

isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**Proposta de Reabilitação do
Pavimento da Estrada da Serra da Leba
em Angola**

Autor

Euclides Costa Segundo Bengui

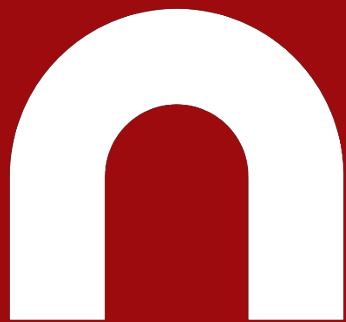
Orientador

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Abril de 2021



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**Proposta de Reabilitação do
Pavimento da Estrada da Serra da Leba em
Angola**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre
Em Engenharia civil

Especialidade em Construção Urbana

Autor

Euclides Costa Segundo Bengui

Orientador

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Abril de 2021

Agradecimentos

Com a finalização deste trabalho, resta-me apenas prestar os devidos agradecimentos e enorme reconhecimento a todas as pessoas e entidades que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho académico.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ser o detentor da vida e por me dar saúde e força todos os dias para a realização e finalização deste trabalho.

Em Segundo lugar, ao Professor Doutor Silvino Dias Capitão, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela excelente orientação, disponibilidade demonstrada, pela amizade e pelos conhecimentos facultados durante a minha formação. Agradeço pelos conselhos, fundamentais para a realização desta investigação, e por ter sempre uma palavra de ânimo perante os obstáculos encontrados.

Agradeço aos meus pais por acreditarem e tornarem possível os meus sonhos, agradeço aos meus irmãos pela força e por sempre darem uma palavra de motivação e encorajamento, aos meus tios (Olímpio, Ditomeni e Nelson) por serem incansáveis e darem sempre um apoio, ao Yohenny, Marcela, e Graciosa por terem aguentado este período de formação.

Agradeço aos meus colegas do mestrado, em especial ao Hugo e ao Pedro. Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, especialmente ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de desenvolver um projeto de carácter científico, e a todos os docentes com quem me cruzei durante todo o meu percurso académico e que contribuíram para a minha formação.

Não existem palavras para agradecer tudo o que fizeram e continuam a fazer por mim.

A todos, muitíssimo obrigado!

Euclides Costa Segundo Bengui

Coimbra, Abril de 2021

Resumo

A Serra da Leba é uma das estradas nacionais mais importantes de Angola, sendo património cultural e económico. A Serra local possui uma rica paisagem e serve de fronteira entre duas regiões distintas do país. Por ser um símbolo para os Angolanos, e ser tão importante, já foi usada como rosto da moeda Angolana. Essa importância estratégica leva a que seja de grande importância o estudo e a conservação deste património.

Após várias décadas da entrada em serviço, o pavimento da estrada da Serra da Leba tem vindo a apresentar diversas patologias devido às constantes solicitações, tanto climáticas como do tráfego, as quais contribuem para uma diminuição da qualidade das características mecânicas e funcionais do pavimento.

De forma a garantir-se a funcionalidade da infraestrutura, com uma boa qualidade global, é importante controlar as degradações no pavimento, avaliando a capacidade estrutural e funcional, de modo a facilitar o estabelecimento de políticas de reabilitação do pavimento quando necessárias.

No presente trabalho realiza-se um estudo sobre as patologias existentes na estrada da Leba, e faz-se um conjunto de análises relativas à estrutura de pavimento existente, com o objetivo de estudar propostas de soluções, de forma a reduzir o desenvolvimento futuro de degradações no pavimento.

Por escassez de informação para o estudo, recolheu-se alguma informação por inspeção visual direta da superfície do pavimento, a qual permitiu a simulação de diferentes cenários das condições atuais do pavimento. Esses cenários serviram de base às propostas de soluções de dimensionamento para uma estrutura nova e de reabilitação da existente. As análises efetuadas basearam-se em diferentes metodologias de dimensionamento de pavimento: a Norma 6.1-1C espanhola, o manual de conceção de pavimentos para a rede rodoviária nacional (portuguesa), o *software* Paviflex, o método da AASHTO 93, o método empírico-mecanicista da Shell, e o método de dimensionamento MeDiNa do Brasil.

Para os cenários simulados, verificou-se que o pavimento da estrada da Serra da Leba necessita de ser reforçado do ponto de vista estrutural. O método MeDiNa revelou-se mais conservador que o método da Shell. Além disso, propôs-se a implementação de algumas ações com o objetivo de monitorizar a evolução das patologias no pavimento. Com essa estratégia, poderá assegurar-se melhores condições de utilização da estrada no futuro, reduzindo também os custos associados à conservação da mesma

Palavras-Chave:

Pavimento Flexível; Reforço de Pavimento; Dimensionamento de Pavimento; MeDiNa.

Abstract

Serra da Leba is one of the most important national roads in Angola, being a cultural and economic heritage. The local Serra has a rich landscape and serves as a border between two distinct regions of the country. Because it is a symbol for Angolans and is so important, it has already been used as the Angolan currency's face. This strategic importance means that the study and maintenance of this heritage are of great importance.

After several decades of service, the Serra da Leba road's pavement has been presenting several pathologies due to constant demands, both climatic and traffic, which contribute to a decrease in the quality of the mechanical and functional characteristics of the pavement.

The assurance of the infrastructure's functionality, with excellent overall quality, is crucial to control the pavement's degradations, evaluating the structural and functional capacity, to facilitate the establishment of pavement rehabilitation policies when necessary.

In the present work, a study is carried out on the pathologies existing on the Leba road. A set of analyses is made regarding the existing pavement structure to study solutions to reduce degradations' future development.

Due to the study's lack of data, some information was collected by direct visual inspection of the pavement surface, which allowed the simulation of different scenarios of the current pavement conditions. These scenarios served as a basis for designing solutions for a new structure and the rehabilitation of the existing one. The analyzes carried out were based on different pavement design methodologies: the Spanish Standard 6.1-1C, the pavement design manual for the national (Portuguese) road network, the Paviflex software, the AASHTO 93 method, the Shell's empirical-mechanist method, and the Brazilian MeDiNa design method.

For the simulated scenarios, it was found that the pavement of the Serra da Leba road needs to be reinforced from a structural point of view. The MeDiNa method proved to be more conservative than the Shell method. It was also proposed to implement some actions to monitor the evolution of pathologies on the pavement. With this strategy, better conditions for using the road in the future may be ensured while also reducing the costs associated with maintaining it.

Keywords:

Flexible pavements; Pavement Reinforcement; Pavement design; MeDiNa.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento Temático.....	1
1.2 Objetivos e metodologias	2
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2. Características Gerais dos Pavimentos Rodoviários	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Classificação dos Pavimentos.....	6
2.2.1 Nota introdutória	6
2.2.2 Pavimento Flexível.....	8
- Materiais Granulares e suas Propriedades.....	9
- Misturas betuminosas e suas Propriedades	9
2.3 Patologias de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	10
- Deformações.....	13
- Fendilhamento	14
- Desagregação da Camada de Desgaste	16
- Movimento de Materiais	17
- Outras Degradações.....	18
2.4 Conservação e Reabilitação de Pavimentos	19
2.4.1 Generalidades	19
2.4.2 Técnicas de Conservação.....	19
2.4.3 Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais	20
- Reparação Localizada	22
2.4.4 Técnica de Reabilitação das Características Estruturais.....	23
2.5 Gestão de Pavimentos.....	24
2.5.1- Generalidades	24
- Índices de Qualidade do Pavimento (PCI)	26
2.5.2 Características Essenciais dum Sistema de Gestão	27
2.5.3 Equipamentos de Observação de Pavimentos	29
3. Informações Sobre a Estrada da Serra da Leba	31

3.1 Descrição Geral.....	31
3.1.1. Ligação entre a Huíla e Namibe.....	32
3.1.2 Portagem	32
3.1.3 Tráfego	33
3.1.4 Construção e Ações de Conservação	33
3.2 Descrição do Pavimento.....	34
3.2.1 Constituição do Pavimento	34
3.2.2 Patologias do Pavimento	35
3.3 Condições climáticas - Temperatura e Precipitação	37
4. Conceção e Dimensionamento de Estruturas de Pavimento para a estrada da Leba	40
4.1 Características do Tráfego	40
4.2 Temperatura de Serviço	43
4.3. Pré-dimensionamento da Estrutura de Pavimento por Diferentes Métodos	45
4.3.1 Catálogo Espanhol	45
- Tráfego.....	45
- Fundação.....	45
- Seleção do Tipo de Estrutura de Pavimento	46
4.3.2 Manual de Conceção de Pavimentos Português - MACOPAV	47
- Tráfego.....	47
- Fundação.....	47
- Seleção do Tipo de Estrutura de Pavimento	48
4.3.3 Utilização do Software Paviflex	48
- Temperatura.....	49
- Tráfego.....	50
- Fundação e características do pavimento	51
- Dimensionamento e seleção da estrutura de pavimento	52
4.3.4 Método da AASHTO 93	53
- Cenário de dimensionamento	54
- Parâmetros de Projeto	55
- Tráfego.....	56
- Estrutura do Pavimento.....	56
4.3.5 Comparação das Estruturas Pré-dimensionadas por Diferentes Metodologias	58

4.4 Dimensionamento Empírico-Mecanicista pelo Método da Shell	59
- Módulos de Deformabilidade	62
4.5 Método de Dimensionamento Empírico-Mecanicista MeDiNa	64
- Interface do Software MeDiNa e processo de dimensionamento	65
- Definição da Estrutura do Pavimento no Software MeDiNa	66
- Materiais e Suas Propriedades.....	67
- Definição do Tráfego e do Tipo de Via.....	70
- Dimensionamento de Pavimentos – MeDiNa	72
- Análise e Relatório do Dimensionamento do Pavimento.....	74
4.6 Avaliação da Capacidade de Carga	75
- Método da Shell	75
4.7 Dimensionamento do reforço	76
- Método das espessuras efetivas do Asphalt Institute	76
- Método Baseado nas Deflexões Reversíveis e Fatores de Carga.....	79
- Dimensionamento do Reforço - MeDiNa	82
4.8 Comparação de Estruturas novas e com reforço – Métodos Mecanicistas.....	85
4.9 Propostas de Ações de Monitorização e Acompanhamento do Estado de Conservação do Pavimento da Estrada da Serra da Leba	87
5. Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros	89
Referências	91

