o manual, pois independentemente da tipologia das camadas que as constituem, destinam-se a suportar a mesma quantidade de tráfego, traduzida por uma classe de tráfego igual.

3.6.5 Método do Penetrômetro Dinâmico (DCP)

Um dos métodos de dimensionamento de pavimento de EBVT aplicados na África do Sul utiliza o Penetrômetro Dinâmico – DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), o qual foi desenvolvido para a modernização de estradas, quer com pavimentos não revestidos quer revestidos, tendo sido aplicado com sucesso em vários países africanos. O objetivo do método do DCP é conseguir um dimensionamento equilibrado que valoriza a resistência do material existente relacionada com muitos anos de compactação devida à ação do tráfego. A ênfase principal é o uso do pavimento da estrada existente sem perturbar a sua resistência, adicionando apenas o material com a qualidade e espessura necessárias para suportar o tráfego de projeto.

O método do DCP de concepção de pavimento já foi testado e adotado em alguns países africanos, como é o caso do *Malawi* (MTPW, 2013 a ; MTPW, 2013 b), no *Sudão do Sul* (MRB, 2013), *Etiópia* (ERA, 2011) e *Moçambique* (ANE, 2014).

O método do DCP é útil quando uma estrutura do pavimento já está em serviço e deve ser reforçada ou reabilitada. Nessas condições, o método permite uma utilização significativa dos materiais e das condições *in situ*. Ao longo dos anos e sob o tráfego, as faixas de rodagem dos pavimentos das estradas sem revestimento atingem um elevado nível de compactação da fundação, as áreas fracas localizadas tendem a tornar-se mais resistentes e a acumulação de cascalho na camada de desgaste existente poderá ser utilizada como camada de suporte para o novo pavimento revestido. Estas circunstâncias geralmente resultam numa redução na necessidade de importação de grandes quantidades de material virgem.

3.6.5.1 Número DCP (DN)

O DCP mede a penetração por golpe nos materiais constituintes das diferentes camadas do pavimento. Esta taxa de penetração é uma função da resistência ao corte e do teor de humidade do material *in situ* e da baridade das camadas do pavimento no momento do ensaio.

O perfil da evolução da penetração em profundidade dá uma indicação das propriedades *in situ* dos materiais constituintes das camadas do pavimento até à profundidade de penetração, conforme é ilustrado na Figura 3.8.

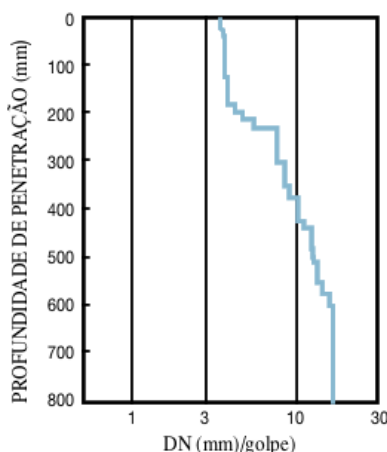


Figura 3.8 - Diagrama da resistência das camadas (adaptado de MTPW, 2013 b)

A taxa de penetração (DN em mm / golpe) é um indicador razoavelmente bom do valor de CBR (em %), nas condições prevalentes de humidade e baridade *in situ*. A correlação entre estes valores é dada pela Equação (3.6) e é aplicável às EBVT com valores de CBR *in situ* até cerca de 150% (ANE, 2014).

$$CBR = 410 \times DN^{-1,27} \quad (3.6)$$

3.6.5.2 Número estrutural DCP

O número estrutural DCP é o número de golpes DCP necessários para penetrar numa estrutura de pavimento ou camada. Por exemplo, o DSN_{800} , um parâmetro que permite a comparação da capacidade de suporte de pavimentos diferentes, é o número de pancadas necessárias para penetrar no pavimento até uma profundidade de 800 mm (MTPW, 2013 b).

3.6.5.3 Procedimento de Projeto pelo método do DCP (ANE, 2014)

O processo envolve a realização de uma sequência de atividades que visam determinar a estrutura adequada do pavimento, a partir de um catálogo de conceção, comparando-a com a estrutura do pavimento existente, determinada durante a campanha de DCP.

i. Etapa 1 - Selecionar o período de dimensionamento

Descrito com mais detalhe no ponto 3.2.1.

ii. Etapa 2 - Determinar o tráfego de projeto e a classe de tráfego

Descrito com mais detalhe no ponto 3.2.8 (Quadro 3.5).

iii. Etapa 3 - Realizar campanha de ensaio com o DCP

Uma campanha com o DCP deve ser levada a cabo ao longo de todo o comprimento da estrada, fazendo cada ensaio até uma profundidade de, pelo menos, 800 mm. A frequência das medições com o DCP dependerá da variabilidade das condições do pavimento e do nível de confiança desejado. A frequência recomendada de ensaios deverá seguir as indicações do Quadro 3.14, com os ensaios desfasados nos dois sentidos da faixa de rodagem:

Quadro 3.14 - Frequência de ensaios DCP (adaptado de ANE, 2014)

Condição do pavimento existente	Frequência dos ensaios /km*
Uniforme (risco baixo)	5
Não-uniforme (risco médio)	10
Baixas / zonas deterioradas (risco alto)	20

* Assegurar que, pelo menos, 20 ensaios com o DCP são realizados por seção uniforme, de modo a fornecerem dados suficientes para análise estatística.

iv. Etapa 4 - Determinar o teor de humidade ao longo da extensão do pavimento

A resistência *in situ* do material é fortemente dependente das condições de humidade e de baridade. É essencial uma estimativa da humidade *in situ* no momento do ensaio com o DCP para comparação com o regime de humidade esperado em serviço. Para isso, devem ser analisadas, pelo menos, duas amostras por km (e no mínimo 3 em cada secção uniforme) para determinação do teor em humidade, devendo ser realizados ensaios de classificação do solo na zona exterior de passagem dos rodados, para as profundidades de 0-150, 150-300 e 300-450 mm.

v. Etapa 5 - Obter valores de DN para camadas do pavimento para a toda a extensão da estrada (usando o programa do DCP)

Os resultados obtidos com o DCP em cada ponto de medição devem ser tratados (por exemplo através da folha de cálculo fornecida com o equipamento) para obter, por um lado, a média ponderada dos valores de DN (taxa de penetração em mm/golpe), para cada ponto de ensaio e a cada 150 milímetros de camada da estrutura do pavimento e, por outro lado, o valor DSN_{800} (número total de pancadas necessárias para atingir uma profundidade de 800 mm).

vi. Etapa 6 - Identificar secções uniformes (método Cusum)

Os valores de DN para cada camada de 150 milímetros, bem como os de DSN_{800} , devem ser representados graficamente em função da distância à origem da estrada, utilizando uma técnica de soma acumulada (CUSUM) para identificar secções uniformes ao longo da estrada. Este processo, normalmente, serve para identificar alterações nos tipos de materiais subjacentes, transições de escavação para aterro ou variações nas condições de humidade do solo.

vii. Etapa 7 - Ajustar os valores de DN ao teor de humidade de projeto

Os resultados do DCP devem ser ajustados para as condições de humidade consideradas para o dimensionamento. Com base na estimativa das condições de humidade *in situ*, no momento do ensaio com o DCP (Etapa 4) deverão ser ajustados os resultados de acordo com os valores percentuais apresentados no Quadro 3.15. Pode observar-se que os dados do DCP recolhidos durante a estação seca correspondem a maiores resistências observadas (DN com valores inferiores) do que os recolhidos na estação chuvosa.

Quadro 3.15 - Percentis da taxa máxima de penetração do DCP (adaptado de ANE, 2014)

Teor de humidade esperado no pavimento a longo prazo	Percentil de perfil de resistência mínima (taxa máxima penetração - DN mm/golpe)	
	Tráfego de projeto < 0.5 milhões de ESA	Tráfego de projeto 0.5 – 1.0 milhões de ESA
Mais seco do que no momento do ensaio com o DCP	20	30
O mesmo que no momento do ensaio com o DCP	50	65
Mais húmido do que no momento do ensaio com o DCP	80	90

viii. Etapa 8 – Determinação do perfil de resistência da camada *in situ* (LSP) para cada seção uniforme

A melhor forma de realizar esta determinação é através do programa fornecido com o DCP. As entradas para o programa são os valores de DN obtidos na Etapa 5. Com base numa análise dos valores médios para cada secção uniforme, são obtidos os perfis de resistência de cada camada, conforme exemplificado na Figura 3.9. Esta análise permite ainda a escolha dos percentis que deverão ser usados no processo de dimensionamento.

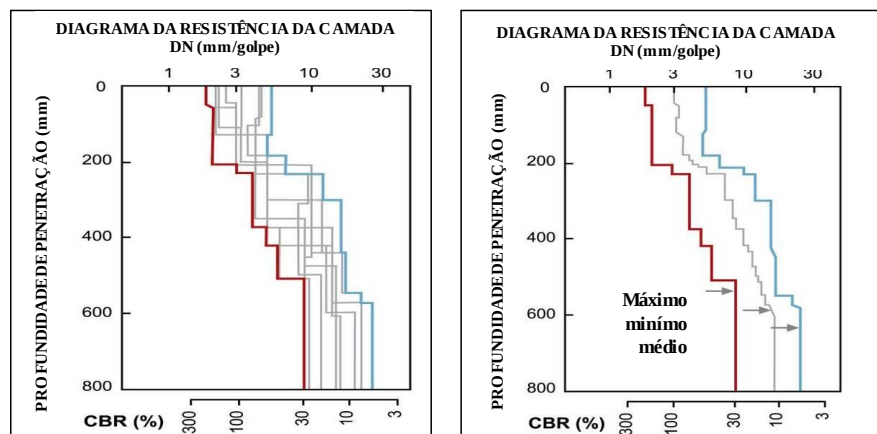


Figura 3.9 - Perfis de resistência coletivos e perfil de resistência médio e extremos (adaptado de ANE, 2014)

ix. Etapa 9 - Determinar o perfil de resistência necessária da camada (LSP) para cada seção uniforme

Para uma determinada classe de tráfego de projeto, o perfil de resistência necessária para cada camada de espessura uniforme é determinado a partir do catálogo de projeto com base no DCP (Quadro 3.16), e ilustrado na Figura 3.10 para diferentes categorias de tráfego. O catálogo de projeto considera as condições de humidade em serviço esperada a longo prazo.

Quadro 3.16 - Catálogo de projeto com base no DCP para diferentes classes de tráfego (adaptado de ANE, 2014)

Classe de Tráfego ESA x 10 ⁶	LE 0.01 < 0.01	LE 0.03 0.01 – 0.03	LE 0.1 0.03 – 0.1	LE 0.3 0.1 – 0.3	LE 0.7 0.3 – 0.7	LE 1.0 0.7 – 1.0
0- 150mm Base CR ≥ 98%	DN ≤ 8	DN ≤ 5.9	DN ≤ 4	DN ≤ 3.2	DN ≤ 2.6	DN ≤ 2.5
150-300 mm sub-base CR ≥ 95%	DN ≤ 19	DN ≤ 14	DN ≤ 9	DN ≤ 6	DN ≤ 4.6	DN ≤ 4.0
300-450 mm fundação CR ≥ 95%	DN ≤ 33	DN ≤ 25	DN ≤ 19	DN ≤ 12	DN ≤ 8	DN ≤ 6
450-600 mm Material <i>in situ</i>	DN ≤ 40	DN ≤ 33	DN ≤ 25	DN ≤ 19	DN ≤ 14	DN ≤ 13
600-800 mm Material <i>in situ</i>	DN ≤ 50	DN ≤ 40	DN ≤ 39	DN ≤ 25	DN ≤ 24	DN ≤ 23
DSN ₈₀₀	≥ 39	≥ 52	≥ 73	≥ 100	≥ 128	≥ 143
CR – Compactação relativa (%), referido ao Proctor modificado						

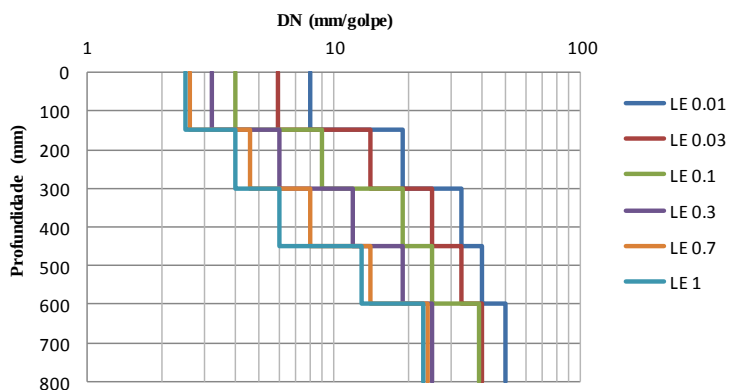


Figura 3.10 - Perfil de resistência de camada para várias classes de tráfego (adaptado de ANE, 2014)

x. Etapa 10 - Comparar o LSP *in situ* com o LSP necessário para cada seção uniforme

A comparação do LSP existente com o necessário faz-se traçando o perfil de resistência necessária sobre o de resistência *in situ* para cada secção uniforme (Figura 3.11). Isso permite a adequação das várias camadas do pavimento em profundidade em função do carregamento de tráfego esperado. Os pontos situados à direita do perfil de resistência necessária para uma categoria de tráfego específica indicam que o material tem uma resistência insuficiente nessa profundidade.

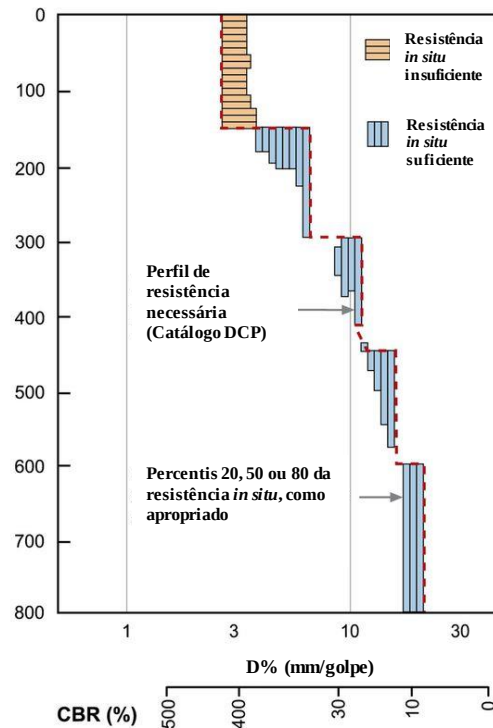


Figura 3.11 - Comparação dos perfis de resistência necessário e *in situ* (adaptado de ANE, 2014)

xi. Etapa 11 - Determinar os requisitos de melhoria

Opção 1: Se o perfil de resistência *in situ* de um pavimento existente está em conformidade com o perfil de resistência necessária indicado pelo catálogo baseado no DCP para a classe de tráfego em estudo, o pavimento apenas precisará de ser reperfilado, compactado e munido de uma camada de revestimento.

Opção 2: Se o perfil de resistência *in situ* de um pavimento existente não está em conformidade com o perfil de resistência necessária, indicado pelo catálogo do método baseado no DCP, para a classe de tráfego em estudo, será necessário atuar nas camadas superiores do pavimento da seguinte forma:

- Refazer a camada caso apenas a baridade seja inadequada e o valor de DN necessário seja possível de obter por compactação durante a construção, para determinada baridade e teor de humidade especificado;
- Substituir a camada no caso da qualidade do material (valor de DN com uma compactação especificada durante a construção e o teor de humidade em serviço esperado) ser inadequada; será necessário colocar material de qualidade adequada para servir de apoio à(s) nova(s) camada(s) superior(es) do pavimento;
- Adicionar material no caso da qualidade do material (valor de DN) ser adequada mas a espessura ser insuficiente; será necessário colocar material de qualidade adequada para perfazer a espessura necessária antes da compactação.

3.6.6 Método do catálogo Moçambicano (ANE, 2014)

Os métodos baseados em catálogos são os mais simples de utilizar e, de fato, os mais comuns para o dimensionamento de pavimentos. 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, escolher o tipo de estrutura preferida e, em seguida, procurar o dimensionamento no catálogo apropriado.

O manual desenvolvido pelas autoridades moçambicanas apresenta vários catálogos para os seguintes tipos de pavimentos:

- Com revestimentos superficiais;
- Com bases estabilizadas;
- Com revestimentos semiestruturais;
- Com revestimentos de elementos discretos;
- Com revestimentos estruturais.

Os catálogos acima referidos são idênticos aos catálogos constantes no *Ethiopia Low Volume Roads Manuals* (ERA, 2011). Quer o manual Moçambicano, quer o Etíope, apresentam catálogos para diferentes pavimentos que variam consoante a classe de fundação e outros fatores, e apresentam como alternativa o Método do DCP anteriormente descrito.

A título exemplificativo, apresenta-se a metodologia a seguir para o caso de projeto de pavimentos com revestimentos superficiais (Lama asfáltica - *Slurry seal*, revestimentos superficiais simples e duplos, entre outros), apresentando-se nos Quadros 3.17 e Quadro 3.18 os catálogos de dimensionamento. Nos referidos quadros, as espessuras são apresentadas em mm. O manual considera, ainda, a zona climática, da seguinte forma:

- Zonas climáticas húmidas com $N < 4$
 - Quando a largura do pavimento revestido é ≤ 8 m, deverá ser usado o Quadro 3.17. 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 Quadro 3.18. O limite para o módulo de plasticidade ⁴ da base do pavimento pode ser aumentado em 20 %;
 - Quando a largura do pavimento revestido ≤ 8 m, mas o pavimento é construído sobre um aterro com altura superior a 1,2 m, deverá ser usado o Quadro 3.18. 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 Quadro 3.17.

⁴ Módulo de plasticidade (PM) = % de material passado no peneiro 0,425 mm x IP (índice de plasticidade)

- Zonas climáticas secas, onde $N > 4$

Deverá ser usado o Quadro 3.18.

- 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.

Quadro 3.17 - Projeto de pavimento com revestimentos betuminosos (adaptado de ANE, 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

Ver Anexo I: Quadro I 1 - Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas

Nota 1: Por exemplo, uma solução de 150 G65 significa camada com 150 mm de espessura de material G65

Quadro 3.18 - Projeto de pavimento betuminoso - Quadro 2 (adaptado de ANE, 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

Ver Anexo I: Quadro I 1 - Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas

Sobre estas estruturas de pavimento indicadas no Quadro 3.17 e 3.18 será executado um revestimento betuminoso, selecionado em função das condicionantes existentes.

Quando a estrada está localizada perto da fronteira entre as duas zonas climáticas, deverá ser usado o menor valor N para reduzir os riscos. Quando o projeto está perto da fronteira entre duas classes de tráfego, e na ausência de dados mais confiáveis, deverá ser utilizada a classe

mais elevada mais próxima. O método não é aplicável nos caso de fundações fracas (CBR <3%) e de solos problemáticos.

3.6.7 TRL/SADC (Gourley et al, 1999)

O manual desenvolvido pelo TRL para a zona 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). Assim, este manual fornece orientações para o dimensionamento de pavimentos para uma variedade de níveis de tráfego inferiores a um valor acumulado de 300.000 ESA que não estavam contemplados nos guias emitidos pelo TRL (1993), bem como no *Code of Practice for the Design of Road Pavements (draft)* (CSIR, 1998). Os dados utilizados na elaboração do manual foram obtidos a partir de estudos efetuados no Botswana, Malawi e Zimbabwe, abrangendo uma variedade de climas, classificados amplamente como áridos a semiáridos, sazonalmente húmidos e molhados. Outros dados de desempenho disponíveis, tanto dentro como fora daquelas regiões, também foram consultados para verificar e corroborar as conclusões.

3.6.7.1 Classes de fundação

As fundações são classificadas com base em ensaios de laboratório de determinação de CBR, sendo consideradas as classes constantes no Quadro 3.19.

Quadro 3.19 - Classes de fundação (adaptado de Gourley et al, 1999)

Classe	CBR de projeto	Notas
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)
S5	15 – 29	Pode ser usado em todos os aterros e como camada de preenchimento selecionada; a camada selecionada geralmente é compactada a 95% (compactação pesada)
S4	9 – 14	Pode ser usado em todos os aterros
S3	5 – 8	Pode ser usado em todos os aterros
S2	3 - 4	Pode ser usado em todos os aterros que não excedam 2 metros de altura

3.6.7.2 Classes de tráfego

As classes de tráfego são estabelecidas na forma de intervalos para o número acumulado de ESA, tal como se mostra no Quadro 3.20.

Quadro 3.20 - 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 a 50.000
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 M	500.000 a 1 milhão
3 M ⁽¹⁾	1 a 3 milhões

⁽¹⁾ Esta classe é idêntica à indicada pelo TRL/ORN 31 (TRL, 1993)

3.6.7.3 Procedimento de dimensionamento de um pavimento

A metodologia de dimensionamento de um pavimento é a esquematizada na Figura 3.12, na qual se mostra a sequência de passos necessários para dimensionar o pavimento adequado para uma determinada estrada e as correções que é necessário considerar para os materiais.

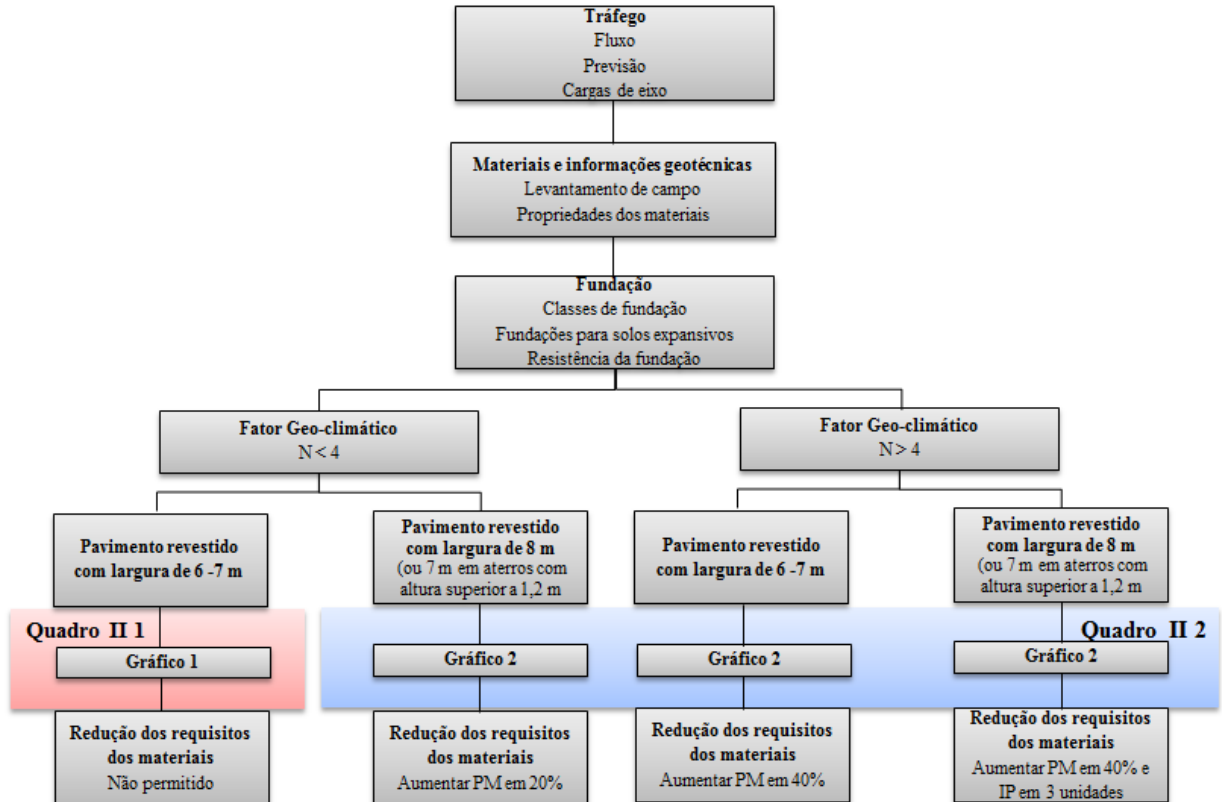


Figura 3.12 – Procedimento de projeto para estradas revestidas (adaptado de Gourley et al, 1999)

Quando uma estrada é construída sobre um aterro com mais de 1,2 metros de altura, o material na base e sub-base permanece relativamente seco, mesmo na estação chuvosa. Neste caso, os níveis de exigência de projeto podem ser reduzidos. Por exemplo, um pavimento revestido com uma largura de sete metros pode ser projetado para os mesmos requisitos que um com oito metros. A consideração de uma largura revestida superior em zonas climáticas onde $N < 4$ (probabilidade mais elevada de ambiente relativamente molhado) obriga a uma mudança no processo de dimensionamento, utilizando as estruturas indicadas no Quadro II 2 em vez das apresentadas no Quadro II 1. do Anexo II. Isto permite o uso de camadas de pavimentos menos espessas e uma diminuição das exigências de qualidade para a fundação. Em zonas climáticas onde $N > 4$ (probabilidades mais alta de clima seco), pode admitir-se que o requisito da resistência da fundação diminua para cerca de metade.

3.6.8 Guia de projeto de pavimentos da Austroads

Na Austrália, o guia de projeto de pavimentos utilizado é o chamado *Austroads Pavement Design Guide* (APDG) publicado em 1992 (Austroads, 1992) e revisto em 2004 (Austroads,

2004). Foi um dos primeiros guias a incorporar a análise mecanicista na concepção de pavimentos flexíveis e, portanto, uma importante referência para os estudos sobre o tema.

Este método considera o pavimento como sendo uma estrutura com a finalidade de suportar cargas, devendo a mesma ser analisada em termos mecanicistas – análise do estado de tensão e deformação – e através de modelos de previsão de desempenho ajustados empiricamente.

Um dos principais elementos enunciados pelo APDG é a concepção de novos pavimentos flexíveis constituídos por materiais granulares não ligados, revestidos por uma camada fina. Uma vez que o desempenho dos pavimentos sem revestimento pode ser considerado fortemente dependente dos materiais locais, das condições ambientais locais e das políticas de manutenção, a APDG deixou esta abordagem fora do seu âmbito (Brito, 2011).

Brito et al (2009) referem que o APDG utiliza um processo analítico para determinar a resposta do pavimento a um carregamento simples. Considera a deformação horizontal de tração na base da camada ligada (camada betuminosa ou com ligantes hidráulicos), e a deformação vertical de compressão no topo da fundação, conforme mostra a Figura 3.13.

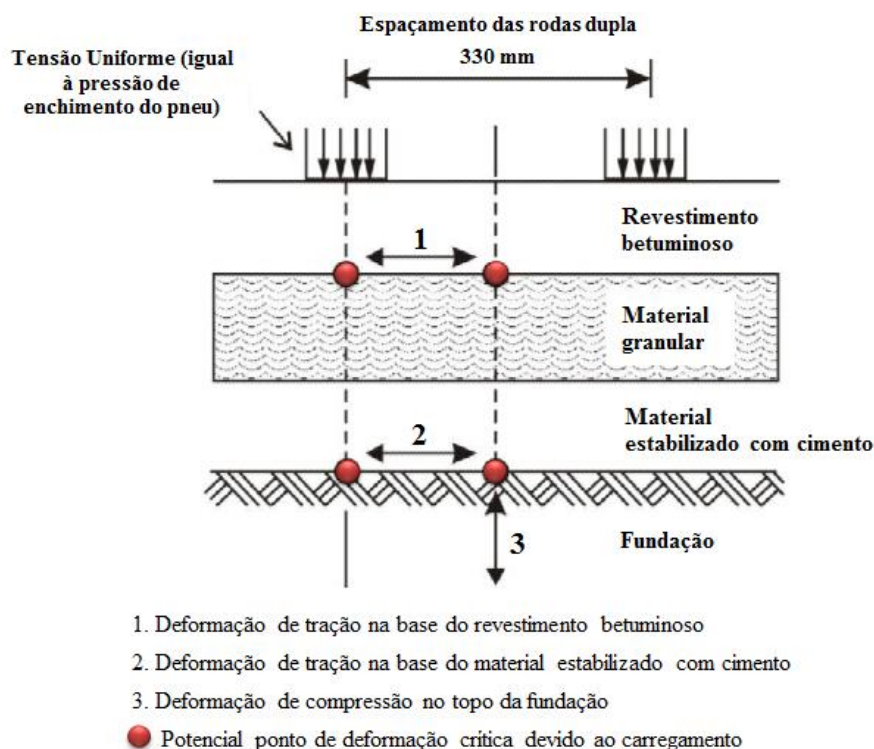


Figura 3.13 - Localização das deformações críticas num pavimento - *Austroads* (1992) (Brito et al, 2009)

As deformações assinaladas são utilizadas como parâmetro de entrada para análise do desempenho do pavimento, o qual depende da resposta crítica ao tráfego previsto para o período de dimensionamento.

A última versão do APDG de 2004 utiliza o programa computacional *Circlly* para as análises mecanicistas. O programa calcula as tensões, deformações e deslocamentos induzidos pelo carregamento na estrutura multicamadas em análise. A máxima deformação vertical de

compressão no topo da fundação é relacionada com o número de passagens de eixos padrão necessário para causar a ruína do pavimento por deformação permanente.

A máxima tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada betuminosa ou ligada com ligantes hidráulicos é relacionada com o tráfego necessário para causar o fim da vida útil do pavimento por fendilhamento por fadiga (Brito, 2011).

A metodologia mecanicista empregada envolve o cálculo do dano no pavimento por estas deformações críticas conforme ilustrado na Figura 3.13. Estes parâmetros mecanisticamente determinados são correlacionados empiricamente com critérios de ruína estabelecidos por relações de desempenho do pavimento da seguinte forma (Brito et al., 2009):

$$N = \left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^b \quad (3.7)$$

Onde:

N é a vida de projeto do pavimento;

k é uma constante que depende do material;

b é o expoente de dano do material;

ε é a deformação induzida pelo carregamento.

Os parâmetros k e b são determinados pela calibração do método de projeto através de observações de desempenho de pavimentos em serviço. A grande maioria das observações que faziam parte do guia na sua primeira edição de 1992 foram aceites para a nova versão de 2004.

O procedimento indica, numa fase inicial, a avaliação da resistência da fundação. Este pode ser considerado o fator mais importante neste guia para a determinação da espessura do pavimento de projeto, composição e desempenho. Os parâmetros de avaliação da fundação contemplados são: o CBR, os parâmetros elásticos e módulo de reação da fundação (k). Os dois primeiros são de interesse para projeto de pavimento flexível, e o primeiro e terceiro para os pavimentos rígidos (Brito, 2011).

Para aqueles casos em que não é viável a caracterização mais detalhada dos materiais, são sugeridos valores normalizados. A correlação entre o CBR e o módulo de deformabilidade é determinada através da expressão bem conhecida " $Modulo(MPa) = 10 \times 10^5 CBR$ ". O ensaio do DCP também é empiricamente correlacionado com o CBR podendo ser um método alternativo para avaliação das propriedades mecânicas da fundação. Com o CBR determinado para a fundação, poderá ser estabelecida a "espessura do pavimento básico" com o auxílio de um gráfico (Brito, 2011).

O projeto do novo pavimento flexível prossegue com a avaliação do tráfego ao longo do período de dimensionamento, seguido da classificação da estrada e da fixação de limites para

⁵ Embora a correlação esteja disponível para uso neste APDG, o seu uso é desaconselhado, uma vez que o CBR é um parâmetro empírico.

a irregularidade do pavimento, com os quais deverá ser escolhida uma proposta de estrutura de pavimento, a partir de um conjunto de esquemas oferecidos.

Para escolher a combinação de camadas do pavimento, deve ser realizada uma análise de tensão-deformação auxiliada pelo *software* disponível que é capaz de realizar uma análise mecanicista, tal como se referiu. Os critérios de ruína devem, então, ser verificados. Como exemplo, para o caso de pavimentos com revestimentos delgados com base em materiais granulares não ligados, o modo de ruína mais relevante é a deformação permanente (manifestando-se por rodeiras) que é controlada pela limitação da tensão de compressão máxima vertical no topo da fundação (Brito, 2011).

A espessura de projeto básica é, por conseguinte, a espessura da camada de material granular não ligado que limita o esforço de compressão vertical no topo da fundação para um nível aceitável ao longo da vida do pavimento. O critério limitante é dado pela Equação (3.8), obtida mediante a aplicação do procedimento mecanicista descrito no APDG para a gama de estruturas de pavimento proposto (Brito, 2011).

$$N = \left(\frac{8511}{\varepsilon_v} \right)^{7,14} \quad (3.8)$$

em que:

ε_v - Extensão resistente à compressão vertical no topo da fundação (em micrómetros/metro);

N - Número permitido de repetições da tensão ε_v .

O número permitido de repetições de carga deve ser, em seguida, comparado com o tráfego previsto. Se o número de repetições admissível for superior ao tráfego previsto, a estrutura pode ser considerada adequada, caso contrário, a estrutura do pavimento deve ser modificada, repetindo-se o procedimento. A Figura III 1 do Anexo III mostra esquematicamente o procedimento mecanicista de projeto usado no APDG para pavimentos granulares com revestimento betuminoso delgado.

Segundo Brito (2011) como parâmetros de entrada, o procedimento requer a determinação do valor do tráfego de projeto e do CBR da fundação, sendo necessário utilizar as curvas de conceção apresentadas na Figura 3.14. O material deve ser escolhido de acordo com a tradição: os materiais devem ter a capacidade para suportar a carga e reduzir a tensão na fundação, sem causar deformação permanente grave na camada superior por deformação da fundação. A entrada de água é controlada através do estabelecimento de uma elevada inclinação transversal (4-6%).

A espessura determinada a partir da Figura 3.14 representa a espessura da camada mínima para proteger a fundação de deformação permanente sob a ação do tráfego durante a sua vida útil. O guia faz a previsão de perda de agregado que deve ser reposta através de ações de manutenção de rotina (Brito, 2011).

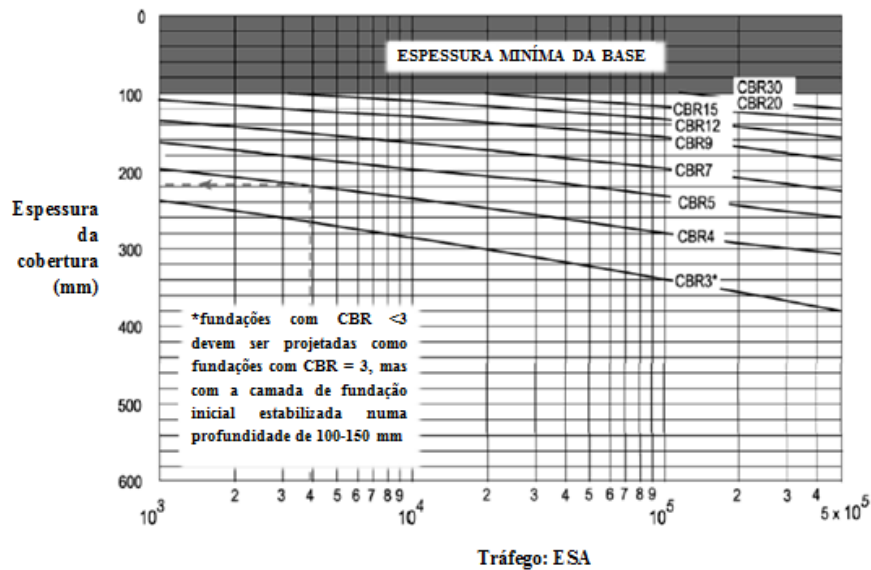


Figura 3.14 - Projeto para pavimentos granulares (80% de confiança) - *Austroads* (2009), (adaptado de Brito, 2011)

A espessura da base mínima indicada é de 100 mm e as fundações com CBR inferior a 3 devem ser estabilizadas numa profundidade de 100-150 mm.

Segundo Brito (2011), entre as vantagens apresentadas pelo guia, a consideração dos materiais granulares como tendo anisotropia parece ser relevante. Além disso, a metodologia proposta ao contabilizar a contribuição das subcamadas na rigidez da camada granular através de um rácio para módulos verticais de subcamadas adjacentes, tal como representado pela Equação (3.9), contribui para a qualidade dos resultados esperados do guia.

$$R = \left(\frac{E_{\text{topo da base}}}{E_{\text{fundação}}} \right)^{1/n} \quad (3.9)$$

em que:

R - Rácio para módulos para a redução das subcamadas;

$E_{\text{topo da base}}$ - Módulo no nível de tensão determinado no topo da camada de base não ligada;

$E_{\text{fundação}}$ - Módulo no nível de tensão determinado no topo da fundação;

n - Número de subcamadas, em que a espessura total da camada granular não ligada é dividida.