Índice de Figuras

Figura 2.1 constituição de um pavimento (Costa, 2012).....	7
Figura 2.2 Pavimento submetido a ações (Branco, Pereira, & Santos, 2011).	11
Figura 2.3 Interação e sequência entre as degradações	13
Figura 2.4 Pele de crocodilo – Serra da Leba.....	14
Figura 2.5 Representação das dimensões dos blocos quebrados (Transportation, 2014).....	15
Figura 2.6 Exsudação – Serra da Leba	18
Figura 2.7 Reparação no Pavimento- Serra da Leba	18
Figura 2.8 <i>Raveling</i> - Desgaste da superfície – Serra da Leba	19
Figura 2.9 Aplicação da mistura a frio após a abertura de vala para infraestrutura - a) no primeiro dia; b) após 60 dias (HABILFIX, 2016).....	22
Figura 2.10 Estado do pavimento - modelo probabilístico (Santos L. d., S/D).....	25
Figura 2.11 Índice de classificação do estado do pavimento	26
Figura 2.12 Estrutura de um sistema de gestão de pavimentos (Santos L. d., S/D).....	28
Figura 2.13 – a) Sistema informático VIZIROAD e teclados de apoio b) Aspectos dos teclados para registo das degradações (Santos L. d., S/D).	29
Figura 2.14 Método <i>Crack-Tree</i> - Para deteção automática de fendas (Zou, Cao, Li, Mao, & Wang, 2011).	30
Figura 3.1 – Serra da Leba : a) serra antes da abertura da via ; b) serra depois da abertura da via. (Sá, s.d.).....	32
Figura 3.2 – Mapa topográfico da região da serra da Leba (SGA, 2019)	32
Figura 3.3 – Portagem na serra da Leba saída da Huíla- a) Veículo ligeiro; b) veículo pesado.	33
Figura 3.4- Trabalhos de conservação na Serra da Leba (INEA, s.d.)	34
Figura 3.5- Rodeira no pavimento da estrada da serra da Leba	35
Figura 3.6- Pele de crocodilo de malha estreita – Estrada da serra da Leba.	35
Figura 3.7- Desagregação da camada de desgaste (Pelada) – serra da Leba.....	36
Figura 3.8- Serra da Leba: a) Deslizamento de materiais; b) Deformação da encosta que afeta o pavimento	36
Figura 3.9-Variação da temperatura média ao longo do ano no município da Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).....	38

Figura 3.10- Gráfico-Variação da precipitação media ao longo do ano no município da Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).	38
Figura 3.11- Variação da temperatura media ao longo do ano no município da Caraculo (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).	39
Figura 3.12- Gráfico-Variação da precipitação media ao longo do ano no município da Caracule (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).	39
Figura 4.1- Veículos com diferentes cargas e pesos na serra da Leba.....	41
Figura 4.2- Vistas do posto de pesagem de veículos localizado na Província da Huíla	41
Figura 4.3 – Ábaco para a determinação da temperatura de serviço (Shell, 1977)	44
Figura 4.4 Localização geográfica da estrada para consideração da temperatura de serviço..	49
Figura 4.5 Comparação das temperaturas médias máximas entre a cidade de Faro e Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).	50
Figura 4.6 Janela de introdução das características do tráfego no Paviflex.....	51
Figura 4.7 Opções para a escolha do tipo de pavimento- Pavimento de base betuminosa.....	51
Figura 4.8 Ecrã de escolha do método de dimensionamento no Paviflex.....	52
Figura 4.9 Dimensionamento do pavimento de base betuminosa no Paviflex	53
Figura 4.10- Caixa de diálogo introdutória da plataforma PAVEXPress	54
Figura 4.11 Comparação das temperaturas médias máximas mensais entre a cidade de Los Angeles, San Diego e Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).....	55
Figura 4.12 Variação indicativa do PSI do pavimento com o tempo (PAVEInstruct, 2018). .	56
Figura 4.13 Introdução dos parâmetros de projeto na plataforma da PAVEXPress.....	56
Figura 4.14 Introdução de dados de tráfego na plataforma da PAVEXPress	56
Figura 4.15 Camadas do pavimento (PAVEInstruct, 2018)	57
Figura 4.16 Definição das características da sub-base granular	57
Figura 4.17 Estrutura de pavimento dimensionado para a estrada da serra da Leba pelo método da AASHTO 93.....	58
Figura 4.18 Estruturas propostas por diferentes manuais com sub-base granular e base betuminosa	58
.....	59
Figura 4.19 Estruturas propostas por diferentes manuais com a sub-base em solo-cimento...	59
Figura 4.20 Ecrã de entrada do <i>software</i> MeDiNa.....	66
Figura 4.21 Estrutura do Pavimento de 17 cm da estrada da Serra da Leba no <i>software</i> MeDiNa.	67
Figura 4.22 – Janela propriedades dos materiais betuminosos - MeDiNa.....	67

Figura 4.23 – Classificação das misturas betuminosas em relação ao desempenho à fadiga – MeDiNa, (Fritzen, Franco, Nascimento, Motta, & Ubaldo., S/D).	69
Figura 4.24 – Pontos do pavimento onde se calcula a deformação permanente MeDiNa,	70
Figura 4.25 - Cálculo do fator de veículos pelo MeDiNa	71
Figura 4.26 - Estrutura inicial do pavimento de 17 cm – MeDiNa	72
Figura 4.27 – Alerta do MeDiNa – Tráfego elevado para a estrutura: a) estrutura do pavimento de 17 cm; b) estrutura do pavimento de 26 cm	73
Figura 4.28 – Estrutura nova para um dimensionamento pelo MeDiNa	73
Figura 4.29 Espessuras finais após o dimensionamento do Pavimento	74
Figura 4.30 Ábaco do Asphalt Institute para aplicar o método das espessuras efetivas (Branco, Pereira, & Santos, 2011).	78
Figura 4.31 – Deflexões para o pavimento de 17 cm	80
Figura 4.32 – Deflexões para o pavimento de 26 cm	80
Figura 4.33 Estruturas dos pavimentos resultantes do dimensionamento empírico-mecanicista pelos diferentes métodos	85

Índice de Quadros

Quadro 2.1 Função e mecanismo de degradação que afetam a fundação de um pavimento (InIR, S/D).....	7
Quadro 2.2 Propriedades mecânica das camadas (InIR, S/D).....	8
Quadro 2.3 Família e tipos de degradação (Branco, Pereira, & Santos, 2011).	12
Quadro 2.4 Especificações de técnicas de reabilitação das características superficiais (Branco, Pereira, & Santos, 2011).....	21
Quadro 2.5 Especificações de técnicas de reabilitação das características estruturais (Branco, Pereira, & Santos, 2011).....	23
Quadro 4.1- Cálculo dos valores de w-MAAT para Humpata.....	43
Quadro 4.2. Categorias de tráfego pesado (Ministro de Obras Públicas, 2002).....	45
Quadro 4.3 Categoria de fundação (Ministro de Obras Públicas, 2002).	46
Quadro 4.4 Tipo de estrutura para fundação para a estrada da Leba (Ministro de Obras Públicas, 2002).....	46
Quadro 4.5 Estruturas de pavimentos obtidos para a estrada da serra da Leba com base no catálogo espanhol	46
Quadro 4.6 Classes de Tráfego - Método Português (CEPSA, 2014).....	47
Quadro 4.7 Classes de fundação propostas no MACOPAV (CEPSA, 2014)	48
Quadro 4.8 Estruturas de pavimentos adequadas para a estrada da Serra da Leba, Manual Português (CEPSA, 2014).	48
Quadro 4.9 Espessuras para o pavimento de base betuminosa dimensionado pelo Paviflex... ..	53
Quadro 4.10- Características dos pavimentos e informações complementares.....	60
Quadro 4.11- Cálculo de Sb	61
Quadro 4.12- Módulos de deformabilidade – Método da Shell	62
Quadro 4.13 Módulos de deformabilidade das camadas	63
Quadro 4.14 - Danos de fadiga.....	64
Quadro 4.15 - Danos de deformação permanente	64
Quadro 4.16 – Constituição dos pavimentos para o dimensionamento com o MeDiNa.....	65
Quadro 4.17 - Valores constantes dos parâmetros usados pelo MeDiNa (Franco & Motta, 2020).	70
Quadro 4.18 - Tipos de vias e níveis de confiança a considerar no dimensionamento (Franco & Motta, 2020)	72

Quadro 4.19 Resumo da análise dos pavimentos novos	74
Quadro 4.20 – Módulos das camadas de pavimento com 17 cm, considerando reduções de 20% e 40% dos módulos das camadas betuminosas	75
Quadro 4.21 - Módulos das camadas de pavimento com 26 cm, considerando reduções de módulo de 20% e 40% dos módulos das camadas betuminosas.....	75
Quadro 4.22 - Danos de Fadiga e de Deformação Permanente para os cenários de redução de 20% dos módulos.....	75
Quadro 4.23 - Danos de Fadiga e de Deformação Permanente para os cenários de redução de 40% dos módulos.....	76
Quadro 4.24 Fator de conversão C (Branco, Pereira, & Santos, 2011)	77
Quadro 4.25 - Cálculo das espessuras efetivas	77
Quadro 4.26 - Espessuras efetivas para os diferentes cenários.....	78
Quadro 4.27 – Deflexões para o pavimento de 17 cm.....	79
Quadro 4.28 – Deflexões para o pavimento de 26 cm.....	79
Quadro 4.29 - Resultados do cálculo dos fatores de carga	81
Quadro 4.30 - Resultados obtidos para o rácio f	82
Quadro 4.31 Espessuras de Reforço dos Pavimentos.	82
Quadro 4.32 Estado do pavimento com base em valores do IRI (Filho, Almeida, & Oliveira, 2019).	83
Quadro 4.33 Módulos determinados para misturas da classe I e II	83
Quadro 4.34 Dimensionamento do Reforço do Pavimento	84
Quadro 4.35 Inclusão da Camada Antirreflexão de Fendas.....	85