Dada a relação de R , como indicado acima, o módulo de cada uma das subcamadas pode ser posteriormente calculado pela multiplicação de R pelo módulo conhecido da camada subjacente adjacente, começando com a fundação (Brito, 2011).

Entre as limitações da metodologia proposta, deve ser tida em consideração o valor de 2800 MPa fixado para o módulo de deformabilidade das camadas betuminosas e adotado na

conceção dos gráficos. Além disso, a relevância dada ao CBR em vez do módulo de deformabilidade poderá levar a avaliações pouco fiáveis da fundação do pavimento (Thom et al, (1987) ; Sweere, (1990)), referidos por Brito, (2011).

Adicionalmente, apesar da deformação permanente ser considerada como a forma principal de ruína (um facto incontestável para tais estruturas de pavimento) o facto de só limitar o esforço de compressão vertical, na parte superior da fundação, como meio de garantir os níveis de rodadas admissíveis, pode conduzir resultados pouco fiáveis. O novo Guia da *Austroads - Guide to Pavement Technology, Parte 6*: divulgado em Setembro de 2009 (Austroads, 2009) parece seguir o mesmo caminho do anteriormente apresentado (Brito, 2011).

3.6.9 Guia de Projeto da AASHTO

O Guia da AASHTO para o projeto de estruturas de pavimentos (AASHTO, 1993) é um método que utiliza o conceito de número estrutural, SN - *Structural Number*. Esta abordagem serviu de base para o desenvolvimento de um catálogo de estruturas de pavimentos adequadas especificamente para EBVT. Neste guia, as camadas granulares são caracterizados em termos de módulos resilientes, que devem ser determinados por meio de ensaios triaxiais de carga cíclicas. No entanto, o módulo de resiliência pode ser substituído por números estruturais se o projetista tiver muita experiência. Este guia prevê a avaliação da condição do pavimento em função dos danos manifestados traduzido num índice único - *Present Serviceability Index* (PSI).

Assume-se que materiais diferentes com um comportamento idêntico devem ter o mesmo número estrutural, SN , um valor empírico calculado a partir dos coeficientes estruturais e espessura das camadas que compõem a estrutura do pavimento. O valor SN pode ser obtido a partir de uma tabela, com o CBR da fundação e o tráfego de projeto como entrada. Uma combinação de revestimentos, base e sub-base é selecionada de acordo com a Equação (3.10).

$$SN = \sum_{i=1} a_i D_i \quad (3.10)$$

em que:

a_i - coeficiente estrutural da camada i , que é uma medida da capacidade relativa do material para funcionar como uma componente estrutural do pavimento, em que:

a_2 - $0,249 (\log_{10} E_B) - 0,977$, coeficiente de base;

a_3 - $0,277 (\log_{10} E_{SB}) - 0,839$, coeficiente de sub-base;

D_i - espessura da camada i ;

E_B - módulo de deformabilidade da base;

E_{SB} - módulo de deformabilidade da sub-base;

Para camadas de sub-base e base granulares, a_i é multiplicado por um fator de drenagem m_i , que depende da capacidade de drenagem do material, ou qualidade de drenagem e das

condições climáticas locais, ou do tempo necessário para remover a água (por exemplo, $m_i = 1,4$ corresponderá a um material bem drenado, em áreas de baixa precipitação; ($m_i = 0,4$ para o caso oposto). Este fator de eficácia aumenta ou diminui a contribuição estrutural de uma camada granular.

As espessuras equivalentes foram também calculadas a partir de uma análise do estado de tensão, escolhendo um valor para um determinado critério (por exemplo, a tensão vertical no topo da fundação sob a ação da carga), mantendo constantes as diferentes combinações de módulo de deformabilidade, E , e espessura da camada.

Brito (2011) refere que Hall et al (2000) investigaram os procedimentos utilizados nos guias de projeto de pavimentos rodoviários de EBVT em onze estados nos Estados Unidos. Os autores verificaram que nos estados em que se desenvolveram procedimentos de projeto específicos em vez de usarem os procedimentos recomendados pela AASHTO, fizeram um esforço para estabelecer valores específicos de "medida" ou parâmetros de projeto para as suas necessidades particulares. Além disso, verificaram que os procedimentos seguidos nesses estados introduziram disposições para a consideração de "camiões mais carregados". Como uma conclusão geral, aqueles autores consideram que o guia AASHTO leva a resultados menos conservadores do que aqueles provenientes de procedimentos regionais.

3.6.10 Projetos de pavimentos de estradas florestais (FCE, 2004)

O abate, transporte e processamento de madeira são importantes atividades económicas em vários países que têm vindo a crescer ao longo do século passado, tanto em florestas virgens como em áreas reflorestadas.

Têm sido feitos esforços em pesquisas de padrões de manutenção para minimizar o custo operacional, visando a melhoria das condições das estradas florestais e a realização de investimentos que permitam um bom controlo dos custos de transporte de madeira.

As principais preocupações nesta matéria abrangem a aplicabilidade dos modelos laboratoriais de deformação permanente para avaliação do comportamento *in-situ* e a calibração de modelação analítica do pavimento numa perspetiva simplificada. O objetivo é fornecer às entidades gestoras das EBVT ferramentas de projeto práticas, com foco no combate à deformação permanente.

A *Forestry Civil Engineering* - FCE - é o braço de engenharia civil da Comissão Florestal e é responsável pela construção e manutenção de estradas e pontes no Reino Unido. Realizam não só as obras como estabelecem também os procedimentos de projeto e manutenção de estradas florestais.

Segundo Brito (2011), as especificações da FCE contêm a maior parte das orientações necessárias para a construção de pavimentos de EBVT. No que diz respeito à conceção do pavimento, o manual propõe o uso de uma camada granular como meio de proteger a fundação. É sugerida a avaliação da fundação com recurso ao DCP, cujos resultados são

depois correlacionados com o CBR do material. O Quadro 3.21 indica a espessura total do pavimento em função do CBR da fundação para estradas florestais.

Quadro 3.21 - Espessura total do pavimento em função do CBR do Manual FCE (adaptado de Brito, 2011)

Material típico	CBR (%)	Espessura do pavimento (mm)	Largura mínima do pavimento (mm)
Turfa, silte	< 2	>850 (considerar escavação)	6000
Argila siltosa	2	700	5500
Argila gorda	3	550	5400
Argila arenosa	4	475	5400
Areia saturada	7	325	5400
Areia fina	10	250	5400
Cascalho arenoso graduada	20	150	5400
Rocha	250+	Mínimo 100 para permitir a regularização da superfície	5400

O manual também indica que a espessura do pavimento muitas vezes só pode ser determinada por uma avaliação competente feita no local. Indica, ainda, que os materiais usados abaixo da superfície devem ter resistência adequada em função da profundidade, enquanto as camadas mais profundas podem ser construídas usando materiais de baixa qualidade obtidos localmente.

Os materiais são especificados de acordo com o seu *AIV* - *Aggregate Impact Value* (obtido de acordo com a norma BS (1990)). Assim, um agregado com *AIV* inferior a 25 pode ser adequado para utilização em camadas de pavimento. Um valor de *AIV* menor do que 20 indica um bom material para britar. Quanto a valores de *AIV* maiores que 35 recomenda-se que sejam submetidos a uma análise mais aprofundada antes de usar. Nos 100 milímetros superiores do pavimento devem ser usados materiais mais resistentes, difíceis de quebrar sob a carga de roda (Brito, 2011).

3.7 Comparação de Métodos de Dimensionamento

Neste subcapítulo comparam-se as metodologias de projeto de pavimento utilizadas essencialmente em África, para EBVT e para um conjunto de dados hipoteticamente obtidos em campo, designadamente de contagens de tráfego, campanha de DCP e ensaios de campo. A comparação faz-se através da obtenção de estruturas por diferentes métodos, para diversas situações de projeto.

3.7.1 Caso Prático

Pretende determinar-se a estrutura do pavimento para uma estrada a ser beneficiada em Moçambique com uma extensão de 5 km, numa área rural com clima húmido, tendo em conta os seguintes parâmetros:

- Período de dimensionamento = 15 anos (ver Quadro 3.1);
- Largura da estrada = 5m;
- Resumo da contagem de tráfego de 7 dias (TMDA ambos os sentidos), conforme se apresenta no Quadro 3.22;

Quadro 3.22 - TMDA em ambos os sentidos

Dia	Carro	Pick-up	4x4	Autocarro pequeno	Autocarro grande	Autocarro médio	Carrinha	Camião médio	Camião pesado	Tractor	Mota	Bicicleta	Carro de tracção animal
Seg	34	5	7	3	1	2	6	2	0	0	15	56	3
Ter	24	7	8	3	1	4	12	1	0	2	21	52	3
Qua	35	12	5	3	3	2	3	1	0	2	17	46	2
Qui	67	14	9	1	5	3	6	1	0	1	17	67	4
Sex	45	22	15	7	5	3	7	3	0	3	23	75	5
Sáb	78	16	12	10	6	13	19	3	0	4	27	56	3
Dom	23	4	6	4	6	2	12	2	0	6	14	34	2
TMDA	43,7	11,4	8,9	4,4	3,9	4,1	9,3	1,9	0,0	2,6	19,1	55,1	3,1

- Taxa de crescimento anual de veículos = 3,5% para todas as classes de veículos;
- Fatores de equivalência entre veículos, conforme se indica no Quadro 3.23:

Quadro 3.23 - Fatores de equivalência de veículos e eixos padrão (caso prático)

Tipo de veículo	EF (ESA/veículo)
Autocarro grande	1,2
Autocarro médio	0,8
Carrinha	1,0
Camião médio	1,5
Camião pesado	3,5

- Foram realizados ensaios com o DCP, com intervalos de 50 m, ao longo da extensão de 5 km. Da campanha de DCP realizada, foram estabelecidas 6 secções uniformes, apresentando-se os valores de DN – penetração média em mm/golpe do DCP – para o percentil 80 no quadro 3.24 (o procedimento de análise e tratamento dos dados DCP está descrito no ponto 3.6.5.3).

Quadro 3.24 - Valores DN - Percentil 80

Camada do pavimento (mm)	Valores DN - Percentil 80					
	Secção uniforme nº					
	1	2	3	4	5	6
0 -150	5,0	3,1	3,6	6,6	3,1	5,6
150 - 300	7,8	3,9	5,2	10,0	3,5	5,8
300 - 450	10,0	6,0	8,6	9,4	6,2	6,3
450 - 600	10,5	8,2	12,0	14,8	7,5	13,2
600 - 800	11,3	8,1	17,2	18,4	9,4	13,8

- Durante o levantamento de campo verificou-se que a humidade *in situ* do solo era inferior ao ótimo;
- Da realização de ensaios sobre as amostras recolhidas nos trados realizados, resultaram os dados constantes no Quadro 3.25.

Quadro 3.25 - Dados recolhidos

Descrição	Dados
Estação da realização dos ensaios com o DCP	Estação seca
Tipo de solo <i>in situ</i>	Areia e argila
CBR médio saturado (obtido a 95% Proctor Modificado) da secção uniforme 1	11%
Índice de plasticidade médio (IP): resultados da secção uniforme 1	14

3.7.1.1 Determinação da classe de Tráfego

i. Estimativa do ESA médio diário (DESA) para todas as classes de veículos

Utilizando a Equação (3.3), os fatores de equivalência e os valores de TMDA indicados no caso prático, obtém-se:

- Autocarro grande	3,9 x 1,2	= 4,68
- Autocarro médio	4,1 x 0,8	= 3,28
- Carrinha	9,3 x 1,0	= 9,3
- Camião médio	1,9 x 1,5	= 2,85
- Camião pesado	0,0 x 3,5	= 0

Total de ESA / dia = 20,11

ii. Estimativa do ESA acumulado (CESA) para todas as classes de veículos ao longo da vida de projeto:

O CESA de projeto pode ser calculado a partir da Equação (3.4):

$$\begin{aligned} \text{CESA} &= 365 \times \text{DESA} \times [(1+r)^N - 1] / r \\ - &= 365 \times 20,11 \times [(1+0,035)^{15} - 1] / 0,035 \\ - &= 365 \times 20,11 \times (0,675) / 0,035 \end{aligned}$$

- = 141.633,19 ESA
- = **0,14 milhões de ESA** (ambos os sentidos)

iii. Estimativa do carregamento de tráfego de projeto corrigido para a estrada com 5 m de largura:

- Correção da carga de tráfego de projeto = 80% do total de ESA em ambos os sentidos (Quadro 3.4)
- = $0,80 \times 0,14$
 - = **0,11 milhões de ESA**

iv. Definição da classe de tráfego para o projeto do pavimento:

Intervalo de tráfego (CESA): 0,10 - 0,30

Classe de Tráfego de projeto = **LE 0,30** (Quadro 3.5)

3.7.1.2 Método baseado no DCP

i. Comparação entre o perfil de resistência *in situ* com o perfil de resistência de projeto necessária

Conforme se referiu, a campanha de ensaios com o DCP foi realizada durante a estação seca, prevendo-se que a longo prazo, em serviço, o teor de humidade seja superior ao registado durante a execução dos ensaios. Por conseguinte, os valores de DN percentil 80 são os utilizados para a determinação do perfil de resistência *in situ* para cada secção uniforme e comparados com o perfil de resistência para a classe de tráfego obtida – LE 0,30 (indicada no Quadro 3.16), conforme ilustrado no Quadro 3.26.

Quadro 3.26 - Avaliação da resistência da camada para cada secção uniforme

Camada do pavimento (mm)	Valor DN necessário para LE 0.3	Valores DN - Percentil 80					
		Secção uniforme nº					
		1	2	3	4	5	6
0 - 150	$\leq 3,2$	5,0	3,1	3,6	6,6	3,1	5,6
150 - 300	≤ 6	7,8	3,9	5,2	10,0	3,5	5,8
300 - 450	≤ 12	10,0	6,0	8,6	9,4	6,2	6,3
450 - 600	≤ 19	10,5	8,2	12,0	14,8	7,5	13,2
600 - 800	≤ 25	11,3	8,1	17,2	18,4	9,4	13,8

Camada *in situ* adequada
Camada *in situ* inadequada

ii. Determinar os requisitos de melhoria

Após a avaliação da resistência exigida para a fundação, a melhoria foi determinada como indicado no Quadro 3.27, concluindo-se que será necessário, no mínimo, a adição de uma camada de base ao longo de toda a estrada. Na secção 4 será necessário para além da camada de base referida a adição de uma camada de sub-base, devendo os materiais cumprir o DN mínimo indicado. No Quadro 3.28 é apresentada uma correlação entre os valores de CBR e DN obtidos em laboratório.

Quadro 3.27 - Identificação das melhorias a implementar nas secções uniformes

Camada do pavimento (mm)	Valor DN necessário para LE 0.3	Valores DN - Percentil 80					
		Secção uniforme nº					
		1	2	3	4	5	6
0 - 150	$\leq 3,2$	3,2	3,1	3,2	3,2	3,1	3,2
150 - 300	≤ 6	5,0	3,9	3,6	6,0	3,5	5,6
300 - 450	≤ 12	7,8	6,0	5,2	10,0	6,2	5,8
450 - 600	≤ 19	10,0	8,2	8,6	9,4	7,5	6,3
600 - 800	≤ 25	10,5	8,1	12,0	14,8	9,4	13,2

	Necessário nova base com valor DN $\leq 3,2$
	Necessário nova sub-base com valor DN $\leq 6,0$
	Camada <i>in situ</i> adequada

Quadro 3.28 - Relação aproximada entre os valores da CBR e DN obtidos laboratorialmente com diferentes teores de humidade (adaptado de MTPW, 2013 b)

Classificação do material	VALORES CBR E DN / TEOR DE ÁGUA					
	Saturado		Teor ótimo de água		0,75 Teor ótimo de água	
	CBR	DN	CBR	DN	CBR	DN
NG80	80	3,7	95	3,2	150	2,2
NG65	65	4,5	90	3,8	145	2,5
NG45	45	5,7	70	4,2	110	3,0
NG30	30	8,0	60	4,7	95	3,2
NG25	25	9,1	55	5,0	85	3,5
NG15	15	14	50	5,4	80	3,6
NG10	10	19	35	7,0	60	4,6

NG – Natural Gravel – Cascalho natural
O procedimento para determinar o valor DN de um material é semelhante ao usado para o ensaio de CBR, mas utilizando o DCP para penetrar o material colocado no molde de CBR em vez do pistão do CBR

3.7.1.3 Método do catálogo Moçambicano

i. Classe de tráfego

A classe de tráfego é LE 0,30, a qual corresponde a um tráfego compreendido entre 0,1 e 0,3 milhões de ESA.

ii. Estrutura do pavimento

Tratando-se de uma zona climática húmida deverá ser usado o Quadro 3.17, considerando, ainda a classe de fundação S4 (8-14%), de onde resulta para a classe de tráfego referida a necessidade de incorporar duas camadas: 150 mm de G65 + 200 mm de G30 (características constantes no Quadro I 1 do Anexo I).

3.7.1.4 Método TRL/SADC (Gourley et al, 1999)**i. Classe de fundação**

A classe de fundação a considerar é a S4, conforme pode ser observado no Quadro 3.19.

ii. Classe de tráfego

Da análise do Quadro 3.20 resulta que a classe de tráfego correspondente será de 0,3 M para um tráfego compreendido entre 100.000 a 300.000 ESA.

iii. Estrutura do pavimento

Considera-se a utilização do Quadro II 1 do Anexo II, para $N < 4$, por se tratar de uma estrada em clima húmido e com largura da faixa revestida inferior a 7 metros. Resulta, assim, que a estrutura do pavimento a considerar é de uma camada de base com 175 mm de espessura ($\text{CBR} > 65\%$) e uma camada de base com 120 mm ($\text{CBR} > 30\%$).

3.7.1.5 Método SATCC**iv. Classe de fundação**

A classe de fundação a considerar é a S4 conforme pode ser observado no Quadro 3.11.

v. Classe de tráfego

Da análise do Quadro 3.10 resulta que a classe de tráfego correspondente será de T1 para um tráfego < 300.000 ESA.

vi. Estrutura do pavimento

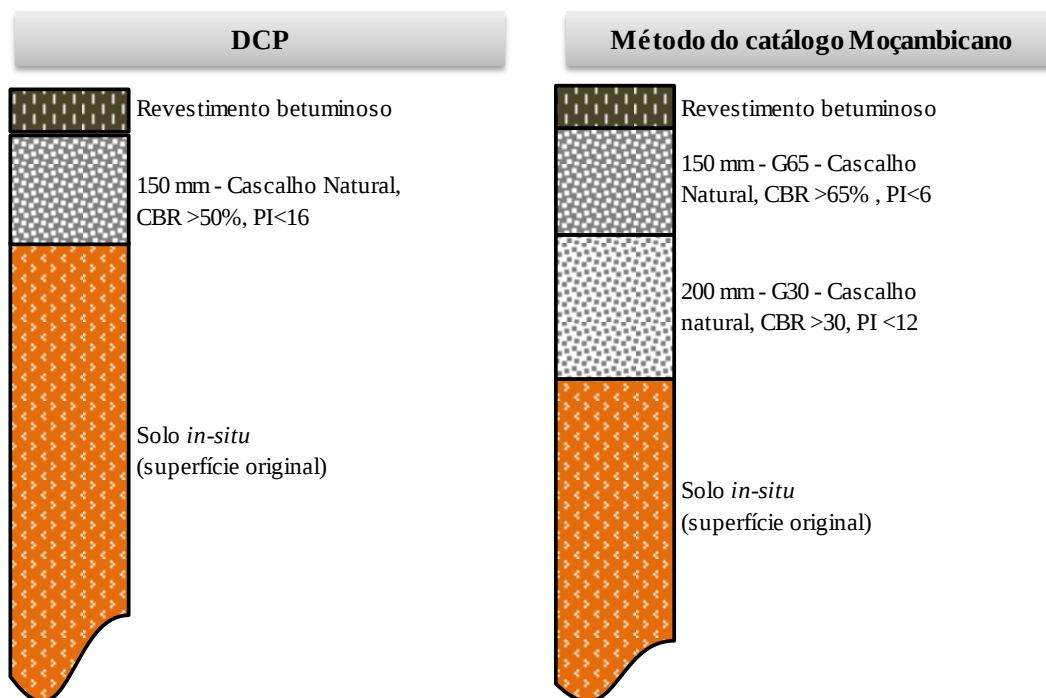
Considera-se a utilização do Gráfico W1 para regiões húmidas, para pavimentos com base e sub-base granulares (Anexo II – Quadro II 3), para $N < 4$, por se tratar de uma estrada em clima húmido e com largura da faixa revestida inferior a 7 metros. Os tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto são obtidas através do Quadro I 4. Resulta, assim, que a estrutura do pavimento a considerar é de uma camada de base com 150 mm de espessura ($\text{CBR} > 80\%$) e uma camada de base com 125 mm ($\text{CBR} > 30\%$).

3.7.1.6 Comparação da estrutura de Pavimento

Conforme descrito, foram comparados quatro métodos diferentes utilizados essencialmente em África nomeadamente: o Método DCP, o método do catálogo Moçambicano (ANE, 2014), o método TRL /SADC (Gourley et al, 1999), e o método SATCC (SATCC, 1998). A comparação foi feita para seção Uniforme 1 com uma classe de tráfego entre 0,10 e 0,30 milhões de CESA e um clima húmido).

As estruturas de pavimento determinadas, apesar da sua simplicidade, são representativas dos pavimentos dimensionados para a grande maioria das EBVT. Além disso, foi considerado um revestimento superficial, não com o intuito de influenciar a distribuição de tensões no pavimento, mas apenas para reduzir a penetração de água no pavimento e para melhorar o conforto dos utentes.

Os resultados apresentados na Figura 3.15, mostram uma redução clara do número de camadas exigidas pelo método de DCP sendo, consequentemente, o mais económico em termos da construção da estrutura inicial.



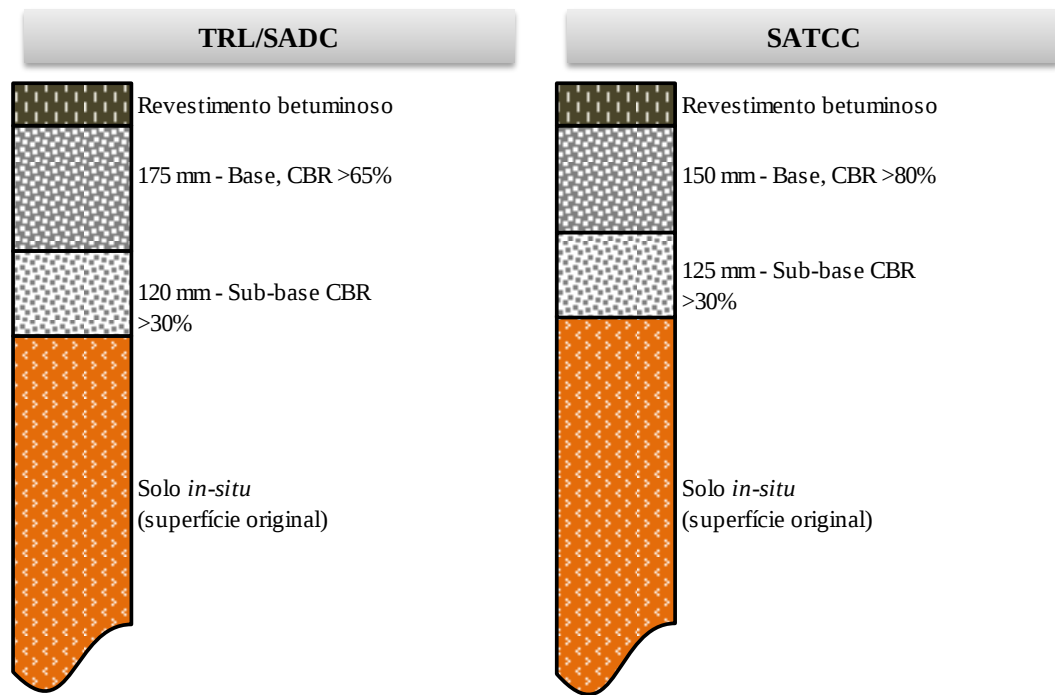


Figura 3.15 - Comparação das estruturas de pavimento obtidas com os diferentes métodos de dimensionamento

3.7.2 Estudo Paramétrico

Para os métodos utilizados no caso prático que se apresentou simularam-se 8 cenários, para comparação com o método do DCP, variando o CBR da fundação, o tráfego e o clima onde irá operar hipoteticamente o pavimento, no sentido de avaliar as diferenças nas propostas de estruturas de pavimento (Quadro 3.29).

Quadro 3.29 - Cenários utilizados no estudo paramétrico

	CBR da fundação	Tráfego (10 ⁶ ESA)	Clima
Caso 1	3%	0,04	Húmido
Caso 2	3%	0,04	Seco
Caso 3	3%	0,4	Húmido
Caso 4	3%	0,4	Seco
Caso 5	16%	0,2	Húmido
Caso 6	16%	0,2	Seco
Caso 7	16%	0,9	Húmido
Caso 8	16%	0,9	Seco

As estruturas de pavimento obtidas pela aplicação dos métodos referidos são apresentadas no Quadro 3.30, identificando-se, ainda, a caracterização do material em termos de CBR. No Anexo I são apresentados com mais detalhe os materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas.

Quadro 3.30 - Estruturas de pavimento obtidas no estudo paramétrico

	Método do Catálogo Moçambicano ¹	TRL/SADC ¹	SATCC ¹
Caso 1	150 G65 125 G30 150 G15	120 Base CBR 65 120 Sub-base CBR 30 120 Solos selecionados CBR 15	150 Base CBR 80 150 Sub-base CBR 30 200 Solos selecionados CBR 15
Caso 2	150 G65 120 G30 120 G15	120 Base CBR 65 120 Sub-base CBR 30 120 Solos selecionados CBR 15	150 Base CBR 80 150 Sub-base CBR 30 200 Solos selecionados CBR 15
Caso 3	175 G80 175 G30 175 G15	175 Base CBR 80 150 Sub-base CBR 30 150 Solos selecionados CBR 15	150 Base CBR 80 200 Sub-base CBR 30 200 Solos selecionados CBR 15
Caso 4	175 G80 150 G30 150 G15	175 Base CBR 80 150 Sub-base CBR 30 150 Solos selecionados CBR 15	150 Base CBR 80 200 Sub-base CBR 30 200 Solos selecionados CBR 15
Caso 5	150 G65 150 G30	120 Base CBR 55 120 Sub-base CBR 30	200 Base CBR 80
Caso 6	175 G65	150 Base CBR 55	200 Base CBR 80
Caso 7	175 G80 150 G30	200 Base CBR 65 120 Sub-base CBR 30	50 Mistura Betuminosa (*) 150 Base CBR 80 100 Sub-base CBR 30
Caso 8	175 G65	150 Base CBR 65 120 Sub-base CBR 30	150 Base CBR 80 100 Sub-base CBR 30

¹ Em todas as estruturas de pavimento apresentadas é contemplado um revestimento superficial.

* O método preconiza um revestimento com mistura betuminosa com 50 mm de espessura.

Da análise efetuada, conclui-se que:

- TRL/SADC – Para fundações mais fracas, como é o caso da fundação S2, a estrutura de pavimento é igual para cada classe de tráfego e é independente do clima ser seco ou húmido;
- SATCC – a classe de tráfego mais baixa engloba tráfego < 0,3 milhões de ESA, enquanto que 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, traduz-se, em regra, em estruturas de pavimento substancialmente mais espessas no SATCC comparativamente aos outros dois métodos;
- SATCC – Todas as estruturas de pavimento são idênticas para ambientes secos ou húmidos, com exceção dos casos 7 e 8, com classe de fundação S5 e tráfego de 0,9 milhões de ESA, nos quais para ambiente húmido se prevê a execução de uma camada de mistura betuminosa com 50 mm em vez de revestimento superficial;
- TRL/SADC – este método apresenta para a classe de fundação mais baixa estruturas de pavimento menos conservadoras.

Na Figura 3.16 comparam-se as estruturas de pavimentos obtidas para os cenários estudados no estudo paramétrico.

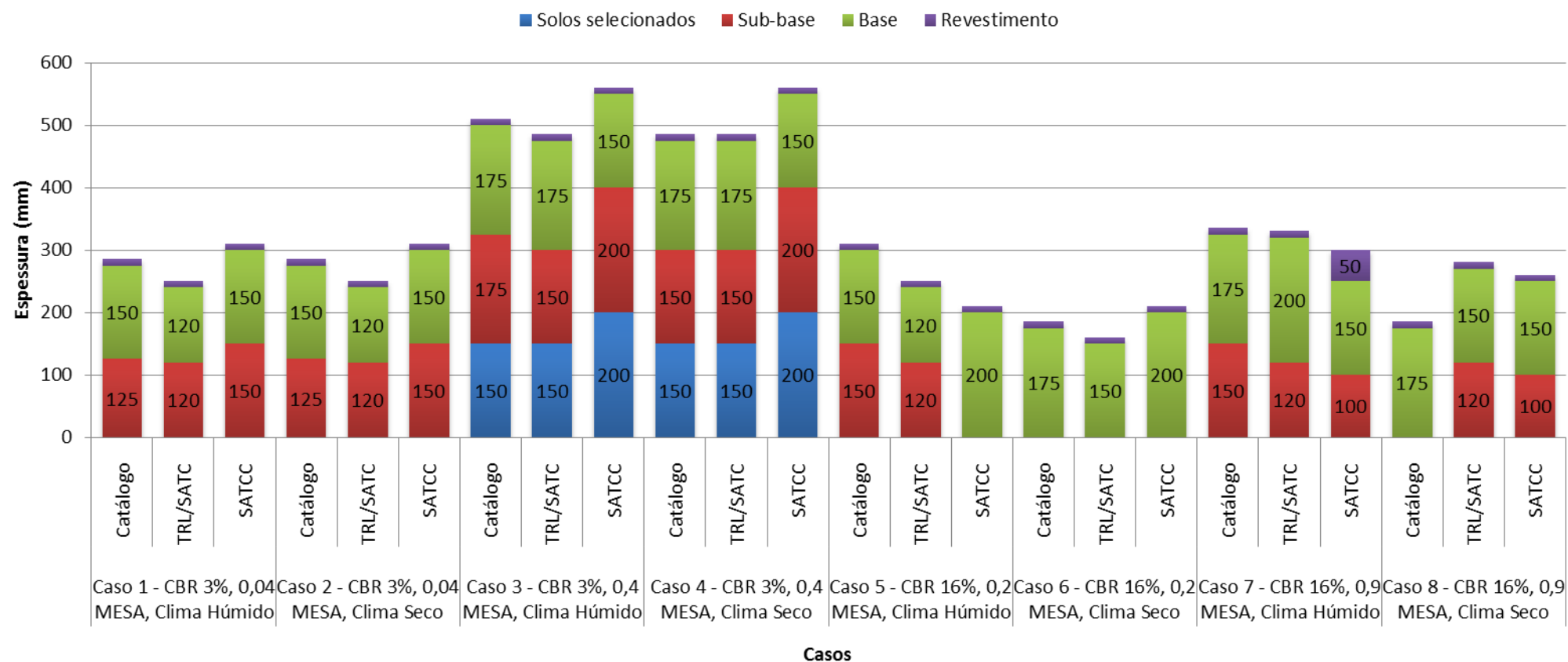


Figura 3.16 - Comparação das estruturas de pavimentos obtidas para os cenários estudados no estudo paramétrico

3.8 Principais conclusões

A densidade de estradas na maioria dos países, essencialmente nos africanos, é relativamente baixa e muitas EBVT são relativamente longas (mais de 25 km de extensão). As rotas alternativas são muitas vezes extensas, ou mesmo inexistentes, e as consequências da indisponibilidade são elevadas. É prudente, portanto, a adoção de requisitos de projeto que forneçam níveis adequados de fiabilidade e de serviço, compatíveis com as características funcionais da estrada.

O foco deste capítulo foi o de fornecer uma revisão sobre os guias de projeto para EBVT, juntamente com uma visão geral do funcionamento típico de uma EBVT. Salientam-se as seguintes conclusões deste capítulo:

- CBR – o *California Bearing Ratio*, embora sendo um parâmetro empírico, ainda permanece como o principal parâmetro de resistência de material para fins de dimensionamento. Estão disponíveis correlações com o DCP e existem vários métodos que fazem referência ao uso do DCP como uma ferramenta importante;
- As abordagens empírico-mecanicista estão a expandir a sua utilização, uma vez que os programas de computador estão mais disponíveis, alguns deles fazendo uso de anisotropia e não-linearidade do comportamento granular. A avaliação da deformação permanente permanece, no entanto, difícil de considerar do âmbito dessas abordagens;
- O guia PDG empírico-mecanicista *The Austroads Pavement Design Guide*, disponível para EBVT baseia-se no princípio de que é necessário proteger a fundação da deformação permanente, variando a espessura da camada de base. Isto é feito através da limitação das tensões verticais no topo da fundação;
- A camada superficial necessita de ter mais de 40 milímetros de espessura, a fim de degradar a carga e reduzir significativamente a tensão na parte inferior das camadas granulares. Contudo, nas EBVT não pavimentadas ou com pavimentos delgados, as tensões verticais tomam valores elevados na camada granular;
- No dimensionamento de pavimentos para EBVT os parâmetros de entrada devem ser determinados com os recursos à disposição das entidades gestoras da estrada, o que conduz à utilização de equipamentos simples, como o DCP, ou à avaliação das propriedades dos materiais com base no conhecimento de comportamentos típicos para cada tipo de material;
- O estudo paramétrico realizado mostra alguma variação entre as estruturas de pavimentos obtidas quando se utilizam diferentes métodos de dimensionamento. Pode, portanto, concluir-se que a experiência dos diferentes países, vertida para os métodos geralmente utilizados, conduz a níveis de risco diferentes, e a níveis de investimento iniciais também algo diferentes em alguns casos.

4 CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS DE EBVT

4.1 Enquadramento geral

É importante ter em conta que todas as estradas se deterioram ao longo do tempo devido aos efeitos do ambiente e do tráfego, requerendo necessariamente manutenção.

Fortunato et al (2013) identificam os benefícios de uma estratégia de conservação adequada:

- Aumento da vida útil do pavimento;
- As ligações rodoviárias, das quais o desenvolvimento económico e social depende muito, são preservadas;
- Redução dos custos de operação dos veículos;
- Manutenção das condições de segurança e fiabilidade da operação;
- Redução da poluição atmosférica e do ruído;
- Redução dos custos da conservação e reabilitação a longo prazo.

Os mesmos autores referem também as estratégias que são adotadas na conservação, conforme descrito no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Estratégias de conservação de pavimentos (adaptado de Fortunato et al, 2013)

Conservação de Pavimentos		
Estratégias	Preventiva	Operações de conservação que têm como objetivo retardar o aparecimento de degradações ou atrasar a sua progressão, quando estas já existem.
	Curativa	Operações de conservação destinadas a corrigir degradações já existentes no pavimento.

4.2 Avaliação de Pavimentos

O objetivo fundamental da avaliação de pavimentos é a obtenção dos dados necessários para a elaboração de projetos de manutenção, reabilitação e gestão de pavimentos, além de auxiliar na previsão de vida útil de pavimentos novos.

Na avaliação de pavimentos existentes, regra geral, são identificados quatro fatores: o estado atual de serviço, a adequação estrutural, as características da superfície ou área danificada, e a

segurança. A segurança é um fator claramente mensurável através da avaliação da aderência, da resistência ao atrito da superfície do pavimento e da severidade das rodeiras (Mota, 2009).

Por conseguinte, são consideradas duas formas de avaliação dos pavimentos: funcional e estrutural. A avaliação funcional considera o estado de serviço e desempenho do pavimento e procura avaliar fatores que refletem a visão dos utentes da estrada. A avaliação estrutural visa avaliar o comportamento mecânico da estrutura do pavimento e procura avaliá-lo na visão do projetista.