Simbologia e Abreviaturas

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

AC – Asphalt Concrete

a.C – Antes de Cristo

BISAR- Bitumen Stress Analysis in Roads

C – Fator de crescimento

CBR- California Bearing Ratio

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

d_k – Deflexões características

E_m – Módulo de deformabilidade da mistura

EP – Estradas de Portugal

E_{sf} – Módulo de deformabilidade da camada anterior

E_{20} – Módulos de Deformabilidade para a Temperatura de Referências de 20°C

FWD – Falling Weight Deflectometer

h_g – Espessura da camada granular sobre o solo de fundação

InIR – Instituto de Infraestruturas Rodoviárias

IPen – Índice de penetração do betume

IQ – Índice da qualidade

IRI – International Roughness Index

JAÉ – Junta Autónoma de Estradas

MACOPAV – Manual de Conceção de Pavimento para a Rede Rodoviária Nacional

N – Número de eixos padrão de 80 kN

N_{adm} - Número admissível de repetições de carga

N_{80} - Número acumulado de repetições de carga de um eixo de 80 kN

pen 25 – Penetração do betume a 25 °C

PSI – Present serviceability index

S_b – Rigidez do betume (MPa)

t – Taxa media de crescimento anual do tráfego pesado

T_{ab} – Temperatura de amolecimento (°C) pelo método de anel e bola

T_c – Tempo de carregamento

TMAP – Temperatura Media Anual Ponderada do ar

TMDA_P – Tráfego Médio Diário Anual de Veículos Pesados

TMMA – Temperatura Média Mensal do Ar

VB – Viga Benkelman

V_b – Percentagem Volumétrica de Betume

VFB – Volume de vazios preenchidos por betume (*Voids Filled with Binder*)

V_m – Porosidade

VMA – Volume de vazios na Mistura de Agregados

W_{fator} – Fator de ponderação

W_m – Média dos fatores de ponderação

W-MAAT – Temperatura Média Anual Ponderada do Ar

α – Fator de Agressividade

°C – Graus Celsius

ε_{dp} – Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação

ε_t – Extensão de Tração

CAPÍTULO 1

1. Introdução

1.1 Enquadramento Temático

O estado de conservação das estradas é um aspeto importante para o desenvolvimento de um país. É uma medida da dimensão económica, tendo sido adotado como critério de classificação pelo Banco Mundial (Ragnoli, Blasiis, & Benedetto, 2018).

Falar da história dos pavimentos remete-nos para a história da humanidade, envolvendo dimensões como o desenvolvimento das civilizações, intercâmbios entre povos, culturas, e religiões, urbanização e desenvolvimento.

Um das mais antigas estradas é datada em 2600-2400 a.C, no antigo Egito, que consistia numa superfície plana para deslizamento de cargas, de forma a facilitar o transporte das mesmas para a construção das pirâmides. Caminhos antigos como por exemplo a estrada da seda, uma das rotas de comércio mais antigas do mundo, e historicamente importante, devido à sua grande influência na cultura da Ásia e também do Ocidente. As estradas e os seus pavimentos sempre foram usados como uma fonte de ligação entre povos, sendo a maior parte deles destinada para a prática do comércio, tendo ficado conhecidos como “rotas comerciais”.

Com o passar do tempo e o avanço da tecnologia os pavimentos começaram a mudar de forma e a serem desenvolvidos com diferentes materiais, como o caso das pedras das calçadas que contribuíram para a reestruturação e planeamento urbano de cidades. Com o desenvolvimento das tecnologias procuraram construir estradas mais cómodas, rápidas e duradoras, empregando diferentes materiais e técnicas.

Assim, os pavimentos rodoviários foram constituídos para que proporcionassem aos utentes uma circulação segura, cómoda e rápida. Contudo, devido a fatores/ações externos (climáticos e tráfego) que influenciam e afetam o comportamento destas estruturas, estas acabam por se degradar, reduzindo, assim, a capacidade global e funcional dos pavimentos rodoviários. O surgimento destas degradações nos pavimentos reduz o tempo de vida para o qual foram dimensionados.

De forma a garantir-se a manutenção da funcionalidade das estruturas dos pavimentos, e a sua qualidade global, é necessário que se crie um programa de acompanhamento do estado dos pavimentos que permita realizar as ações de conservação e reabilitação necessárias nas diferentes camadas que os constituem.

O estudo de caso analisado nesta dissertação é o do pavimento da estrada da Serra da Leba em Angola. Trata-se de uma via concebida com a função de “rota comercial”, ligando duas províncias no sul de Angola. Esta estrada é de grande importância, sendo um património histórico-cultural do país. Desde a sua construção foram feitas reabilitações ao longo do seu percurso mas, nos últimos anos, as degradações tem estado a surgir com mais frequência devido aos fatores climáticos e ao tráfego agressivo. A redução da qualidade do pavimento da estrada

da serra da Leba é particularmente devida à deficiente conservação do pavimento, ao excesso de carga por eixo dos veículos pesados circulantes na via, ao deslizamento de terras, e à evolução rápida das degradações da camada superficial, o que vem afetando em alguns pontos o desempenho estrutural do pavimento, reduzindo a sua qualidade global.

1.2 Objetivos e metodologias

O presente trabalho tem como título “Proposta de Reabilitação do pavimento da estrada da Serra da Leba em Angola” e tem como o principal objetivo apresentar propostas para o dimensionamento de uma estrutura nova do pavimento, caso seja necessário substituir a existente, e também para o reforço da estrutura de pavimento existente.

O processo de dimensionamento das estruturas novas foi, inicialmente, feito com base em catálogos de dimensionamento, designadamente os catálogos Espanhol, Português, e também através da versão *online* do Método da AASHTO 93. Além disso, recorreu ao Paviflex que é um programa de pré-dimensionamento que utiliza de forma mais evoluída os princípios do manual de pavimentos português.

Para os processos de análise e dimensionamento empírico-mecanicista utilizou-se o método da Shell e o novo método de dimensionamento brasileiro MeDiNa.

Com base no presente trabalho pretende-se contribuir com diferentes soluções de reabilitação e reforço do pavimento da estrada da Serra da Leba, de forma a disponibilizar soluções que garantam o conforto e segurança dos utentes da via e a conservação de um património público e cultural.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos que descrevem os aspetos fundamentais do desenvolvimento das metodologias indicadas, para a prossecução dos objetivos apresentados.

Neste primeiro capítulo é realizado o enquadramento do trabalho, sendo referidos os aspetos que levaram à realização da dissertação. São ainda definidos os objetivos, a metodologia utilizada para os atingir e uma breve descrição da organização do documento.

No segundo capítulo é realizada uma breve descrição da constituição de um pavimento rodoviário flexível, abordando a constituição das camadas e os materiais empregues, assim como a fundação. Ainda neste capítulo, faz-se uma síntese relativa às patologias típicas dos pavimentos flexíveis, bem como aos parâmetros de estado, para uma avaliação funcional do pavimento. Também se abordam alguns aspetos relativos à observação e gestão de pavimentos, relevando a sua importância.

No terceiro capítulo é apresentado o caso em estudo (estrada da Serra da Leba), iniciando-se com a sua história e localização geográfica. Também se caracterizam as condições climáticas da região, o estado atual do pavimento e ações de conservação realizadas que são conhecidas.

Na parte final do capítulo apresenta-se a estrutura do pavimento existente, avalia-se o tráfego, e mostra-se a necessidade de realização de ações de conservação no pavimento.

No quarto capítulo são apresentadas as técnicas de dimensionamento da estrutura nova, recorrendo a catálogos e *softwares*. Na última fase do capítulo são apresentadas possíveis soluções para um pavimento novo para substituir o existente, assim como soluções de reabilitação do pavimento existente, e respetivas ações de conservação.

No quinto e último capítulo faz-se uma síntese do trabalho, são apresentadas as principais conclusões e propõe-se o desenvolvimento de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. Características Gerais dos Pavimentos Rodoviários

2.1 Introdução

Um pavimento rodoviário é uma superfície constituída por um conjunto de camadas de espessuras finitas, apoiadas na fundação, cujas funções essenciais são assegurar uma adequada superfície de rolamento, permitindo assim uma circulação dos veículos de forma cómoda e segura. Para tal, é necessário que os pavimentos apresentem determinadas características na superfície de rolamento no que diz respeito à sua textura, qualidades antiderrapantes, cor, qualidades óticas e qualidades associadas à produção de ruídos no contacto entre o pneu e o pavimento. São todas estas características que garantem uma boa qualidade funcional, oferecendo comodidade e segurança aos utentes.

Para além da qualidade funcional, é exigida aos pavimentos uma boa qualidade estrutural, a qual está relacionada com a capacidade do pavimento suportar as cargas dos veículos sem sofrer danos. Assim, um pavimento é formado por camadas, umas constituídas por materiais granulares e outras por materiais com ligantes, os quais são aplicados nas camadas mais superficiais do pavimento.

De uma forma geral pode dizer-se que o pavimento é formado pela camada superficial (camada de desgaste) e corpo do pavimento (camada de ligação / regularização, base e sub-base) que estão apoiados sobre uma fundação.