As características funcionais e estruturais de um pavimento devem ser avaliadas por procedimentos adequados às suas características, utilizando-se várias metodologias para levantamento dos defeitos que surgem na superfície dos pavimentos. Vários fatores, tais como o clima, a solicitação do tráfego, as características dos materiais e processos construtivos, atuando de forma isolada ou simultânea, são as causas destes defeitos. De um modo geral, estas metodologias visam:

- Avaliar as condições de superfície do pavimento relativas ao conforto e à segurança oferecidos aos utentes;
- Elaborar um inventário dos principais defeitos existentes na superfície dos pavimentos;
- Determinar por meio de medições, os fatores que causaram os defeitos na superfície dos pavimentos;
- Descrever e caracterizar os defeitos, identificando o tipo, a severidade e a densidade.

4.2.1 Avaliação funcional (Mota, 2009)

Mota (2009) descreve a avaliação funcional como uma análise preliminar e básica das características de degradação superficial e deformação do perfil do pavimento, e afirma que elas traduzem as condições de conforto e segurança do utente, podendo designar-se por estado de serviço do pavimento.

A avaliação do estado de serviço apoia-se num só índice para analisar qualitativamente o estado do pavimento. Este índice pode ser obtido atribuindo-se pesos aos parâmetros de estado, podendo resultar da combinação de diversos índices. Existem vários índices que se baseiam nesta metodologia, sendo o mais conhecido o PSI - *Present Serviceability Index* resultante de estudos da AASHTO, que tenta traduzir numericamente a opinião subjetiva dos utentes sobre o estado atual do pavimento, expressando-se a avaliação numa escala de 0 a 5, a qual varia desde muito mau até muito bom. Este índice reflete essencialmente a qualidade funcional de um pavimento e pode ser aplicado tanto a pavimentos flexíveis como a pavimentos rígidos.

As características funcionais são relativas às manifestações de degradações na superfície do pavimento, as quais podem ser divididas em degradações superficiais e irregularidade superficial. A degradação superficial pode ser avaliada de forma subjetiva, através de

inspeções visuais, ou quantificada de forma objetiva através da definição dos tipos de defeitos representativos.

A irregularidade é traduzida por desvios no sentido longitudinal ou transversal em relação a uma superfície de referência. Ganham destaque na avaliação da utilização da estrada no que diz respeito ao conforto, segurança e impacto no custo operacional dos veículos.

Os estudos desenvolvidos pela AASHTO indicaram que as informações sobre o estado de serviço dos pavimentos são traduzidas principalmente pelo nível de irregularidades do perfil da superfície do pavimento. No entanto, a percepção do efeito da irregularidade varia consoante as características dos veículos, da velocidade de circulação e da tolerância dos utentes (Mota, 2009).

Diversos fatores causam o aumento da irregularidade com o tempo, entre eles, a ação do tráfego, o meio ambiente (temperatura, água) e a qualidade da construção. Os movimentos e esforços indesejáveis gerados nos veículos pela irregularidade longitudinal levam a uma circulação desconfortável, insegura e antieconómica. A importância da irregularidade tem sido também reconhecida como forma de avaliação da qualidade de construção em pavimentos novos.

Dada a sua importância na percepção de conforto dos utentes, vários países adotaram índices de avaliação do estado de serviço baseados exclusivamente em medições de irregularidade. A irregularidade longitudinal é, quase sempre, utilizada como fator decisivo na estimativa da vida útil do pavimento. Atualmente a escala mais difundida, em vários países em desenvolvimento, para uniformizar a avaliação da irregularidade longitudinal do pavimento é o IRI - *International Roughness Index* (medido em mm/km).

O IRI por estabelecer uma escala internacional pode ser entendido em qualquer país. Porém, cada país estabelece o seu limite de aceitação para o valor do IRI, considerando além das condições específicas, o grau de importância atribuído pelos utentes à irregularidade aquando das avaliações dos pavimentos. Existem diferenças na tolerância em relação à adoção dos limites de aceitação para diferentes classes de estradas e também para a tomada de decisão de intervenções de reparação num pavimento.

Vários equipamentos foram desenvolvidos para medir a irregularidade, diferindo uns dos outros quanto às características, rendimento e eficiência do levantamento. A irregularidade pode ser avaliada por medidores de perfil, tais como: régua, régua deslizante, medidores do tipo resposta – SMITR, mecânicos ou baseados em acelerómetro ou através de perfilómetros laser.

4.2.2 Avaliação estrutural (Mota, 2009)

A avaliação estrutural de pavimentos é um procedimento no qual se pretende obter uma série de informações quanto às características mecânicas do pavimento e fundação, com o objetivo de prever o seu comportamento durante a sua vida útil, estando sujeito às solicitações do tráfego e aos efeitos do ambiente.

Avaliam-se as características de deformabilidade e resistência através de ensaios de carga, recolhas de amostras e ensaios de laboratórios. A avaliação possibilita a análise dos mecanismos de natureza estrutural que promovem a degradação do pavimento em consequência da ação do tráfego. Estes mecanismos podem ser principalmente de três tipos: fendilhamento por fadiga, reflexão de fendas ou acumulação de deformações permanentes.

Para a avaliação estrutural do pavimento poderemos recorrer a métodos destrutivos e não destrutivos.

4.2.2.1 Métodos destrutivos

Nos procedimentos destrutivos são efetuadas extrações *in situ*, através da abertura de poços de sondagem e de recolha de amostras, visando a determinação de características físicas dos materiais em laboratório. Podem ser identificados índices e parâmetros tais como: limites de *Atterberg*, granulometria, teor de humidade, tipo de material, capacidade de suporte, módulo de resiliência, entre outros. Os métodos destrutivos também permitem a verificação da espessura das camadas nos poços de sondagem.

Mota (2009), referindo a Nóbrega (2003), indica que a avaliação através de métodos destrutivos apresenta desvantagens, como o tempo necessário para a sua execução, a necessidade de implementação de medidas de segurança devido à existência de tráfego nos locais de recolha, e a dificuldade de reprodução em laboratório do estado de tensão e das condições ambientais existentes em camadas do pavimento *in situ*. Soma-se a estas considerações o facto do pavimento ficar descaracterizado para estudos futuros nos locais onde foram abertos os poços de sondagem.

4.2.2.2 Métodos não destrutivos

Outra forma de avaliar o comportamento estrutural do pavimento é através da utilização de ensaios não destrutivos, por medições na superfície do pavimento, a partir das quais, com adequada interpretação, poderá inferir-se o comportamento estrutural do pavimento quando submetido a um carregamento conhecido.

Uma das vantagens da avaliação estrutural por método não destrutivo é o facto das medições serem realizadas *in situ*, medindo assim, a resposta real da estrutura ao carregamento aplicado, sem que os materiais tenham as suas características alteradas. Outra vantagem é que as propriedades obtidas representam o comportamento médio dos materiais numa área considerável.

Os ensaios não destrutivos provocam menores interrupções no tráfego que os ensaios destrutivos, permitindo maior flexibilidade para avaliação quantitativa da condição estrutural do pavimento em qualquer fase da sua vida de serviço. A determinação dos módulos de deformabilidade das camadas de um pavimento por meio de ensaios não destrutivos permite que se façam avaliações da integridade estrutural das camadas, além de fornecer os dados de base para a aplicação de métodos mecanicistas de dimensionamento de reforço e análise estrutural do desempenho (Mota, 2009).

Nesta metodologia o projetista vale-se das respostas da estrutura a uma determinada solicitação de carga, para avaliar *in situ* o comportamento mecânico do pavimento. A resposta estrutural mais facilmente mensurável é a deflexão, a qual se traduz nos deslocamentos verticais da superfície e das camadas do pavimento gerados pela aplicação de um carregamento intermitente ou passageiro. Esta avaliação pode ser feita através do uso de vários equipamentos conhecidos como defletómetros.

A viga *Benkelman* é o equipamento mais divulgado e difundido. No entanto, foram desenvolvidos outros equipamentos com o objetivo de aumentar a precisão e o rendimento dos ensaios, aperfeiçoar a simulação das condições de carregamento do tráfego, simplificar e automatizar os métodos de ensaio.

a) *Viga Benkelman*

A viga *Benkelman* é um dispositivo mecânico que mede os deslocamentos verticais de um ponto de contacto no pavimento, entre as rodas duplas de um camião, sob um eixo de carga, com uma determinada pressão de pneus e uma carga pré estabelecida para esse eixo. Devido à simplicidade do procedimento de ensaio e ao baixo custo operacional, a utilização da viga *Benkelman* teve o seu uso bastante difundido.

b) *Falling Weight Deflectometer (FWD)*

O FWD é um equipamento que utiliza um impulso de carga para a medição da deflexão nos pavimentos. O princípio de funcionamento é caracterizado pela queda livre de um conjunto de pesos, de uma altura especificada, sobre um sistema que amortece e transfere a carga a uma placa circular apoiada no pavimento, causando deflexões que são automaticamente registadas por sensores (geofones) posicionados radialmente em relação ao centro da placa, na superfície do pavimento.

Este equipamento permite variações na magnitude do carregamento e da área de contato para melhor simular os efeitos das solicitações do tráfego. O FWD é indicado para utilização em quaisquer tipos de pavimentos.

Mota (2009) indica as vantagens, citadas por diversos autores, da utilização do equipamento FWD na medição de deflexões:

- A possibilidade de avaliar a não-linearidade no comportamento tensão-deformação das camadas do pavimento;
- Medir e registar automaticamente a distância entre os pontos de ensaio, assim como as temperaturas do ar e da superfície do pavimento.

4.3 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 (MAI, 2005):

- Manutenção de **rotina** – é necessária continuamente em todas as estradas, sejam quais forem as suas características ou volume de tráfego. 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. Como exemplos de atividades de manutenção de rotina podem indicar-se o corte de vegetação, a limpeza dos órgãos de drenagem, a regularização de valas, a reparação de elementos de controlo de erosão, a manutenção de aquedutos, a manutenção de sinalização e de outros equipamentos da estrada.
- 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. As atividades de manutenção recorrentes em estradas com pavimentos não revestidos incluem reparação de covas e sulcos, reperfilamento⁶ e regularização⁷. Em pavimentos revestidos inclui o tapamento de covas e a execução de reparações localizadas (remendos⁸), reparação de bermas e selagem de fendas.
- Manutenção **periódica** – é efetuada apenas com 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. A manutenção periódica em pavimentos não revestidos inclui recarga de material granular⁹. Em pavimentos revestidos inclui intervenções no revestimento superficial, recarga de bermas e marcação da superfície do pavimento.
- 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.

4.4 Degradações do Pavimento

Os defeitos de superfície do pavimento podem ser classificados em deterioração de superfície e deformação da superfície. Embora a deterioração da superfície esteja relacionada principalmente com a qualidade dos materiais de pavimentação e com a forma como estes respondem às condições meteorológicas ou solicitações do tráfego, as deformações da superfície pode ter causas combinadas devido tanto a tensões aplicadas no próprio material de

⁶*Grading* (terminologia anglo-saxónica), indicada em Fortunato et al (2013)

⁷*Dragging* (terminologia anglo-saxónica), indicada em Fortunato et al (2013)

⁸*Patching* (terminologia anglo-saxónica), indicada em Fortunato et al (2013)

⁹*Regravelling* (terminologia anglo-saxónica), indicada em Fortunato et al (2013)

revestimento, como devido a outros fatores, tais como a capacidade e estabilidade da fundação. Note-se que a existência de um sistema de drenagem adequado tem uma influência crucial no desempenho do pavimento em ambos os tipos de degradações.

Nos pontos seguintes serão descritas com maior detalhe as duas categorias de degradações, sendo também identificados e descritos os principais tipos de defeitos, e sugeridas soluções corretivas.

4.4.1 Deterioração da superfície

4.4.1.1 Poeira (MAI, 2005)

O controlo de poeira tem grande importância ao nível económico, ambiental, de segurança e da saúde. A poeira é causada pela perda de partículas finas a partir do revestimento dos pavimentos devido ao tráfego e às ações ambientais. A perda de finos aumenta a permeabilidade da superfície e diminui a coesão do material de revestimento ao mesmo tempo. Reduzindo-se a perda de finos aumenta-se a vida útil do revestimento, reduzindo, assim, a necessidade de manutenção.

A quantidade de poeira gerada a partir de uma superfície de pavimento depende de vários fatores, incluindo a velocidade do vento na superfície do pavimento causado pela quantidade e tipo de veículos, velocidades de circulação, granulometria do material superficial, capacidade para a retenção de finos e condições climáticas.

Em muitos casos, o pó pode ser reduzido em estradas com pavimentos não revestidos através da aplicação de aditivos químicos que atraem a humidade do ar para melhorar a coesão do agregado fino.

O uso de supressores de poeira deve ser condicionada por estudos preliminares realizados em laboratório, para determinar a afinidade do agente estabilizador com os agregados locais utilizados para pavimentação.

Uma solução a longo prazo para o problema de poeira em pavimentos granulares pode ser a utilização de um revestimento superficial betuminoso. Isto também melhora a qualidade da superfície de rodagem e protege o cascalho de danos adicionais.

A aplicação de aditivos químicos antipó em pavimentos de solo para melhorar a coesão dos finos pode ser uma solução cara, e não ser viável em solos coesivos, nos casos em que o produto não consegue penetrar no material e, ainda, nos casos em que a superfície “delgada” tratada pode ser removida facilmente pelo tráfego ou pelas chuvas logo após o processo de estabilização.

Um método alternativo que pode ser usado no caso dos solos argilosos é a estabilização com cal. A cal produz reações químicas com a argila e o resultado é um material com características mais próximas de solos granulares. A estabilização fornece, ainda, estabilidade a longo prazo, dado que as reações podem continuar durante anos após a aplicação,

dependendo da quantidade de cal utilizada. No entanto, este método ainda é caro e para EBVT com baixos orçamentos, a decisão de o utilizar deve ser cuidadosamente ponderada.

Uma forma alternativa de reduzir a poeira e os danos associados consiste na redução da velocidade de circulação. Uma vez que a redução de velocidade de circulação em estradas EBVT através da implementação de sinalização raramente é eficaz, podem ser alcançados melhores resultados através da instalação de obstáculos físicos redutores de velocidade.

4.4.1.2 Perda de agregados (MAI, 2005)

A perda de agregados manifesta-se com a formação de cordões compostos por agregado grosseiro, fora da zona de passagem dos rodados (Figura 4.1). 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. Também pode ocorrer em terrenos planos onde há falta de material fino, podendo ainda ser resultante duma deficiente composição inicial do material de pavimentação, no qual há falta de agregados de dimensão intermédia.

A desagregação pode ser corrigida por escarificação, com a adição de finos para melhorar a composição granulométrica da superfície. A correção da desagregação é um procedimento muito caro, uma vez que na maioria dos casos, apenas uma pequena parte do material perdido pode ser eficientemente recuperada.



Figura 4.1 - Estrada com desagregação (MAI, 2005)

4.4.1.3 Falta de aderência (MAI, 2005)

A falta de aderência superficial é causada quando a superfície do pavimento contém excesso de agregados finos plásticos (argila, silte argiloso ou finos calcários), comparativamente à proporção de agregados grosseiros (Figura 4.2). Todavia, refira-se que uma pequena quantidade de material fino plástico é muitas vezes benéfico, uma vez que contribui para a coesão dos materiais, tornando o conjunto menos permeável. Com tempo húmido, a superfície do pavimento torna-se escorregadia e pode tornar-se intransitável. A degradação provocada pelo tráfego pode reduzir a quantidade de agregados graúdos, desproporcionando a mistura original. Este problema pode ser corrigido através da mistura dos materiais finos da superfície com os agregados grosseiros através da escarificação, mistura, regularização e compactação do pavimento. Ocasionalmente, é necessário o transporte de agregado grosseiro adicional para garantir uma mistura adequada.



Figura 4.2 - Superfície escorregadia durante os períodos chuvosos (MAI, 2005).

4.4.2 Deformação da Superfície

4.4.2.1 Rodeiras (MAI, 2005)

Trata-se de um defeito caracterizado pela formação de depressões longitudinais ao longo da via, resultando na deformação permanente da camada devido a passagens sucessivas dos rodados (Figura 4.3). A baixa capacidade de suporte do material que constitui o pavimento, espessuras inadequadas, cargas excessivas, ou a ineficiência do sistema de drenagem e a falta de manutenção podem também estar na origem da formação de rodeiras.

No caso das estradas com pavimentos não revestidos, as rodeiras podem ser corrigidas pela adição de material de revestimento com granulometria adequada. A superfície deve ser escarificada, o material deve ser misturado, reperfilando-se a superfície nos casos mais graves.

Em pavimentos com revestimentos betuminosos as rodeiras com pequena expressão são tratadas através da selagem de fendas e/ou pela execução de um revestimento superficial. Se os sulcos forem superiores a 15 mm de profundidade devem ser corrigidos antes da aplicação do tratamento de superfície.

O desenvolvimento de rodeiras significativas e com ocorrência repetida pode ser causado por problemas mais profundos, tais como a existência de uma fundação deficiente. Estas zonas podem exigir tratamento mais extenso, como a execução de um sistema de drenagem e/ou a colocação de um geossintético na fundação sobre uma camada de material granular. Sempre que possível, o desvio do traçado pode ser uma solução muito mais barata para evitar áreas com ocorrência repetida de rodeiras.



Figura 4.3 - Rodeiras em estrada de pavimento de solo (MAI, 2005).

4.4.2.2 Ondulação (MAI, 2005)

A formação de ondulação ou cremalheiras consiste num defeito funcional traduzindo-se na formação de ondas na direção transversal, resultantes da passagem de veículos. Esta ondulação manifesta-se por uma série de saliências e depressões em toda a superfície do pavimento e é provocada por falta de coesão da superfície, ocorrendo em materiais pouco plásticos e na época seca. Estas condições são agravadas e reforçadas pela velocidade excessiva dos veículos e elevado volume de tráfego.

No caso em que os finos de superfície são segregados dos agregados mais grosseiros, a raspagem com teor de humidade adequado pode ser suficiente para reparar a superfície do pavimento. Quando o problema é causado pela perda de finos, a raspagem por si só não é recomendada. O problema é corrigido por escarificação da superfície enquanto húmida, voltando a misturar os materiais da superfície com finos adicionados, corrigindo a granulometria, regularizando e compactando a superfície.

Na Figura 4.4 é mostrado um exemplo de uma estrada rural na Roménia (*Arges*), onde apesar da adequação dos materiais de pavimentação, a superfície da estrada está ondulada, devido à elevada velocidade do tráfego, provavelmente causada por um traçado em reta e boa visibilidade (MAI, 2005).



Figura 4.4 - Estrada rural com ondulação (MAI, 2005)

4.4.2.3 Depressões (MAI, 2005)

Depressões são zonas baixas e localizadas, com um ou mais centímetros de profundidade, causadas por assentamento, teor de humidade excessivo e/ou drenagem inadequada. As depressões afetam áreas maiores que as covas, não devendo ser confundidas com estas.

A Figura 4.5 mostra uma estrada com depressões no pavimento de solo, originadas por um perfil transversal inadequado e ausência de drenagem.



Figura 4.5 - Depressões em estrada rural (MAI, 2005)

As depressões devem ser corrigidas, preenchendo-as com um agregado bem graduado, devendo, em seguida, proceder-se à escarificação e recompactação da superfície do pavimento. A execução de drenos ou a utilização de geossintéticos podem contribuir para melhorar a drenagem e evitar a recorrência.

4.4.2.4 Covas (MAI, 2005)

As covas são pequenas depressões na superfície do pavimento, com um ou mais centímetros de profundidade, que podem ser causados por excesso de humidade, drenagem deficiente, fundação fraca, agregado mal graduado, ou uma combinação destes fatores.

As covas podem ser corrigidas por reparações localizadas, designada por execução de remendos, através da adição de materiais bem graduados e posterior compactação e/ou através da correção da granulometria. Também podem ser necessários drenos junto destas áreas para drenar o pavimento. A reparação de covas deve ser realizada numa fase inicial de desenvolvimento, uma vez que quando estas ocorrem na superfície o processo de ruína do pavimento aumenta consideravelmente.



Figura 4.6 - Pavimento em cascalho com presença de covas na superfície (MAI, 2005)

4.4.2.5 Pontos fracos (MAI, 2005)

Pontos fracos são áreas da superfície do pavimento e/ou da fundação enfraquecidos por deficiências na drenagem. Estas áreas abatem sob a ação das cargas dos veículos e, quase sempre, originam um ou mais tipos de deformações da superfície. Estas áreas podem ser corrigidas através da melhoria das condições de drenagem ou substituição do material existente nas zonas enfraquecidas por material mais adequado.

A Figura 4.7 mostra uma estrada com pavimento de solo onde a falta de inclinação transversal e a ausência de drenagem motivaram a existência de pontos fracos.



Figura 4.7 - Pavimento de solo com ocorrência de pontos fracos (MAI, 2005)

4.5 Reperfilamento (MAI, 2005)

A principal operação na manutenção de estradas com pavimentos de solo ou de cascalho é o reperfilamento. O desempenho pode também ser levado a cabo com o objetivo de controlar o desenvolvimento de ondulação, sendo que a regularização ligeira de rotina também é levada a cabo por essa razão. A regularização é usada para remodelar a superfície do pavimento e para restaurar a sua curvatura correta, ou a sua inclinação transversal, garantindo uma superfície com boas características de drenagem superficial. A regularização pode ser combinada com o reforço de agregado para restaurar a espessura da camada de cascalho.

Quanto maior for a inclinação transversal da superfície de um pavimento, mais rápido é feito o escoamento da água que aí aflui e será menos provável que se torne esburacada ou lamacenta. Por razões de segurança e manutenção, a inclinação transversal dos pavimentos

não revestidos deve estar no intervalo entre 4% e 6%. Inclinações superiores tendem a aumentar a deterioração da superfície porque o fluxo de água aumenta a sua velocidade e lava os finos a partir da superfície. A faixa de rodagem também se torna escorregadia em tempo de chuva e os veículos tornam-se instáveis ao circularem sobre o pavimento. Com manutenção adequada do pavimento, uma inclinação de 4 a 6% é adequada para inibir a formação de buracos e outro tipo de desagregação da superfície. No caso de estradas com pavimentos revestidos, em geral, a utilização de uma inclinação transversal inferior, da ordem de 2% a 3% é suficiente (MAI, 2005).

O reperfilamento pode ser realizado por motoniveladoras (Figura 4.8), embora uma técnica mais económica seja a de usar niveladoras rebocadas por tratores, sendo possível atingir resultados idênticos.



Figura 4.8 - Manutenção de um pavimento granular com motoniveladora (MAI, 2005)

As operações de reperfilamento devem ser sempre realizadas no final do verão para garantir que o pavimento vai ficar com o perfil transversal correto para drenar a água durante o período das chuvas seguinte. Quando necessário, o reperfilamento deve ser realizado no final da primavera, de modo a que o teor de humidade do material de revestimento seja ainda suficientemente elevado para ajudar a operação de recompactação e evitar a perda de finos. Isto é particularmente importante quando é necessário o reperfilamento para remover rodeiras e covas. Escarificar a profundidade necessária para os remover vai resultar na produção de uma considerável perda de materiais e, quando as condições são secas, estes não podem ser recompactados sem a adição de grandes quantidades de água.

4.6 Regularização (MAI, 2005)

A regularização pode ser feita através de uma ação de raspagem regular, efetuada nos meses de verão, para atrasar a formação de ondulações nas estradas com pavimentos em solo ou granulares, removendo material solto da superfície. Esta ação não remove ondulações graves depois de se terem formado, nem restaura a inclinação transversal ou material perdido. Estes defeitos devem ser corrigidos por reperfilamento.

A frequência com que a regularização deve ser realizada depende do volume de tráfego, da taxa de desenvolvimento de ondulações e do tipo de solo. Uma estrada com 100 veículos por

dia pode ter de ser regularizada a cada duas semanas, usando lâminas metálicas conforme ilustrado na Figura 4.9. Uma raspagem provavelmente será necessária a cada 3 a 4 semanas para as estradas com 50 veículos por dia, e cada quatro a seis semanas para os níveis de tráfego de 25 veículos por dia (MAI, 2005).

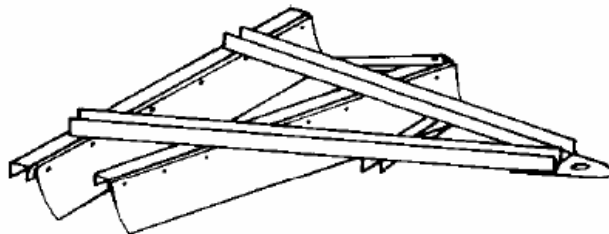


Figura 4.9 - Estrutura de raspagem munido de lâminas de motoniveladoras (MAI, 2005)

4.7 Recarga de Material Granular (MAI, 2005)

O material dos pavimentos granulares é desgastado pelo tráfego, erodido pela chuva e arrastado na forma de pó. Quando isso ocorre a fundação fica exposta, evidenciando rodeiras e depressões. Antes que todo o material seja perdido e a fundação fique danificada, o pavimento deve ser reforçado com agregado. O reforço também é usado para corrigir a perda de forma do perfil transversal, rodeiras, covas e linhas de erosão quando estas se tornam graves.

Antes da realização do reforço, é importante fazer todas as reparações ou melhorias necessárias no sistema de drenagem da estrada. Se isso não for feito, a nova superfície granular irá deteriorar-se muito rapidamente.

Segundo o *Maintenance manual for low cost Rural roads in Romania* (MAI, 2005), os materiais granulares de camada superficial devem satisfazer um equilíbrio em relação a dois grupos de requisitos um tanto contraditórios:

- Terem coesão suficiente para impedir a desagregação e ondulação (especialmente com tempo seco);
- A quantidade de partículas finas (especialmente finos plásticos) deve ser limitada, para evitar uma superfície escorregadia sob condições húmidas.

4.8 Preenchimentos e Remendos (MAI, 2005)

Os preenchimento e remendos são operações manuais que podem ser usadas para reparações na superfície onde os defeitos se desenvolvem em pequena escala e, por isso, o reperfilamento ou reforço de agregados não se justifica. Podem ser usados para reparar covas, rodeiras, pontos fracos ou trilhos de erosão, e podem ser realizados mesmo sem equipamento especial. Estas técnicas não são métodos satisfatórios para a reparação de ondulações, nem para os casos onde existe um número significativo de covas.

A qualidade do material utilizado deve ser a mesma do utilizado para as recargas de agregado. Além disso, devem ser selecionados materiais de permeabilidade semelhante à do material existente na profundidade em que se faz a reparação. Cada camada deve ser compactada com compactadores de mão ou com pequenos compactadores vibratórios (MAI, 2005).

4.9 Controle e supressão de pó (Henning et al, 2008)

Como se referiu, o pó pode contribuir para a degradação de produtos agrícolas, afetar a saúde, reduzir a segurança rodoviária, aumentar o desgaste dos veículos e resultar num aumento da taxa de deterioração do pavimento. A poeira é causada tanto pela perda de partículas finas (inferiores a 0,075 mm) resultando de um enfraquecimento dos materiais de pavimentação e da perturbação da camada de desgaste causada pela ação do tráfego e das condições climáticas.

A curto prazo, ou de modo sazonal, a supressão de poeira pode ser efetuada através da aplicação de produtos paliativos de poeira na superfície da estrada. As soluções de longo prazo poderão envolver quer o revestimento do pavimento, quer o uso de materiais com limites de plasticidade que garantam a coesão do material de desgaste, sem afetar a sua capacidade resistente e resistência à derrapagem.

No Quadro IV I, do Anexo IV, listam-se alguns dos produtos aditivos genéricos, com o potencial de aplicação para efeitos de controlo e supressão de poeira.

4.9.1 Paliativos de poeira

Muitos produtos foram testados e avaliados como paliativos de poeira. Destinam-se a estabilizar apenas a superfície em vez de todo o pavimento. Alguns têm-se revelado ineficazes, enquanto outros, como produtos de petróleo, podem ter efeitos ambientais adversos.

Os paliativos de poeira atuam como estabilizadores de superfície, proporcionando estabilidade dos materiais geralmente instáveis. Segundo Henning et al (2008), os paliativos apresentam as seguintes propriedades:

- Evitam o transporte aéreo das partículas;
- Melhoram a resistência ao desgaste produzido pelo tráfego;
- São retidos no pavimento, ou seja, não se perdem por evaporação ou lixiviação;
- Resistem ao envelhecimento;
- São compatíveis com o ambiente, ou seja, não têm impactes ambientais significativos;
- São facilmente aplicados com equipamentos comuns de manutenção de estradas;
- São trabalháveis e não prejudicam as operações de manutenção;
- Apresentam um custo competitivo.

As taxas de aplicação de paliativos de poeira dependem de uma série de fatores, incluindo o tipo de produto, o grau de controlo de poeira necessário, o tipo de superfície de desgaste, os volumes de tráfego, os tipos de veículos e velocidades praticadas, a frequência de manutenção e as condições climáticas.

Os procedimentos gerais para a aplicação de paliativos de poeira incluem o seguinte:

- Remover os defeitos de superfície, através de recarga com material granular, conforme necessário, assegurando uma secção transversal adequada e uma superfície compacta;
- Humedecer a superfície, exceto para o caso de produtos petrolíferos não emulsionados;
- Aplicação do paliativo de poeira uniformemente na superfície;
- Compactação leve com cilindro de pneus, no caso da utilização de cloretos, ou sulfonatos de lenhina como paliativos de poeira.

A via pode ser aberta ao tráfego imediatamente após a aplicação de cloretos. No entanto, outros produtos requerem tempo para garantir a absorção, pelo que a passagem do tráfego deve ser condicionada.

Os benefícios de controlo de poeira incluem o aumento dos períodos entre ações de regularização, a diminuição dos níveis de irregularidade da superfície e, consequentemente, a redução dos custos operacionais dos veículos e do número de acidentes, e o aumento da comodidade para os residentes nas proximidades da estrada. Embora o uso de paliativos de poeira seja comum em estradas até 500 veículos por dia, em geral, a expectativa de vida do tratamento diminui à medida que o volume de tráfego e a percentagem de camiões aumentam. Isto é particularmente verdade para os produtos que criam uma crosta superficial dura, como os sulfonatos de lenhina e a maioria dos produtos petrolíferos. Por conseguinte, uma análise de custos irá permitir decidir se a aplicação de uma camada de revestimento se torna num tratamento mais vantajoso.

A seleção do tipo de paliativos de poeira deve ser feita tendo em conta a quantidade de finos no material de superfície ou de fundação (quando não há nenhuma estrutura superficial), as condições climáticas e os volumes de tráfego. Como regra geral, o total de finos deve variar entre 10 a 20%, para proporcionar uma superfície densa e livre de material granular solto.

4.9.2 Inibidores químicos de poeira

Henning et al (2008), referindo Foley et al (1996), consideram que a maioria dos inibidores químicos de poeira são soluções de curto prazo. O comportamento e o desempenho destes aditivos são, na maioria dos casos, mal entendidos, o que leva à aplicação de alguns aditivos nos locais errados (para materiais inadequados), ou em condições ambientais erradas. Existem alguns produtos que foram submetidos a testes controlados - como os realizados na África Austral (Jones, 1999), e que tiveram um bom desempenho nas condições a que se destinavam.

Para uma análise mais detalhada sobre estes aditivos químicos poderá ser consultada a bibliografia indicada nesta secção.

4.10 Considerações finais

As EBVT são construídas com recursos e orçamentos relativamente limitados, para que a extensão de estradas construídas com os fundos disponíveis possa ser tão elevada quanto possível. No entanto, é fundamental conhecer as responsabilidades de manutenção dos ativos rodoviários sob os cuidados de uma autoridade ou organização, para que a manutenção possa ser planeada, financiada e implementada de forma oportuna. Se isso não for feito, haverá um risco elevado de rápida deterioração da estrada que pode levar à sua ruína e, desse modo, originar o desperdício dos investimentos feitos no momento da construção. Além disso, os custos globais aumentam porque ficam mais altos os custos de operação dos veículos, o acesso se torna deficiente ou inexistente e a manutenção acarreta custos acrescidos.

As EBVT com pavimentos sem revestimento geralmente têm uma superfície de circulação em solo ou material natural e requerem níveis relativamente altos de manutenção regular. Muitas vezes não há recursos suficientes ou capacidade para realizar ações de manutenção adequadas e, assim, os utentes e as comunidades sofrem as consequências da falta de acesso e/ou de elevados custos de transporte. É, portanto, cada vez mais importante incentivar o desenvolvimento de redes de estradas rurais de uma forma acessível e sustentável, utilizando de modo eficiente os recursos locais para fornecer infraestruturas de transporte de baixo custo.

5 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais

Estradas de baixo volume de tráfego (EBVT) são definidas como aquelas nas quais circulem menos de cerca de 400 veículos por dia e cerca de um número acumulado eixos padrão de 1 milhão ao longo da sua vida útil. Este tipo de estradas constitui uma proporção significativa da rede de estradas a nível mundial. Embora a abordagem ao projeto dessas estradas siga os princípios gerais de boas práticas de qualquer projeto de estradas, difere em vários aspetos das abordagens tradicionais, as quais são utilizadas para estradas com tráfego relativamente alto e constituído por uma maior proporção de veículos pesados. Em particular, para as EBVT os danos no pavimento são atribuíveis mais aos efeitos ambientais que ao tráfego que suportam.

Um sistema de EBVT bem planeado, localizado, projetado, construído e mantido é essencial para o desenvolvimento de muitas comunidades, garantindo o fluxo de bens e serviços entre as comunidades, sem pôr em causa os recursos naturais existentes. Os sistemas viários mal planeados podem ter altos custos de manutenção, contribuem para a erosão excessiva, e não conseguem atender às necessidades dos utentes.

Nesta dissertação, fez-se uma resenha das técnicas construtivas e dos materiais habitualmente utilizados em pavimentos de EBVT, incluindo uma descrição das técnicas de manutenção. Nas descrições efetuadas fez-se, sempre que considerado apropriado, uma análise crítica das soluções apresentadas.

As principais conclusões desta dissertação são resumidas a seguir:

- A maioria dos métodos atualmente utilizados para o projeto de pavimentos de EBVT não considera de maneira explícita o desenvolvimento de deformação permanente nas camadas granulares, permitindo dimensionar as camadas do pavimento, como forma de proteger a fundação evitando que, ela própria, desenvolva deformação permanente;
- O desenvolvimento de deformação permanente em pavimento de EBVT ocorre na forma de rodeiras. Estas são os principais modos de ruína destes pavimentos, e amplamente consequência da deformabilidade nas camadas do pavimento. Como as camadas granulares são tipicamente as camadas estruturalmente mais importantes nestas estruturas, é importante conhecer bem as suas características de deformabilidade na abordagem mecanicista de dimensionamento;
- As abordagens empírico-mecanicistas são de uso crescente dada a maior disponibilidade de programas de computador. A avaliação da deformação permanente,

no entanto, permanece fora do âmbito dos principais guias de dimensionamento de pavimentos para EBVT. Os guias disponíveis para EBVT procuram proteger a fundação da deformação permanente, através da variação da espessura da camada de base granular. Isto é feito através da limitação da tensão vertical no topo da fundação;

- Ferramentas simples como o DCP ou o Mini-FWD têm sido usadas como meio de avaliar a resistência *in-situ* dos materiais. Bem usados, eles podem representar uma grande vantagem para os procedimentos de dimensionamento de pavimentos para EBVT, os quais carecem de ferramentas prontamente disponíveis para a avaliação da resistência do material.

O desafio de um bom projeto de pavimento para uma EBVT é proporcionar um pavimento que é apropriado para o ambiente de estrada em que atua e cumpre sua função a um custo mínimo ao longo do seu ciclo de vida, mantendo um nível ideal de serviço. No entanto, uma manutenção atempada e adequada será necessário para assegurar que os pressupostos da fase de projeto são corretos e adequados para a vida de projeto.

A comparação de vários métodos de dimensionamento de pavimentos para EBVT mostrou que os pressupostos variam um pouco entre os métodos. A aplicação concreta de três métodos de dimensionamento a uma situação de projeto, e a realização de um estudo paramétrico permitiu concretizar melhor as diferenças. No estudo paramétrico analisou-se a influência de diferentes capacidades de carga da fundação, de diferentes tipos de clima (húmido e seco), e de diferentes níveis de solicitação de tráfego.