A camada de desgaste é a parte superficial da estrutura do pavimento onde são diretamente exercidas as solicitações do tráfego bem como as dos agentes climáticos. Esta camada tem como função principal assegurar as características funcionais do pavimento (conforto e segurança). As características da superfície de um pavimento dependem do tipo e natureza dos materiais empregues nesta camada, bem como da idade e do tipo de utilização do pavimento, conjugadas com as ações climáticas. Para que o pavimento tenha uma boa durabilidade estrutural e funcional é necessário que a camada superficial seja praticamente impermeável, evitando assim a entrada de água nas camadas inferiores.

As camadas de base e sub-base de um pavimento são responsáveis por assegurar a resistência mecânica necessária para suportar as cargas induzidas pelo tráfego. As camadas de base podem ser aglutinadas ou não. Já a sub-base, camada inferior do corpo do pavimento, é geralmente constituída por materiais granulares estabilizados mecanicamente por compactação ou solos tratados. Os materiais utilizados nestas camadas têm a função de reduzir as tensões verticais de compressão em profundidade. Estas mesmas camadas servem de apoio para camadas sobrejacentes.

Abaixo destas camadas encontramos a fundação, a qual inclui o leito do pavimento, que é a zona imediatamente abaixo do pavimento com características melhoradas, e o terreno natural quando este apresenta características desejadas. Quando assim não for, é feito o tratamento e melhoramento das características do solo, misturando com um solo melhor ou com ligantes

hidráulicos. O leito do pavimento tem a função de aumentar a capacidade de suporte da fundação e de homogeneizar as suas características resistentes.

2.2 Classificação dos Pavimentos

2.2.1 Nota introdutória

Os pavimentos são classificados de acordo com os diferentes materiais empregues na constituição das suas camadas. Resultam, assim, diferentes tipos de pavimentos a que correspondem diferentes comportamentos quando solicitados pelas cargas dos veículos em combinação com determinadas condições climáticas. De uma forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos.

- Pavimentos flexíveis - são pavimentos formados nas suas camadas superiores por misturas betuminosas, ou seja, por materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, com camadas inferiores geralmente granulares.
- Pavimento rígidos - são pavimentos formados nas suas camadas superiores por betão de cimento (materiais granulares estabilizados com ligantes hidráulicos), sendo, geralmente, usado o cimento Portland. As suas camadas inferiores também são constituídas por materiais granulares. Dependendo das características do solo estes materiais podem ser ou não estabilizados.
- Pavimento Semirrígido - este tipo de pavimento é o resultado da junção de características de dois tipos de pavimentos já mencionados, sendo constituído nas suas camadas superiores por misturas betuminosas apoiadas em camadas constituídas por agregados estabilizados com ligantes hidráulicos, podendo ainda ser constituído por uma camada granular na sua sub-base.

Cada um dos pavimentos acima mencionados apresenta, sob ação de uma determinada carga, diferentes valores de deformação vertical da sua superfície. O comportamento de um pavimento é determinado pelas ações do tráfego e climáticas que atuam sobre ele, pela constituição das suas camadas e suas espessuras e, por último, pelas características da fundação.

Após a entrada em serviço, um pavimento está sujeito a dois tipos de ações: as das cargas dos veículos, como resultado da pressão vertical dos veículos sobre a superfície do pavimento, e uma ação tangencial aplicada no plano entre o pneu e o pavimento; as dos agentes climáticos, como a temperatura e a água, os quais têm uma influência relevante na evolução do comportamento dos pavimentos, influenciando a resposta da componente betuminosa e da componente granular.

Na constituição do pavimento existem dois grupos distintos de camada: as camadas ligadas, dotadas de coesão, com capacidade para suportar todos os tipos de esforços (compressão, tração e corte), e as camadas não ligadas, cujas resistências dependem essencialmente do atrito interno, conforme se ilustra na figura 2.1. O primeiro grupo é formado por camadas betuminosas e o segundo grupo formado por camadas granulares.

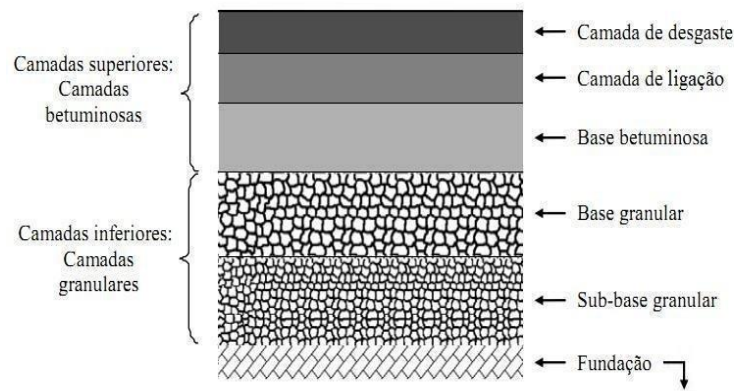


Figura 2.1 constituição de um pavimento (Costa, 2012).

No quadro 2.1 são apresentados a função das camadas e os mecanismos de degradação de cada uma delas.

Quadro 2.1 Função e mecanismo de degradação que afetam a fundação de um pavimento (InIR, S/D).

Fundação do Pavimento	Função	Mecanismo de Degradação
Fundação do Pavimento	- Suporte do pavimento	-Deformação Permanente Excessivo -Rotura dos taludes de aterro
Leito do Pavimento	- Evitar deformação do solo -Homogeneidade das características -Mecânica da fundação -Plataforma construtiva -Possibilidade de compactação das camadas sobrejacentes em adequadas condições	-Deformação permanente excessiva
Sub-base	-Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores -Proteger a base da subida de água capilar -Drenagem interna do pavimento camadas -Camada estrutural -Resistência a erosão	-Deformações permanentes excessiva
Base	-Camada estrutural -Degradação das cargas induzidas pelo tráfego	-Deformação permanente excessiva (materiais não tratados) -Fendilhamento por fadiga (materiais tratados com ligantes) -Fendilhamento térmico (materiais tratados com ligantes hidráulicos)
Desgaste	-Adequada circulação do trafego com conforto e segurança -Drenagem ou impermeabilização -Distribuição das tensões Induzidas pelo trafego	- Desgaste provocado pela ação do trefego e condições climáticas -Deformação permanente em condições excessiva de temperatura e trafego -Fendilhamento por fadiga devida a uma má aderência à camada subjacente -Fendilhamento térmico

No quadro 2.2 são apresentadas as propriedades mecânicas mais importantes das camadas granulares e camadas ligadas.

Quadro 2.2 Propriedades mecânica das camadas (InIR, S/D).

Camadas do Pavimento	Propriedades mecânicas mais importantes	Processos de melhoria
Granular	-Módulos de deformabilidade - Resistência a deformação permanente	- Compactação - Tratamento <i>IN SITU</i> - Tratamento em central
Com ligantes	-Modulo de deformabilidade ou rigidez -Resistência de deformabilidade permanente -Resistência a fadiga	-Compactação -Adequada formulação

2.2.2 Pavimento Flexível

O manual de pavimentos da (DNI, 2006), define pavimento flexível como sendo aquele em que todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas (figura 2.2) sob o carregamento aplicado, distribuindo-se a carga em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

O manual da (CEPSA, 2014), diz que os pavimentos flexíveis podem ser constituídos por diversas materiais, podendo ser agrupados em dois grupos em função do seu comportamento estrutural sendo:

- Pavimentos flexíveis cujo principal elemento estrutural é uma base em material granular;
- Pavimentos flexíveis cujo principal elemento estrutural é uma base em mistura betuminosa.

O primeiro tipo de pavimentos é caracterizado por ter camadas de base e de sub-base em materiais granulares não ligados, sobre as quais assenta um tratamento superficial ou uma, ou mais, camadas de misturas betuminosas com espessura total inferior a 0,15m. Neste tipo de pavimento as camadas granulares constituem o principal elemento resistente da estrutura, tendo as camadas de desgaste apenas a função de impermeabilizante e de resistência ao desgaste, proporcionando uma superfície comoda e segura (CEPSA, 2014).

O segundo tipo de pavimento geralmente é empregue em autoestrada, sendo constituído por camadas betuminosas com espessuras iguais ou superiores a 0,15 m, aplicadas sobre camadas granulares não ligadas. Neste tipo de pavimento a camada de base trabalha à flexão, diminuindo significativamente o nível das tensões transmitidas à fundação, uma vez que a sua rigidez é relativamente elevada, podendo também comportar-se como uma camada mais flexível, transmitindo tensões mais elevadas à camada de fundação (CEPSA, 2014).

- Materiais Granulares e suas Propriedades

Para construir as camadas não tratadas de um pavimento geralmente recorre-se a materiais britados de rochas. Em alguns casos, como forma de aproveitar os materiais do local são utilizados solos selecionados que podem constituir a sub-base ou a base de um pavimento.

Os agregados são empregues nas camadas do pavimento para formação do esqueleto do mesmo. Eles apresentam uma resistência as ações do tráfego devido ao imbricamento entre si. Cerca de 75 a 85% do volume de um pavimento é formado por agregados. Estes materiais são geralmente obtidos de duas formas: por extração direta do leito de rios e ribeiros; por fratura mecânica de rochas a partir de uma extração de britagem (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Em termos de característica gerais são exigidas aos materiais granulares no fabrico de misturas uma boa granulometria, resistência, forma das partículas, limpeza e adesividade ao ligante.

A granulometria de um agregado deve ser a adequada, permitindo a obtenção de um esqueleto que distribua convenientemente as cargas em profundidade. Isto só é possível se existir uma variedade de agregados finos e grossos de modo a obter uma curva granulométrica adequada (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Só se consegue uma boa resistência se escolherem materiais duros, com boa resistência ao choque e com atrito entre as partículas, com uma forma das partículas aproximadamente cúbica, por apresentarem maior resistência que os materiais formados por partículas lamelares ou alongadas que são frágeis e estão sujeitas a fratura.

Para que não ocorram variações volumétricas na presença da água, ou dificuldade de se envolver com os ligantes, é necessário que as partículas de agregado estejam limpas, sem argila, e sem qualquer tipo de matéria orgânica. A presença destes elementos pode reduzir o atrito interno entre as partículas. Só assim pode garantir-se uma boa resistência e uma boa ligação entre os agregados e o betume. Quanto melhor for afinidade entre eles, mais difícil será a sua separação.

- Misturas betuminosas e suas Propriedades

Uma mistura betuminosa é geralmente constituída por materiais granulares com uma quantidade de betume asfáltico previamente determinada. Após o processo de mistura são transportados, espalhados e compactados, formando uma camada de pavimento.

Dependendo da camada de pavimento e das necessidades específicas, poderão ser feitos diferentes tipos de misturas com melhor desempenho mecânico ou que ofereça um melhor desempenho relacionado com a segurança e o conforto dos utentes. O comportamento destas misturas é variável dependendo, da temperatura de serviço e do carregamento, bem como da composição da mistura.

São exigidas geralmente às misturas betuminosas as seguintes características: estabilidade, durabilidade; flexibilidades, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade, e trabalhabilidade (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

- Estabilidade: tem a finalidade de garantir uma mistura com uma capacidade de resistência a pequenas deformações quando submetida a carregamentos. Controlando a granulometria, resistência, densidade e a textura dos materiais granulares, procura-se garantir o atrito interno bem como a coesão dos materiais, sendo também necessária uma boa compactação e percentagens adequadas de ligante.
- Durabilidade: consiste em garantir a resistência à desintegração causada pelas condições climáticas e de tráfego. Como o betume contribui para a impermeabilidade, quanto maior for a quantidade de betume na mistura maior será a sua durabilidade, uma vez que se reduz o volume de vazios no interior da mistura, tornando mais difícil a entrada de ar e água para o interior das camadas.
- Flexibilidade: consiste na capacidade de adaptação das misturas betuminosas em relação aos movimentos produzidos, sem fendilhamento à superfície do pavimento, o que depende também da correta proporção de betume nas misturas.
- Resistência à fadiga: a fadiga é resultado das repetições de carga dos veículos no pavimento rodoviário, induzindo extensões de tração nos materiais ligados, que podem levar à ocorrência de fendas, originadas pela componente irreversível daquelas deformações.
- Aderência: para garantir segurança aos utentes é necessário que a mistura betuminosa ofereça uma boa aderência aos pneus dos veículos em épocas chuvosas. Para tal, é necessário que a superfície do pavimento ofereça um bom atrito, e é essencial optar-se por agregados com partículas de textura superficial rugosa e que ofereçam boa resistência ao desgaste.
- Impermeabilidade: a mistura deve ser impermeável à passagem de água e ar para o interior da mistura; só assim garantimos a conservação no interior das camadas.
- Trabalhabilidade: consiste em fabricar um material que seja de fácil manuseio (colocado em obra e compactado); para tal, é necessária uma correta formulação das misturas.

2.3 Patologias de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Os pavimentos rodoviários, após a sua construção, começam a ser submetidos a ações diversas, repetidas sucessivamente, que contribuem para a sua degradação e, portanto, para a redução da sua qualidade inicial. Mesmo antes de entrar em serviço, as ações atmosféricas contribuem significativamente para a degradação do pavimento, sendo aquelas ações de maior intensidade nalgumas localidades que noutras. Além disso, após entrar em serviço, o pavimento está sujeito a sofrer repetições de cargas dos veículos (figura 2.2). No conjunto, as ações promovem a degradação dos materiais, o que implica a redução da capacidade de resistência do pavimento, modificando o seu comportamento global.

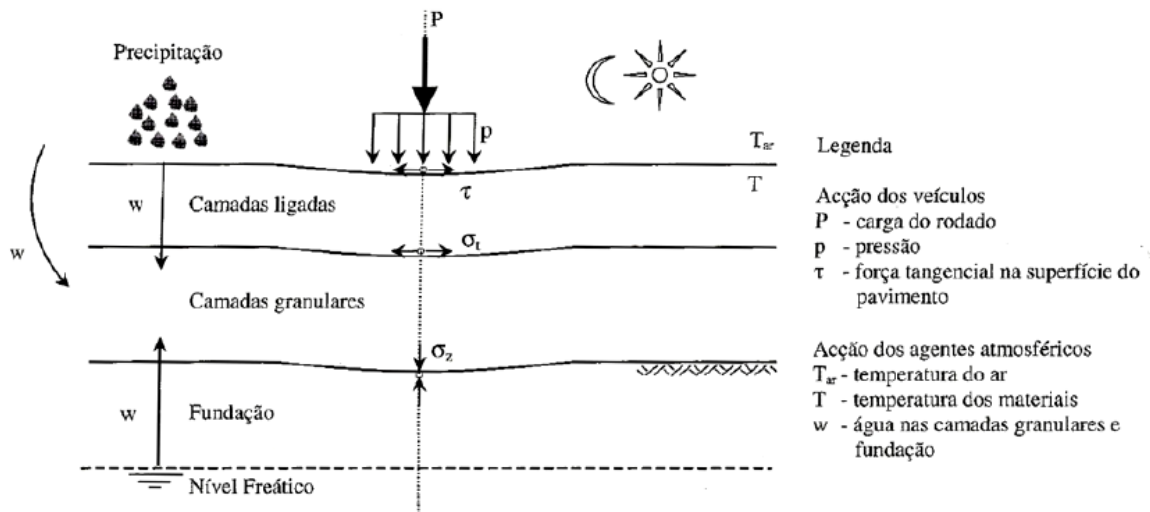


Figura 2.2 Pavimento submetido a ações (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O processo de evolução das degradações de um pavimento segue o chamado “princípio da cadeia de consequências”, ou seja, uma degradação ao evoluir dá lugar a novas degradações, as quais se combinam com as primeiras, aumentando a área de pavimento afetada.

As camadas betuminosas são constituídas por materiais deformáveis quando solicitados. Com o tempo estas deformações propagam-se, dando origem a uma vasta diversidade de degradações. Estas degradações são o resultado das solicitações e das condições climáticas, reduzindo a qualidade inicial do pavimento.

Os pavimentos flexíveis quando são submetidos a esforços ao nível das diferentes camadas, desenvolvem degradações que podem ser classificadas em dois estados últimos de ruína: o fendilhamento excessivo e a deformação permanente das camadas (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Assim, as degradações dos pavimentos flexíveis podem classificar-se nas seguintes famílias: deformações, fendilhamento, desagregação da camada de desgaste, e movimento de materiais (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 Família e tipos de degradação (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Família de Degradação	Tipos de Degradação		
Deformações	-Abatimento	-Longitudinal -Transversal	-Bermas -Eixo
	-Deformações Localizadas -Ondulação		
	-Rodeira	- Grande raio (camadas inferiores) - Pequeno raio (camadas superiores)	
Fendilhamento	- Fendas	-Fadiga	
		-Longitudinais	-Bermas -Eixo
		-Transversais -Parabólicas	
	-Pele de Crocodilo	- Malha fina - Malha larga	
Desagregação da camada de desgaste	- Desagregação superficial - Cabeça de gato -Pelada -Ninhos (Covas)		
Movimento de Materiais	-Exsudação - Subida de Finos		

As deformações mais frequentes são as rodeiras, as quais são visíveis na superfície do pavimento através de ligeiros abatimentos na zona de passagem das rodas dos veículos.

O fendilhamento é uma degradação que apenas ocorre nas camadas betuminosas por estas apresentarem resistência à tração devido à sua coesão. Em alguns casos, quando a fundação do pavimento é débil, também podem vir a desenvolver-se tais patologias.

A desagregação da camada de desgaste é provocada pela má qualidade dos materiais, decorrente da deficiente formulação das misturas e da deficiência no seu fabrico. Estas degradações contribuem para o surgimento de outras degradações como é o caso do movimento de materiais, acabando por afetar a qualidade global do pavimento.

O movimento de materiais é resultado da existência de fendilhamento, má qualidade dos materiais, formulação inadequada das misturas e deficiente fabrico das misturas betuminosas. Um dos movimentos de materiais é a exsudação do betume nas camadas betuminosas, podendo ocorrer também a de subida de finos a partir das camadas granulares, através das fendas do pavimento.

As deformações no pavimento e o fendilhamento dos pavimentos dão, por vezes, origem ao surgimento de outras degradações (figura 2.3).

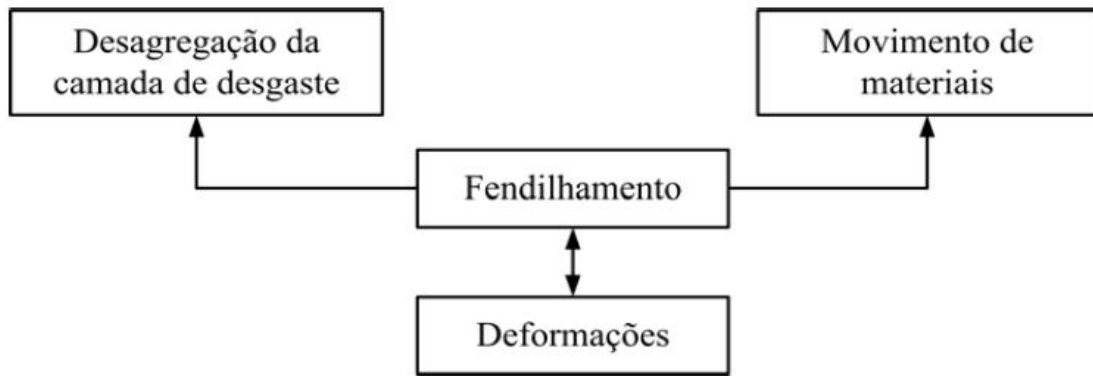


Figura 2.3 Interação e sequência entre as degradações (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Minhoto (2005) refere que algumas fendas são o resultado do processo de construção relacionados com o espalhamento e compactação das misturas betuminosas, devendo este aspeto ser considerado um fator interveniente no fenómeno de reflexão de fendas. O fendilhamento induzido pelo processo construtivo deve-se, essencialmente, à elevada diferença de rigidez entre os rolos dos cilindros de compactação e a mistura betuminosa. Estas fendas podem propagar-se por toda a espessura quer das camadas novas quer das camadas de reforço, devido principalmente a efeitos térmicos (Minhoto, 2005).