5.2 Prosseguimento de Trabalhos Futuros

Apresentam-se abaixo algumas recomendações para o desenvolvimento de procedimentos de dimensionamento de pavimentos para EBVT:

- Havendo falta considerável de ferramentas simples de avaliação *in situ* que poderão fornecer aos engenheiros uma melhor orientação atendendo às restrições de custo e de tempo, sugere-se que os guias de dimensionamento sejam complementados com orientações para o uso do DCP ou do mini- FWD como ferramentas para ajudar a avaliar a resistência *in situ* dos materiais;
- A incorporação de um catálogo de estruturas nos guias de dimensionamento poderá fornecer orientações importantes sobre as estruturas a adotar, ainda que provavelmente o referido catálogo tenha que ser feito regionalmente para atender às especificidades climáticas de cada região;
- Os procedimentos de cálculo deverão, tanto quanto possível, ser automatizados, a fim de produzir uma ferramenta simples e prontamente disponível.

Por todas estas razões, é importante investir em estudos que aumentem a capacidade de compreender melhor os fenómenos de degradação envolvidos nos pavimentos de EBVT, de modo a conseguir soluções adequadas e cada vez mais económicas.

5.3 Considerações Finais

Finalmente, considera-se que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos. Foi realizada uma ampla revisão bibliográfica. Por um lado, foi realizada uma síntese que retrata a realidade das estradas de baixo volume de tráfego, dando-se a conhecer as suas características, os materiais constituintes e as soluções disponíveis. Por outro lado, fez-se uma resenha do estado da arte no que diz respeito aos métodos de dimensionamento disponíveis, as suas vantagens e deficiências e, em particular, alguns aspetos que poderão ser melhorados.

Julga-se, assim, ter contribuído para que os tomadores de decisão e gestores de estradas tenham acesso ao conhecimento disponível sobre boas práticas no que respeita às opções de pavimentação, construção e manutenção de pavimentos de EBVT para que possam utilizar da melhor maneira os recursos limitados disponíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO, American Association of State Highway & Transportation Officials. Washington, DC.
- AASHTO (2001). *Guidelines for geometric design of very low-volume local roads*. AASHTO, American Association of State Highway & Transportation Officials. Washington, DC.
- ANE (2014). *Low Volume Rural Roads Manual Volume 1 - Planning and Design*. Administração Nacional de Estradas, Moçambique.
- Arnold, G. (2004). *Rutting of granular pavements*. Doctorate Thesis, University of Nottingham.
- ARRB (2000). *Unsealed roads manual: Guidelines to good practice*. Australian Road Research Board. ARRB Transport Research. Victoria, Australia.
- Austroads (1992). *Pavement design: a guide to the structural design of road pavements*. Sydney, Australia.
- Austroads (1995). *A guide to the structural design of road pavements*. Sydney, Australia.
- Austroads (2004). *Austroads pavement design guide*. Sydney, Australia.
- Austroads (2008). *Guide to pavement technology - Part 2: Pavement Structural Design*. AGPT02/08. Sydney, Australia.
- Austroads (2009). *Guide to pavement technology - Part 6: Unsealed pavements*. Sydney, Australia.
- Behak, L. (2013). *Análise estrutural de pavimentos de baixo volume de tráfego revestidos com solo modificado com cal considerando ensaios laboratoriais e monitoramento de trechos experimentais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- Brito, L.A.T., Dawson, A.R. (2007). *Método de dimensionamento para pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego*. XXI Congresso de Ensino e Pesquisa de Transportes britto, ANPET, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Brito, L.A.T., Graeff, A.G. (2009). *Métodos de Dimensionamento de Pavimentos – Metodologias e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurações*. Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre – CONCEP.

- Brito, L. A. T. (2011). *Design Methods for Low Volume Roads*. Thesis submitted to the University of Nottingham. The University of Nottingham.
- BS (1990). *Method for determination of aggregate impact value (AIV)*, Testing aggregates BS 812-112:1990. London, UK.
- Cook, J. R., Petts, R. C., Rolt, J. (2013) *Volume Rural Road Surfacing and Pavements*. Africa Community Access Programme (AFCAP).
- CSIR (1981). *The Mechanistic Design Method Used to Evaluate the Pavement Structures in the Catalogue of the Draft TRH 4 1980*. Technical Report RP/2/81. NITRR, CSIR, Pretoria.
- CSIR (1998). *SATCC – Draft – Code of Practice for the Rehabilitation of Road Pavements*. CSIR. Pretória.
- Dawson, A., Kolisoja, P., Vuorimies, N. (2005). *Permanent deformation behaviour of low volume roads in the northern periphery areas*. Proceedings of 7th Int. Conf. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim.
- Dawson, A., Kolisoja, P., Vuorimies, N., Saarenketo, T. (2007). *Design of low-volume pavements against rutting - a simplified approach*. Proceedings of Transportation Research Board Low Volume Roads Conference 2007, Austin.
- ERA (2011). *Design Manual For Low Volume Roads, Part A, Part B and Part C*. Ethiopian Roads Authority, Federal Democratic Republic of Ethiopia.
- FCE (2004). *The forestry civil engineering handbook*. Forestry Enterprise. Forestry Civil Engineering. UK.
- Foley, G., Cropley, S., Giummarra, G.J. (1996). *Road dust control techniques: Evaluation of chemical dust suppressants performance*. Special Report 54, ARRB Group. Victoria, Australia.
- Fortunato, E., Alves, E., Antunes, M. L., Freire, A. C. (2013). *Curso de Estradas de Baixo Volume de Tráfego*. LNEC, Lisboa.
- Gonzalez, A., Howard, A, De Carteret, R. (2010). *Cost Effective Structural Treatments for Rural Highways: Cemented Materials*. Austroads Project No. TT1359, Austroads Publication AP-T168-10, Austroads Ltd., pp. 174, Sydney.
- Gourley, C. S., Greening, P. A. K. (1999). *Performance of Low-volume Sealed Roads: Results and Recommendations from Studies in Southern Africa*. TRL Published Report PR/OSC/167/99. Crowthorne.
- Hall, K. D., Bettis, J. B. (2000). *Development of comprehensive low-volume pavement design procedures*. MBTC 1070, Final Report.
- Henning T. F. P., Giummarra G. J., Roux D. C. (2008). *The development of gravel deterioration models for adoption in a New Zealand gravel road management system*. Land Transport New Zealand. Research Report 348. New Zealand.

- Hudson, W. R., Meyer, A. H. (1997). *Guidelines for material requirements of low volume roads*. Simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego, Rio de Janeiro. v. 1. p. 12-28.
- Jones, D. (1999). *Interim guidelines on the use of Dustex as a road additive (2nd revision)*. CSIR. Confidential contract report: CR-2000/50. Pretoria: Division of Roads and Transport Technology, CSIR.
- Kleyn E G (1982). *Aspects of Pavement Evaluation and Design as Determined with the Aid of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)*. M.Eng. Thesis, University of Pretoria, Pretoria.
- Little, P. H. (1992). *The design of unsurfaced roads using geosynthetics*. Doctorate Thesis, University of Nottingham.
- MAI (2005). *Maintenance Manual For Low Cost Rural Roads In Romania*. Ministry of Administration and Interior, Roménia.
- Mitchell R. L., C. P. van der Merwe e Geel, H. K. (1975). *Standardised Flexible Pavement Design for Rural Roads with Light to Medium Traffic*. Ministry of Roads and Road Traffic, Rhodesia Government.
- Mota (2009). *Pavimento de baixo volume de tráfego: Estudo comparativo da vida útil estimada e após abertura ao tráfego*. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP, Ouro Preto.
- MRB (2013). *South Sudan low volume design manual, Volume 1*. Ministry of Roads and Bridges. Government of South Sudan.
- MTPW (2013 a). *Design Manual For Low Volume Sealed Roads*. Ministry of Transport and Public Works, Republic of Malawi.
- MTPW (2013 b). *Design Manual for Low Volume Sealed Roads Using the DCP Design Method*. Ministry of Transport and Public Works, Republic of Malawi.
- MW (1999). *Pavement and Materials Design Manual*. Ministry of Works. Tanzania.
- MWTC (1982). *Roads Design Manual*. Roads Department. Ministry of Works, Transport and Communications. Botswana.
- Nóbrega, E.S. (2003). *Comparação entre Métodos de Retroanálise em Pavimentos Asfálticos*. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Powell, M. J., Potter, J. F., Mathew, H. C. & Nunn, T. (1984). *The structural design of bituminous roads*. Laboratory report 1132 Transport and Research Laboratory.
- Saarenketo, T. (2007). *Design of low-volume pavements against rutting - a simplified approach*. Proceedings of Transportation Research Board Low Volume Roads Conference 2007, Austin.

- Sant'ana (2009). *Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SATCC (1998). *Code of Practice for the Design of Road Pavements (draft)*. Southern Africa Transport and Communications Commission, Maputo.
- SATCC (2003). *SADC Guideline on Low-volume Sealed Roads*. Southern Africa Transport and Communications Commission.
- Pinard M (2006). *Alternative Materials and Pavement Design Technologies for Low-volume Sealed Roads*. SSATP- Africa Transport Policy Program / World Bank Consultant, Ghana.
- Sweere, G. T. H. (1990). *Unbound granular bases for roads*. Doctorate Thesis, University of Delft.
- Thom, N. H. & Brown, S. F. (1987). *Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base*. Transportation Research Record, 1121, 50-56.
- TRL (1993). *A Guide to the Structural Design of Bitumen-Surfaced Roads in Tropical and sub-Tropical Climates*. Overseas Road Note 31. TRL, Crowthorne, Berkshire. (4th edition).
- WSDOT (1995). *Pavement Guide*. Washington State Department of Transportation, Olympia.
- Yoder, E. J., Witczak, M. W. (1975). *Principles of Pavement Design*. Wiley. New York.

ANEXOS

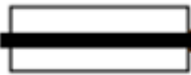
ANEXO I. Materiais de Pavimentação

Quadro I 1 - 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 ANE, 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

Quadro I 2 - Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto (Gourley et al, 1999)

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

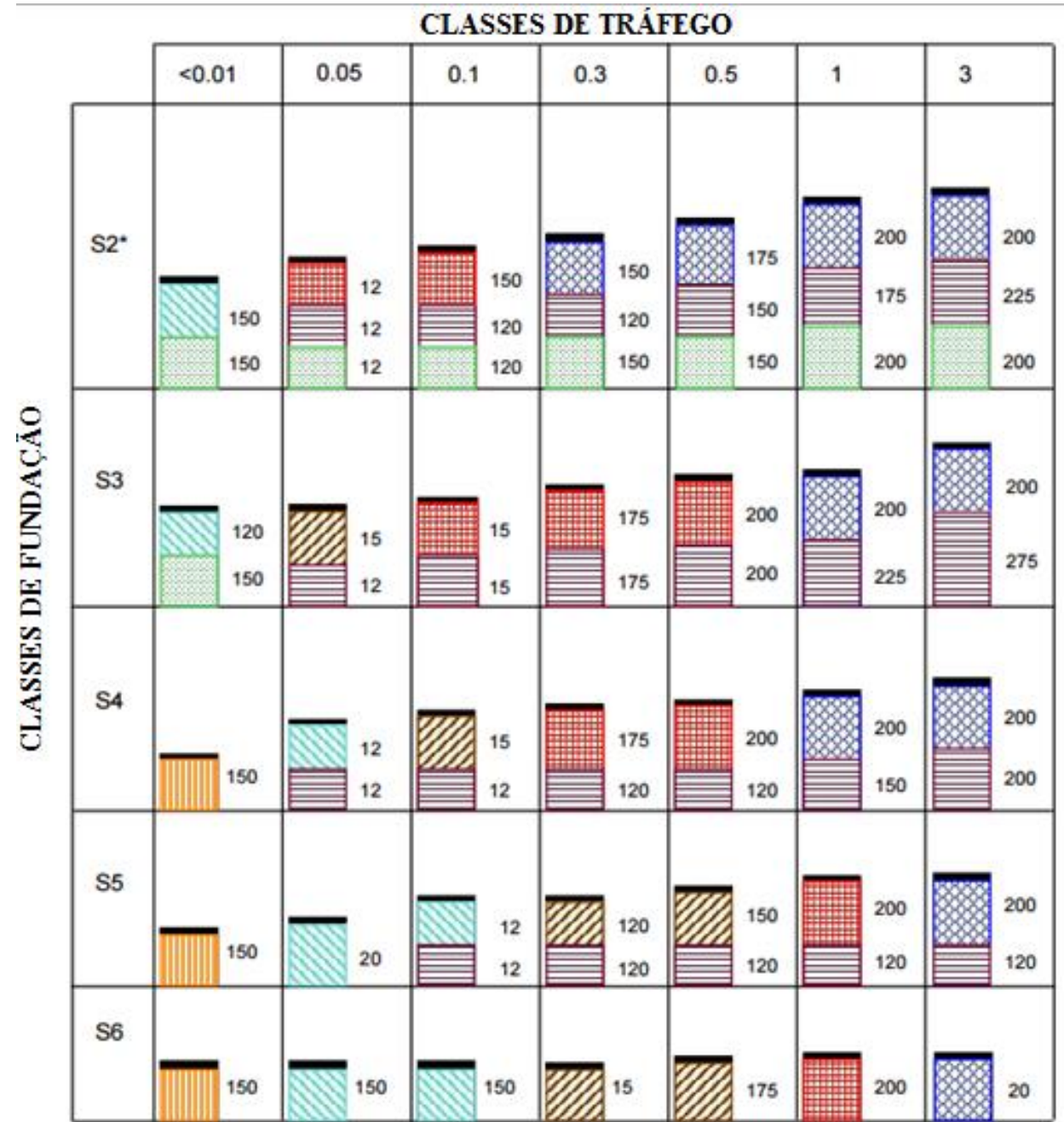
	Revestimento betuminoso
	Base, CBR 80
	Base, CBR 65
	Base, CBR 55
	Base, CBR 45
	Camada de Desgaste em cascalho
	Sub-base, CBR 30
	Solos selecionados, CBR 15

Quadro I 3 - Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais abreviadas utilizados nos gráficos de projeto (SATCC, 1998)

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

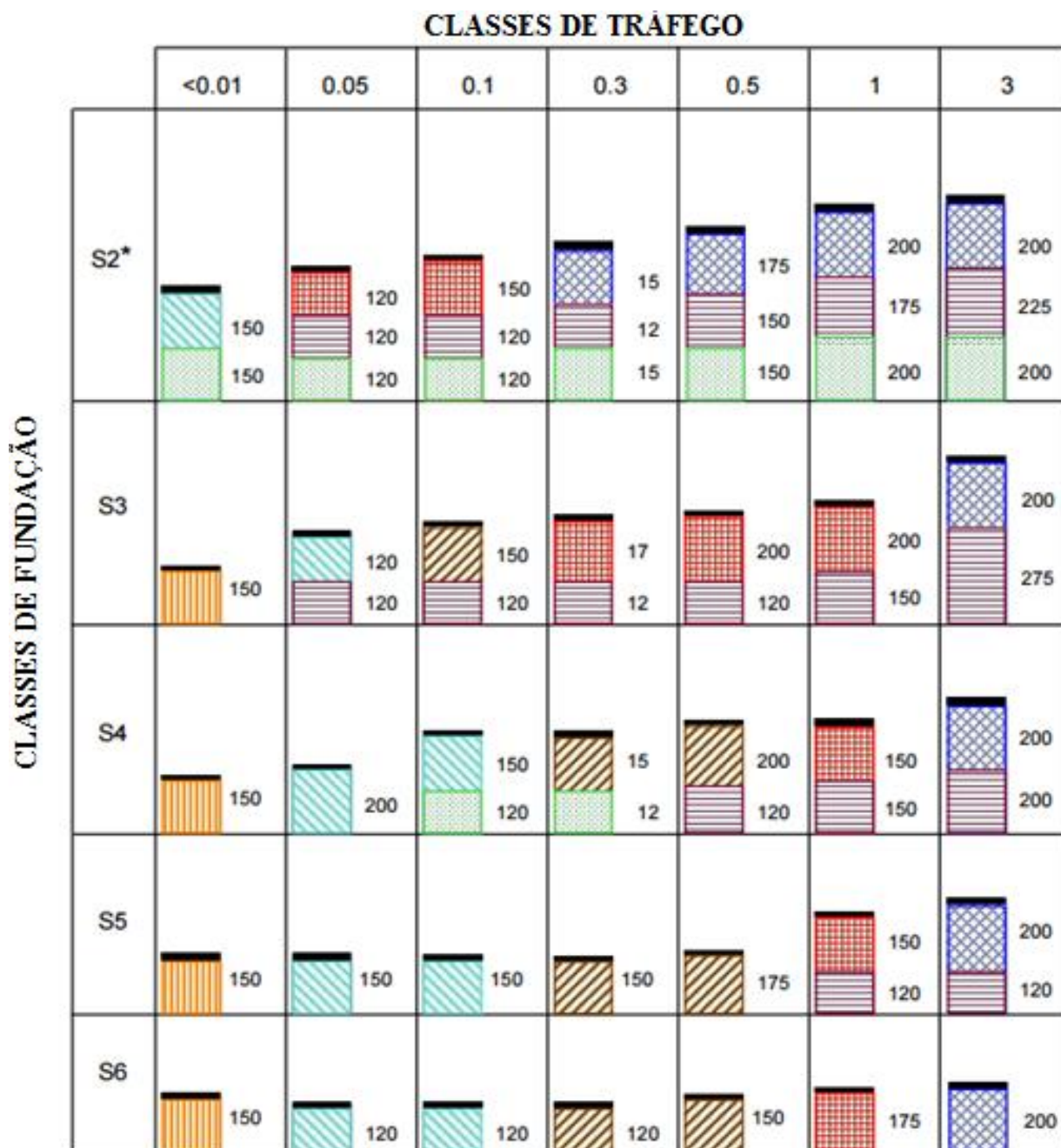
ANEXO II. Catálogos de projeto

Quadro II 1- Gráfico 1 - Estruturas consideradas para o dimensionamento de pavimento para N<4 (Gourley et al, 1999)



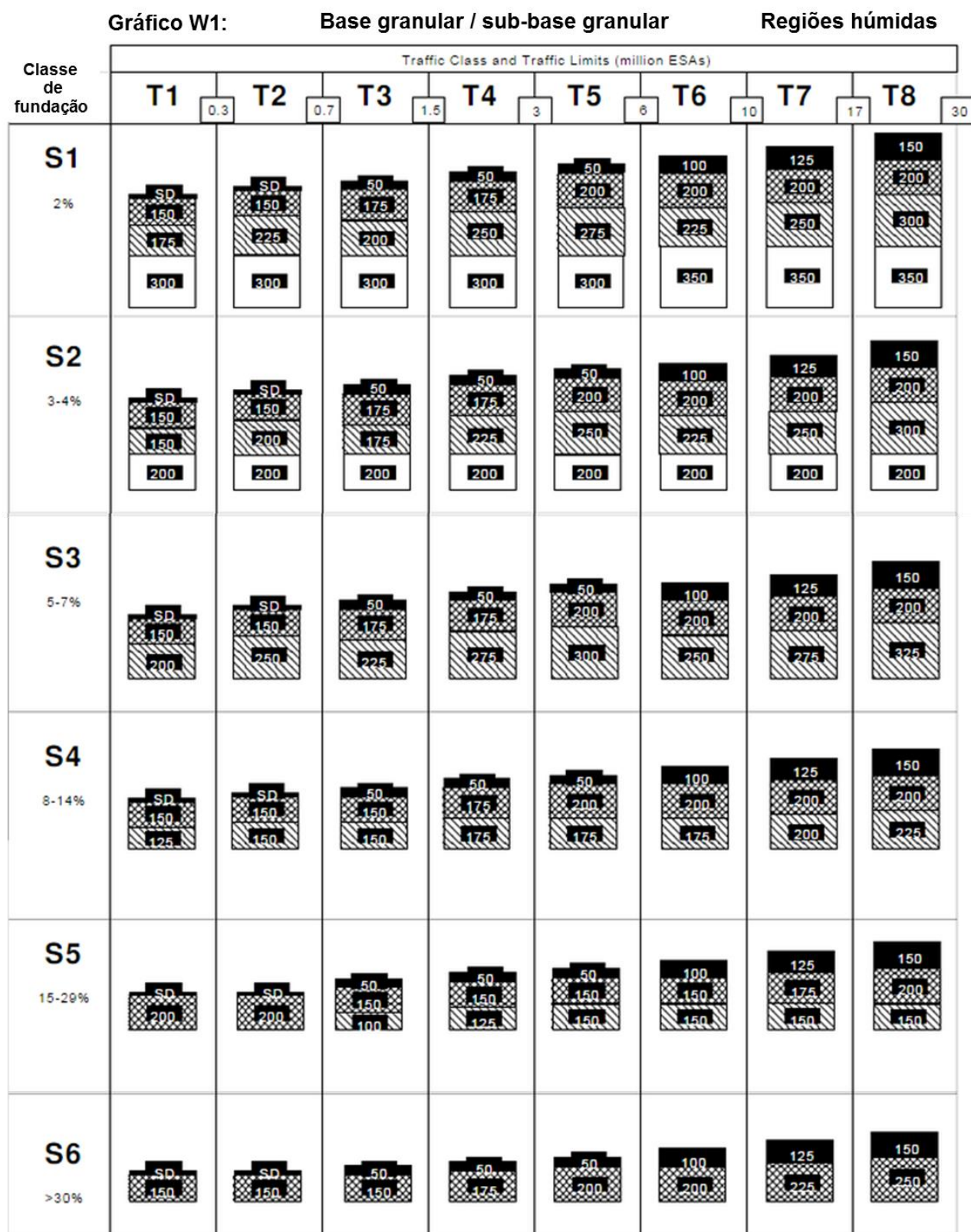
Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais identificados no Quadro I 2

Quadro II 2- Gráfico 2 - Estruturas consideradas para o dimensionamento de pavimentos para $N > 4$ (Gourley et al, 1999)



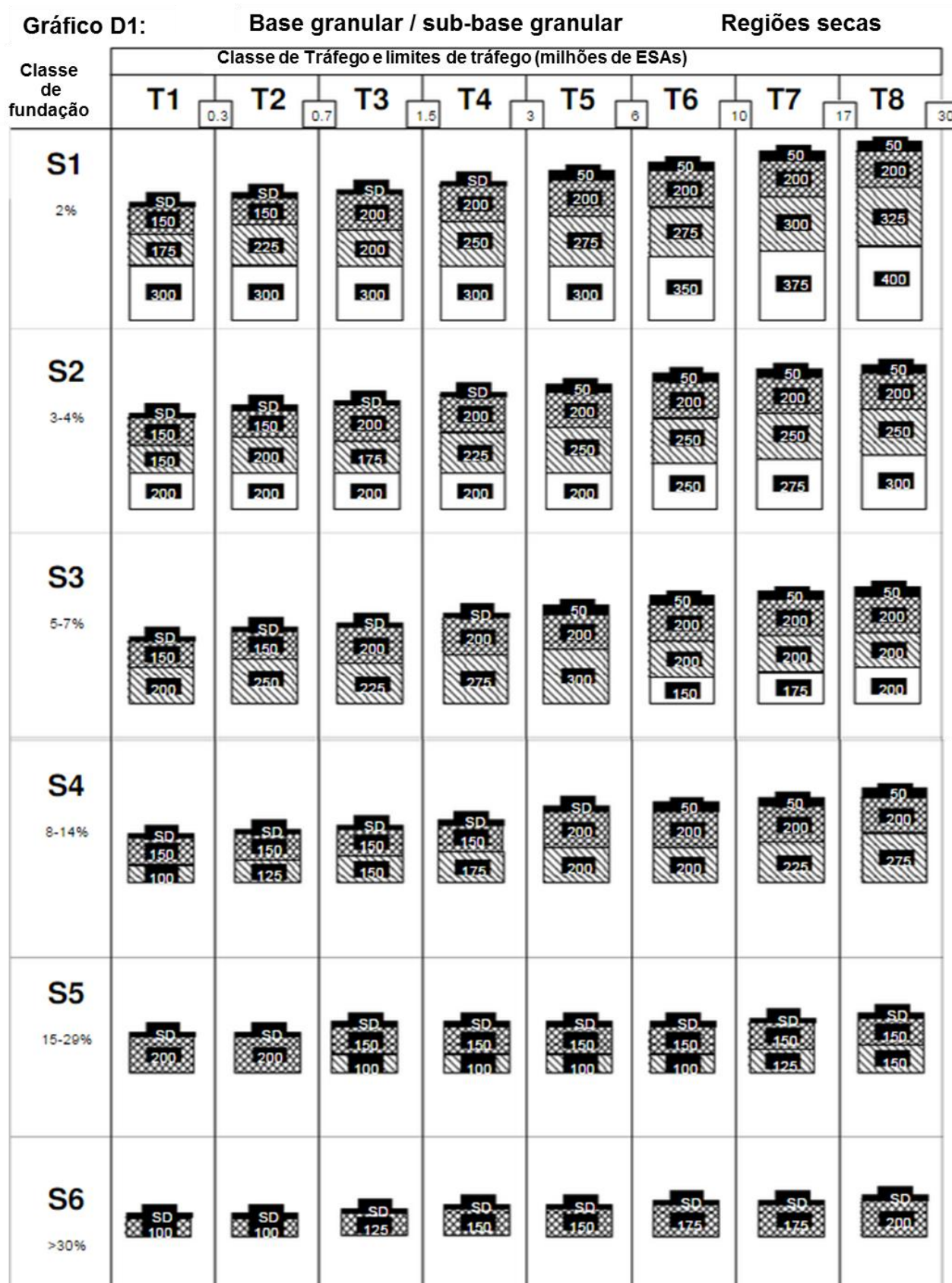
Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais identificados no Quadro I 2

Quadro II 3- Gráfico W1 para regiões húmidas (SATCC, 1998)



Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais identificados no Quadro I 3

Quadro II 4- Gráfico D1 para regiões secas (SATCC, 1998)



Tipos de materiais de pavimentação e especificações nominais identificados no Quadro I 3

ANEXO III. Fluxograma de dimensionamento do APDG

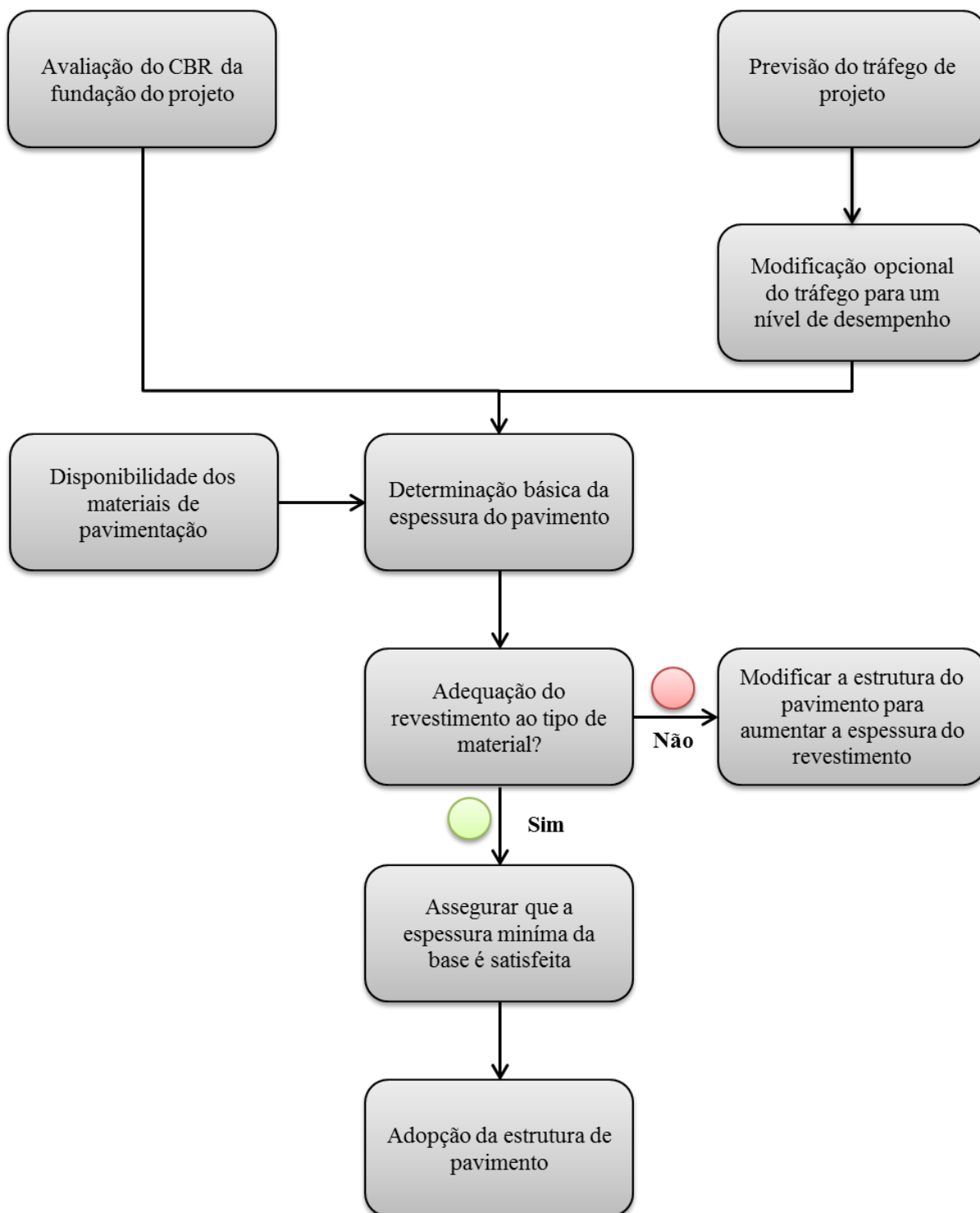


Figura III 1 - Sistema de projeto para pavimento flexível para pavimentos granulares com revestimento betuminoso delgado *Austroads* (1992) (adaptado de Brito, 2011)

ANEXO IV. Controle de poeira e Auxiliares de compactação

Quadro IV 1 – Paliativos de poeira e auxiliares de compactação e estabilizadores (adaptado de Henning et al, 2008; MAI, 2005)

Categoria	Efeito no material não revestido	Aplicação
Paliativos de poeira		
Agentes de humificação	Reduzem a tensão superficial, aumentando a humidade e melhorando a ligação com o solo. Detergentes são agentes de humificação típicos.	A ação dos agentes de superfície é tipicamente de curto prazo e precisam de ser aplicados regularmente, até mesmo diariamente. O seu uso é limitado e precisa de ser justificado por circunstâncias especiais. Algumas aplicações podem incluir estradas de minas e estaleiros de obras.
Argilas	A bentonite sódica é uma argila natural contendo uma elevada percentagem de montemorilonite.	Os resultados de ensaios indicam que, para o tratamento de longo prazo (2-3 anos), a bentonite é uma alternativa eficaz e menos dispendiosa que os tratamentos químicos em vias com revestimentos de agregados de calcário. No caso de revestimentos com agregados de rocha ígnea, uma vez que possuem carga elétrica negativa de superfície não é possível a aderência da bentonite. Pelo contrário, o calcário tem uma carga positiva, o que permite que a bentonite forme ligação e que haja aderência. Ao contrário de cloreto de cálcio e Sulfonato de lenhina, a bentonite é misturada com o material da superfície do pavimento aquando da aplicação e adere aos agregados como uma "cola eletroquímica." A eficácia da bentonite não é reduzida pela regularização da superfície ou por outras atividades de manutenção, tais como a aplicação de uma outra camada de agregado calcário.
Ceras modificadas	As ceras são fabricadas pela indústria petroquímica. Eles funcionam como um ligante do solo e podem expelir a água absorvida pelo solo e, ao fazer isso, há uma diminuição dos vazios de ar e um aumento da baridade.	O desempenho é uma função da estrada e da temperatura ambiente. Acima de 35 ° C, a cera torna-se mole e penetra no pavimento. Pode ser utilizado em conjunto com cloreto de cálcio e sulfonatos de lenhina para melhorar o desempenho em tempo de chuva.

Quadro IV 1 (continuação) – Paliativos de poeira e auxiliares de compactação e estabilizadores (adaptado de Henning et al, 2008; MAI, 2005)

Categoria	Efeito no material não revestido	Aplicação
Paliativos de poeira		
Sais / cloretos	Cloretos reduzem as forças de repulsão entre as partículas do solo pelo aumento do teor de humidade. Os cloretos tiram a humidade do ar, devido às suas propriedades hidróscópicas.	O cloreto de cálcio absorve o vapor de água do ar e da água, no estado líquido, a partir do leito do pavimento. A 25°C e 75% de humidade, por exemplo, ele absorve mais de duas vezes o seu peso em água. Além disso, soluções de cloreto de cálcio atraem mais humidade para o pavimento do que permitem que saia através da evaporação. O pavimento continua denso e compacto para qualquer nível de tráfego, porque o cloreto de cálcio mantém os materiais, mantendo a humidade no pavimento. O cloreto de cálcio é geralmente pulverizado como uma solução de 35%, com recurso a um camião cisterna com uma barra de distribuição montada na traseira que espalha o líquido uniformemente ao longo da estrada. Como a fonte da humidade é o ar, o requisito de base para o funcionamento eficaz destes tratamentos é um clima relativamente húmido. Nenhum dos cloretos são eficazes em zonas áridas. Tipicamente, cálcio e magnésio requerem pelo menos 30-40% de humidade, enquanto o sódio deixa de ser eficaz abaixo de 70% de humidade (ARRB, 2000). Consequentemente, o sódio é usado com menos frequência e é menos eficaz.
Polímeros naturais	São baseados em sulfonatos de lenhina que é um subproduto da moagem industrial de celulose, tornando a argila mais plástica com baixo teor de humidade. Os benefícios incluem o aumento da capacidade de carga, uma superfície de pavimento mais firme, sem cascalho solto, redução de poeira, redução de danos causados pela geada, e redução de custos na construção e manutenção.	Sulfonato de lenhina (<i>Lignin sulphonate</i>) é pulverizado sobre a superfície. Para uma melhor estabilização e controlo de poeira, é aconselhável a mistura com os centímetros iniciais de superfície do pavimento. É solúvel em água, ambientalmente adequado, fácil de manusear e aplicar, e com uma boa relação custo-eficácia. A superfície tratada ainda irá desenvolver buracos, tendo que ser prevista a raspagem e mistura da camada superior depois de alguns meses, mas os procedimentos de manutenção podem ser reduzidos significativamente. As áreas de aplicação incluem minas e estradas florestais. Estes produtos podem ser pulverizados ou misturados durante a construção.

Quadro IV 1 (continuação) – Paliativos de poeira e auxiliares de compactação e estabilizadores (adaptado de Henning et al, 2008; MAI, 2005)

Categoria	Efeito no material não revestido	Aplicação
Paliativos de poeira		
Resinas de petróleo	Eles são geralmente uma mistura de polímeros naturais e aditivos à base de petróleo. Algumas pesquisas têm sido realizadas nos Estados Unidos.	Tem o potencial como paliativos de pó e estabilizadores, mas o custo é relativamente elevado.
Betume e alcatrão	Aditivos de betume são muitas vezes um subproduto da petroquímica e da linha de produtos do fornecedor betume. Aplicações baseadas em alcatrão são um subproduto da indústria do carvão ou de destilados de combustíveis sintéticos.	Os produtos são pulverizados sobre o pavimento e, em alguns casos, misturados com a areia, que funciona de forma semelhante a um <i>sand seal</i> , podendo durar até três anos. O alcatrão pode ser aplicado de forma semelhante aos produtos betuminosos, mas alguns países proíbem o uso de produtos de alcatrão, devido a preocupações ambientais e de saúde.
Auxiliares de compactação e estabilizadores		
Emulsões de polímeros sintéticos	Dispersões de polímeros são suspensões de polímeros sintéticos. Muitas formulações foram desenvolvidas como aplicações de "condicionamento" do solo, potencialmente aplicáveis para controlo de poeira e estabilização de estradas sem revestimento.	As pesquisas mais documentadas têm origem no ramo agrícola. Apenas foram feitas pesquisas limitadas na área rodoviária.
Óleos sulfonados	Consistem em óleos minerais orgânicos de enxofre fortemente ácidos. Estes produtos foram desenvolvidos nos Estados Unidos durante a década de 60.	O processo de estabilização é complexo e dependente do material. Podem, também, melhorar a resistência de solos de alta plasticidade.
Enzimas e agentes biológicos	A maior parte destes tipos de produtos reduz a tensão superficial da água, atuando assim como um auxiliar de compactação. Algumas enzimas podem resultar numa ligação entre as partículas devido à cristalização.	Pouco material publicado sobre a aplicação desses tipos de materiais.