- Deformações

De acordo com o quadro 2.3, as deformações podem classificar-se da seguinte forma: abatimento, ondulação, deformação localizadas, rodeiras.

- Abatimento: longitudinal quando o abatimento se verifica junto à berma, podendo resultar em uma redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, relacionada com a entrada de água através da berma ou da interface berma pavimento; abatimento ao longo do eixo que pode ocorrer quando existe um fendilhamento ao longo do eixo que resulta de uma redução da capacidade de suporte por infiltração de água até às camadas granulares e ao solo de fundação; abatimento transversal é o resultado de situações patológicas ao nível das camadas inferiores, em particular no solo de fundação e nas camadas granulares (Branco, Pereira, & Santos, 2011).
- Ondulações: deformação transversal da camada de desgaste. É o resultado da deficiência na distribuição do ligante, podendo resultar do arrastamento da mistura, provocando deformações plásticas devido a ação do tráfego. Noutros casos resulta da deformação da fundação (Branco, Pereira, & Santos, 2011).
- Deformações localizadas: é uma deformação que se verifica em uma pequena área do pavimento, geralmente acompanhada de rotura do pavimento, (Branco, Pereira, & Santos, 2011).
- Rodeiras: deformações longitudinais que se desenvolvem na banda de passagem dos pneus dos veículos. Este tipo de deformação é o mais comum desta família de

degradação, podendo ser de pequeno raio ou de grande raio (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

- Fendilhamento

Esta é a família de degradações mais frequente nos pavimentos flexíveis, resultado, na maioria dos casos, da repetida aplicação de tensões de tração nas camadas betuminosas, originando fadiga nestas camadas. Este tipo de patologia acaba por englobar um conjunto de degradações no processo de evolução do fendilhamento, sejam estas evoluções fendas isoladas ou ramificadas ou, ainda, quando elas evoluem e formam uma malha chamada pele de crocodilo (figura 2.4). As fendas podem ter origem na fadiga dos materiais ou no movimento do solo de fundação ou má qualidade dos materiais.

As fendas podem ter uma orientação longitudinal (paralela à direção do tráfego) ou transversal (perpendicular à direção do tráfego). Quanto à forma, as fendas podem ser retilíneas, curvas ou mistas.

No que diz respeito à abertura, as fendas podem ser classificadas como finas, geralmente com uma abertura de décimas de milímetro, e largas, quando têm entre 1 mm e 2 mm (ASTM-D6433-09, 2017).

- **Pele de Crocodilo:** série de fendas ligadas causadas por fadiga da superfície das camadas betuminosas sob repetição de cargas do tráfego. O fendilhamento inicia-se na parte inferior da superfície, onde a tensão de tração é maior. Primeiro as fendas propagam-se para a superfície. Depois, com a repetição do carregamento do tráfego as fendas ligam-se, formando muitos lados (peças angulares), com um padrão semelhante à pele de crocodilo (figura 2.4). Os blocos formados são geralmente menores que 0,5m no lado mais longo. Esta degradação ocorre preferencialmente nas áreas onde passam os rodados (ASTM-D6433-09, 2017) .



Figura 2.4 Pele de crocodilo – Serra da Leba.

Nota: A pele de crocodilo é medida em metros quadrados de área de superfície.

- **Bloco Quebrado:** O fendilhamento em blocos são fendas interconectadas que dividem o pavimento em peças (blocos), que podem variar em tamanho de aproximadamente 0,3 por 0,3m (figura 2.5). Este tipo de degradação é causado principalmente pela contração das camadas betuminosas, for influência da temperatura diária que resulta em ciclos de tensão-deformação diária, não associados à carga. Ocorre em grande parte da área do pavimento, mas às vezes ocorre apenas em áreas sem tráfego. Esse tipo de deformações difere da pele de crocodilo por não ser causado pela repetição de cargas do tráfego e pela dimensão da área fendilhada (ASTM-D6433-09, 2017).

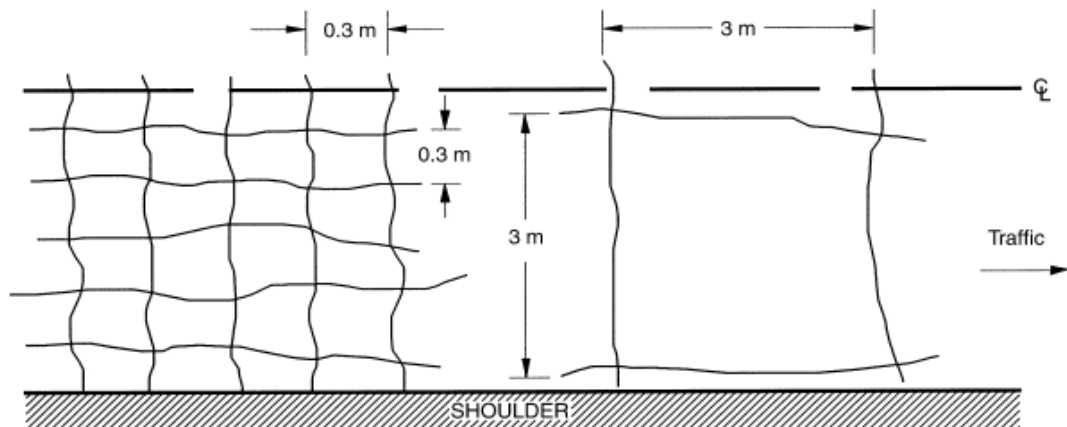


Figura 2.5 Representação das dimensões dos blocos quebrados (Transportation, 2014)

- **Fendas de Bordo:** as fendas de bordo são paralelas ao bordo do pavimento e, geralmente, afastadas de 0,3 a 0,5 m do bordo. Esta deformação é acelerada pela carga do tráfego e pode ser causada pela base ou fundação enfraquecidos (ASTM-D6433-09, 2017).

O fendilhamento de um pavimento pode ocorrer pelas seguintes razões: por fadiga, por condições térmicas; com origem na superfície; reflexão de fendas.

- Fendilhamento por fadiga: a acumulação de passagens do tráfego induz nos pavimentos uma degradação de caráter progressivo. Quando o número de passagem do tráfego ultrapassa o número de passagem admissível pelo material ocorre o fendilhamento, conduzindo à rotura do pavimento por fadiga. Esta fadiga pode afetar a globalidade da estrutura do pavimento ou ser limitada apenas à camada de desgaste (Minhoto, 2005). O nível de severidade do fendilhamento pode ser classificado como baixo, moderado ou alto. Considera-se baixo quando a área de fendilhamento é reduzida, com poucas fendas e sem bombeamento evidente de finos, não sendo necessária a selagem de fendas. É moderado quando a área de fendilhamento apresenta fendas interconectadas, formando um padrão completo, podendo as fendas ser ligeiramente fragmentadas. As fendas podem ser seladas e o bombeamento de finos não é evidente. O nível de severidade é alto quando a área de fendilhamento

interligado é moderada ou severamente fragmentada, formando um padrão completo. Os blocos podem mover-se com o movimento do tráfego, as fendas podem ser seladas e o bombeamento de finos é evidente.

O registo é feito com base na área de fendilhamento afetada em cada nível de severidade, em metros quadrados. Caso os diferentes níveis de gravidade existentes dentro de uma área não puderem ser distinguidos, a avaliação de toda a área faz-se classificando-a com o maior nível existente (Transportation, 2014).

- Fendilhamento induzindo termicamente: em zonas geográficas com temperaturas muito baixas, ou arrefecimentos bruscos, que apresentam grandes amplitudes térmicas diárias, verifica-se a ocorrência de fendilhamento com início na superfície do pavimento, propagando-se para a base das camadas. Este fendilhamento pode ocorrer através da retração térmica conjugada com a fragilidade do material (Minhoto, 2005).
- Fendilhamento com origem na superfície: em zonas com o clima temperado verifica-se o aparecimento de fendilhamento com origem na zona de passagem dos rodados, progredindo para a base. Há algum consenso de que as causas para o início e progressão deste tipo de fendilhamento estão relacionadas com os seguintes fatores: condições climáticas, tráfego, envelhecimento da mistura betuminosa, qualidade de construção e de conceção do pavimento (Minhoto, 2005).
- Reflexão de fendas em camadas de reforço: quando fazemos o reforço de um pavimento sem antes fazer o tratamento das fendas do pavimento antigo acaba por existir uma propagação dessas fendas do pavimento antigo para as novas camadas de reforço. Este tipo de patologia é um dos principais fatores responsáveis pela redução da vida dos pavimentos reforçados contribuindo para a rotura prematura dos mesmos.

- Desagregação da Camada de Desgaste

Esta família de degradações reflete-se essencialmente na perda da qualidade superficial da camada de desgaste, devido à evolução da própria camada, resultante da falta de estabilidade da ligação entre os materiais constituídos da mistura. Esta má qualidade dos materiais e mistura no fabrico acaba por se refletir em fendilhamento na superfície do pavimento e na posterior desagregação da camada superficial.

Outros fatores que também podem originar a desagregação da camada são:

- Deficiência da ligação entre os componentes da mistura;
- Deficiência na execução da camada de desgaste;
- Deficiência no betume na presença da água;
- Segregação dos agregados em central durante o transporte;
- Condições de temperatura na execução.

A desagregação da camada de desgaste pode designar-se desagregação superficial, cabeça de gato, pelada e ninhos (covas). A desagregação da superfície resulta do desgaste rápido do ligante betuminoso que envolve os agregados de dimensão mais grada, originando o desprendimento destes (Freitas & Torres, 2017).

A cabeça de gato resulta da perda dos componentes mais finos da mistura betuminosa e da perda de microtextura superficial dos agregados. Esta degradação tem efeitos negativos ao nível do ruído e do desgaste dos pneus, embora beneficiando a capacidade drenante da superfície do pavimento.

As peladas decorrem de um desprendimento de pequenas placas das camadas de desgaste em relação à sua camada inferior. As causas para este desprendimento podem ser a espessura reduzida da camada de desgaste, uma deficiência nos ligantes ou, ainda, a falta de estabilidade da camada de desgaste. A evolução da pele de crocodilo dá origem a desagregação das fendas, conduzindo ao início da formação de ninhos ou covas.

Os ninhos ou covas são depressões de forma arredondada, sendo vulgarmente conhecidos por “buracos”. Estas cavidades podem progredir para as camadas inferiores. Este tipo de patologia é considerado como sendo o último nos estados limites do pavimento, apresentando efeitos acentuados sobre os veículos. Os ninhos podem também desenvolver-se em zonas com capacidade de suporte deficiente (bolsa de argila, drenagem deficiente), ou em zonas com deformidades localizadas na camada de desgaste ou na camada de base.

As camadas de desgaste também acabam por sofrer um desgaste por abrasão, geralmente da fração grossa do agregado, conferindo à superfície do pavimento um aspeto polido e brilhante. Este tipo de degradação designa-se polimento dos agregados. Esta patologia é causada por repetição de cargas do tráfego, caracterizando-se pela redução de partículas de agregado rugosas ou angulares para fornecer boa resistência ao deslizamento. Quando o agregado na superfície se torna suave ao toque (textura reduzida), a aderência entre os pneus dos veículos e o pavimento fica comprometida (ASTM-D6433-09, 2017).

- Movimento de Materiais

Esta família de desagregação é o resultado do movimento de materiais que constituem a camada de um pavimento, ou de materiais da fundação através das camadas.

A presença de água no interior das camadas é apontado como o principal fator que leva à perda de materiais. Com a circulação dos veículos e a pressão dos mesmos sobre o pavimento, a expulsão da água do interior do pavimento, ou do solo de fundação, para a superfície, através das fendas presentes no pavimento, faz com que esta água venha acompanhada de finos das camadas adjacentes. A este fenómeno designado por bombagem de finos. Os finos apresentam-se na superfície do pavimento em forma de machas esbranquiçadas.

O movimento dos materiais reflete-se também na camada de desgaste quando na sua superfície se acumula um excesso de ligante, com o conseqüente envolvimento dos agregados grossos e redução da macrotextura do pavimento. Este tipo de deformação é denominado por Exsudação, (ver figura 2.6). Esta deformação em particular apresenta-se na zona de passagem dos rodados dos veículos, dando-lhe um aspeto preto e brilhante devido à concentração de betume nesta zona. A exsudação também pode ter origem na migração do excesso de ligante aplicado na rega de colagem, pelo uso de ligante de reduzida viscosidade para as condições de serviço, pela

estabilidade reduzida das misturas quando submetidas a tráfegos intensos e temperaturas elevadas.



Figura 2.6 Exsudação – Serra da Leba

- Outras Degradações

- **Reparação do pavimento** (figura 2.7): é uma área do pavimento que foi substituída por um novo material para reparar o pavimento existente. É considerado um defeito quando a sua execução é de pior qualidade que a da área adjacente do pavimento original (ASTM-D6433-09, 2017).



Figura 2.7 Reparação no Pavimento- Serra da Leba

- **Weathering and Raveling** (figura 2.8): são degradações superficiais do pavimento, não traduzidas para português; ocorrem devido à perda de ligante e partículas de agregado. Estas degradações indicam que o aglutinante betuminoso endureceu apreciavelmente, ou que a mistura é de baixa qualidade (ASTM-D6433-09, 2017).



Figura 2.8 *Raveling* - Desgaste da superfície – Serra da Leba

2.4 Conservação e Reabilitação de Pavimentos

2.4.1 Generalidades

Após entrarem ao serviço os pavimentos estão submetidos a ações climáticas e às solicitações do tráfego, reduzindo, assim, a sua qualidade global com o passar do tempo. Após a construção, recomenda-se a criação de um programa de acompanhamento e controlo da evolução da qualidade dos pavimentos para apoiar as decisões de manutenção em determinadas alturas, de modo a garantir um nível de serviço adequado. Estas intervenções constituem a atividade de conservação/reabilitação de pavimentos rodoviários (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Segundo (Branco, Pereira, & Santos, 2011), do ponto de vista do significado literal, conservação significa manter no estado atual, enquanto reabilitação corresponde a recuperar o estado inicial de um pavimento.

2.4.2 Técnicas de Conservação

Conforme a constituição do pavimento, formado por camadas que estão constituídas por materiais diferentes e naturezas diferentes, antes de fazer uma intervenção é necessário saber em que parte do pavimento deve ser feita a intervenção para a aplicação de soluções específicas, de acordo com as degradações apresentadas pelo pavimento.

A conservação das características funcionais de um pavimento consiste em aplicar ações para reposição da textura e do atrito, e de algumas relativas à regularidade longitudinal e transversal.

A conservação das características estruturais de um pavimento procuram melhorar as capacidades resistentes, considerando um período de vida e as condições de solicitação. Para tal é necessário avaliar o estado atual do pavimento e fazer uma avaliação da capacidade resistente para o futuro. Neste processo podem ser feitas intervenções ao nível das fundações do pavimento, das camadas granulares e betuminosas, bem como o melhoramento das condições de drenagem do pavimento.

Em Portugal é habitual considerar-se no âmbito da conservação, as chamadas conservação periódica e conservação corrente.

- A conservação periódica consiste em realizar um programa de intervenção com uma determinada periodicidade, podendo incluir uma estratégia de conservação preventiva ou uma estratégia de conservação com a realização de reforços periódicos;
- A conservação preventiva (corrente) compreende ações de conservação com o objetivo de formar camadas com reduzidas espessuras para atenuar o efeito da progressão de degradações no estado inicial de propagação como, por exemplo, o fendilhamento (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Estas ações de conservação compreendem diferentes tipos de trabalhos de acordo com a necessidade do pavimento, desde a construção de camadas de desgaste com reduzida espessura até à construção de camadas espessas para recuperar a regularidade do pavimento.

Este tipo de soluções é bom quanto ao custo financeiro de execução bem como ao tempo de execução (favorável para os utentes). Trata-se de intervenções de curta duração e de reduzida interferência com a circulação normal dos veículos na via durante o período de execução dos trabalhos.

Para os casos que exigem intervenções de caráter estrutural devem ser feitas as devidas programações para a execução. Recorre-se a este tipo de intervenções quando o pavimento se encontra com uma capacidade estrutural reduzida.

2.4.3 Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais

As técnicas de reabilitação das características funcionais da superfície de um pavimento têm como finalidade recuperar as propriedades da superfície. Estas técnicas apenas devem ser usadas em pavimento com uma boa capacidade estrutural.

A construção de uma nova camada ajudará a recuperar as características funcionais de um pavimento, devolvendo a sua qualidade inicial. Estas técnicas ajudarão a resolver problemas relacionados com a segurança e conforto dos utentes desde questões como a rugosidade, regularidade e a impermeabilidade do pavimento.

Apresenta-se abaixo uma breve descrição das técnicas mais comuns:

- Construção de camada de desgaste que visa melhorar a textura superficial, assim como as condições de impermeabilidade, tais como revestimento superficial,

microaglomerado betuminoso a frio, microbetão betuminoso rugoso e argamassa betuminosa;

- Técnicas que visam o reperfilamento prévio do pavimento existente. Esta técnica também pode ser utilizada na reabilitação das características estruturais (camada de base e camada de desgaste).

Além destas técnicas, podem também considerar-se soluções relacionadas com a espessura reduzida (betão betuminoso muito delgado), técnicas de pavimento novo (betão drenante), ou ainda técnicas de reciclagem. Cada uma destas técnicas apresenta determinadas características próprias e domínios de aplicação, requerendo a sua aplicação um cuidado estudo de cada caso em específico quanto ao estado do pavimento e categorias da estrada (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O quadro 2.4 apresenta de forma resumida algumas técnicas bem como as suas considerações.

Quadro 2.4 Especificações de técnicas de reabilitação das características superficiais (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Técnicas	Descrição	Características
Revestimento Betuminoso superficial	Solução para impermeabilizar e dar rugosidade à camada de desgaste. Tem como função homogeneizar as superfícies e reabilitar certas características funcionais.	- Antiderrapantes; - Reduz a projeção de água dos pneus; - Impermeabiliza.
Microaglomerado a Frio	Solução realizada “in situ”, com bom rendimento de colocação; fluido impermeabilizador e de custo reduzido, formado por misturas betuminosas a frio com emulsões betuminosas.	- Realizado a frio com poupança de energia; - Custos satisfatórias; - Boa aderência dos pneus; - Impermeabiliza; - Boa rugosidade superficial.
Lama Asfáltica	Solução semelhante ao microaglomerado mas de granulometria mais fina.	- Facilidade de espalhamento da mistura; - Impermeabiliza.
Microbetão Betuminoso Rugoso	Solução geralmente usada para tráfegos elevados e rápidos. É económica e oferece conforto e segurança.	- Económica; - Melhoria da rugosidade; - Aderência elevada; - Durabilidade.

Técnicas	Descrição	Características
Argamassa Betuminosa	Solução de mistura a quente que pode ser utilizada em reabilitação das características superficiais do pavimento existente. Forma minimalista de recuperação de elevadas deformações na camada de desgaste.	- Retarda uma reabilitação estrutural; - Retarda a propagação de fendas; - Adapta-se a uma deformabilidade acentuada.

- Reparação Localizada

As reparações localizadas têm como finalidade a reposição das características funcionais e estruturais de um pavimento rodoviário, recorrendo a diversas técnicas e materiais. Estas soluções são de carácter pontual (figura 2.10).



(a)

(b)

Figura 2.9 Aplicação da mistura a frio após a abertura de vala para infraestrutura - a) no primeiro dia; b) após 60 dias (HABILFIX, 2016).

Estas soluções podem ser feitas com misturas betuminosas a quente ou misturas betuminosas a frio. Os principais problemas que surgem devido a uma inadequada reparação são a reduzida aderência entre a reparação e o suporte, assim como problemas de regularidade da superfície do pavimento, devido a problemas de compactação e de resistência. Também poderão advir problemas de arranque de material de reparação ligados a falta de coesão da mistura e de compactação, problemas de drenagem superficial, reflexão de fendas e arranque de placas (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

2.4.4 Técnica de Reabilitação das Características Estruturais

No processo da reabilitação estrutural dos pavimentos refere-se em geral o termo “reforço do pavimento”, significando o conjunto de ações capazes de aumentar a capacidade estrutural do pavimento existente, para suportar, em conjunto com a fundação mobilizável, as cargas geradas pelos veículos em determinadas condições de aplicação (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O estudo da aplicação de reforço no pavimento deve ser realizado em função do seu nível de degradação. Antes de se efetuar o reforço é necessário fazer reparações ao nível da camada superficial do pavimento, designadamente selagem de fendas, tapagem de covas, remoção e substituição de zonas localizadas degradadas.

A reparação do pavimento antigo, por exemplo, selando as fendas, é para evitar a propagação das patologias do pavimento para as camadas novas. Se não se tiver esse cuidado, ocorrerá a degradação prematura das camadas de reforço.

A execução do reforço sobre um pavimento fendilhado encontra zonas de rigidez estrutural muito variável. Em determinados locais a rigidez é elevada, enquanto noutros é rigidez reduzida. Nas zonas de rigidez reduzida que resulta da presença de fendas o pavimento reforçado apresenta uma reduzida resistência estrutural comparativamente ao resto do pavimento (Pais, Pereira, & Azevedo, 2000).

É também necessário dar atenção à melhoria das condições de drenagem do pavimento porque as deficiências a este nível são muitas vezes causadoras da ruína dos pavimentos, por afetarem a resistência da fundação, das camadas granulares e até das camadas betuminosas. Estas melhorias consistem na reparação de valetas e caleiras, revestimento de valetas e reparação de drenos longitudinais (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O quadro 2.5 apresenta as técnicas de reabilitação das características estruturais.

Quadro 2.5 Especificações de técnicas de reabilitação das características estruturais (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Técnicas	Descrição	Características
Técnicas antifendas	<ul style="list-style-type: none"> - Intervir sobre o pavimento antigo de forma a reduzir ou eliminar os movimentos das fendas; - Aumentar a espessura das camadas de reforço e utilizar misturas que, não sendo deformáveis, sejam mais flexíveis e resistentes ao fendilhamento; - Utilizar sistemas antirreflexão de fendas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Antipropagação de fendas; - Eliminação de fendas; - Retardar a propagação de fendas.
Betão betuminoso de alto módulo	Técnica de reforço a quente com módulo de rigidez superior a 8000 MPa, a 25°C. Usado como camada estrutural.	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência à deformação permanente; - Razoável comportamento à fadiga; - Uso de menores espessuras no reforço.

Técnicas	Descrição	Características
Agregado de granulometria extensa tratado com emulsão	Não é aplicável como camada de desgaste, mas como reperfilamento de um pavimento deformado. Pode ser utilizado em camadas de regularização bem como em camadas de base.	-Utilizado em camadas de base ou regularização; -Adapta-se a variações de espessura do pavimento; -Bom para reforço de pavimentos deformados sujeitos a médio ou baixo tráfego; -Bom para reparação de covas.
Reciclagem	A técnica de reciclagem consiste em obter novas misturas betuminosas com a utilização de materiais fresados dos pavimentos antigos a reabilitar, adicionados novos materiais (agregados e ligantes). Tem como objetivo melhorar as características superficiais e estruturais reduzindo a utilização de materiais novos.	-Elimina fendas; -Melhora as características estruturais e superficiais; -Minimiza a rejeição de materiais; -Utiliza resíduos industriais; -Económica; -Bom contributo ambiental.

2.5 Gestão de Pavimentos

2.5.1- Generalidades

Um sistema de gestão de pavimentos (SGP) é uma ferramenta eficaz para o gestor de estradas para apoiar a decisão relativa ao tipo de intervenção a realizar, em que localizações da rede e em que momento do período de análise. Um sistema de gestão eficaz requer a disponibilidade de dados de deterioração do pavimento e a possibilidade atualização de dados, a fim de avaliar o melhor programa de conservação (Ragnoli, Blasiis, & Benedetto, 2018).

Genericamente, os sistemas de gestão de pavimentos permitem fazer a análise de uma rede rodoviária, partindo do seu estado atual, para prever a evolução das degradações ao longo de um período de tempo, de modo a prescrever qual a ação de conservação e a altura em que deve ser aplicada.

A observação de pavimentos constitui a atividade essencial à manutenção de qualquer base de dados, sendo obrigatória a inclusão nos sistemas de gestão de pavimentos, os quais apenas serão eficazes se apoiados em dados adequados, suficientes e fiáveis, permitindo estabelecer a representação do comportamento da rede rodoviária em cada fase da vida (Branco, Pereira, & Santos, 2011). O processo de observação de um pavimento é feito desde o momento da sua construção/reabilitação, e ao longo de sua vida. Já o processo de gestão do mesmo começa apenas após a sua construção.

Uma abordagem reativa tradicional para a manutenção do pavimento prescreve a substituição do pavimento quando este apresenta danos estruturais significativos. Este tipo de abordagem leva a reabilitações caras e a fracos estados de conservação, os quais podem causar condições

inseguras para os utilizadores das vias antes das intervenções. Uma abordagem proativa é orientada para a preservação do pavimento, com a implementação de reparações de pequena escala antes que as degradações estruturais ocorram, limitando a necessidade de reconstrução do pavimento (Ragnoli, Blasiis, & Benedetto, 2018).

A abordagem proativa resulta em economia de longo prazo, redução do congestionamento de tráfego e manutenção de melhores condições de segurança. As fases de colheita e análise de dados são cruciais para implementar estratégias de conservação proativas.

O sistema de monitorização do pavimento é uma ferramenta de planeamento que auxilia as agências rodoviárias no processo de tomada de decisão para manter de forma eficiente a rede rodoviária. Estes sistemas fazem a gestão e avaliação de pavimentos tendo como finalidade:

- Verificar a conformidade das características de um pavimento de acordo com as exigências estabelecidas pela administração rodoviária;
- Programar das ações de conservação;
- Fornecer dados para a melhoria das técnicas de conservação e manutenção;
- Fornecer dados para o desenvolvimento do modelo de previsão do comportamento do pavimento.

Os modelos probabilísticos ou determinísticos (figura 2.11) de previsão da evolução do estado do pavimento permitem a elaboração de cenários para um determinado intervalo de tempo, podendo ser ajustadas as previsões à medida que são obtidos mais dados. Monitorizar o estado do pavimento após a construção é comparar o nível real de desempenho com o desejado.

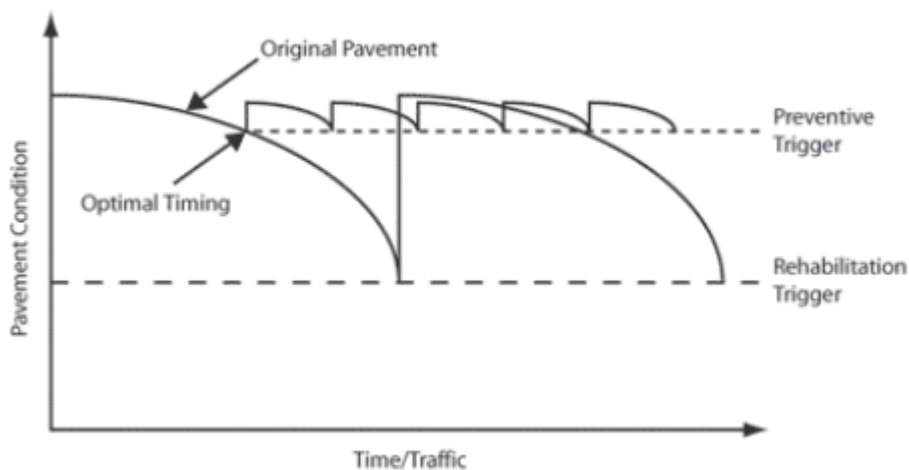


Figura 2.10 Estado do pavimento - modelo probabilístico (Santos L. d., S/D).

Na figura 2.11 observa-se a evolução qualitativa, como tempo, do estado de um pavimento genérico, desde a sua entrada ao serviço. Nesse momento, o indicador de qualidade toma o valor mais elevado, reduzindo-se progressivamente a partir daí até aos momentos de aplicação das sucessivas ações de conservação. A figura representa dois cenários: no primeiro, é encontrado um instante ótimo (*optimal timing*) para fazer a manutenção sem que a qualidade do pavimento tenha sofrido uma grande redução. As intervenções a aplicar correspondem a uma estratégia

preventiva (*preventive trigger*), o que não exige o uso de muitos recursos. No segundo cenário, o pavimento atinge um estado de qualidade de nível inferior (*rehabilitation trigger*), o qual exige ações de reabilitação, não só funcional mas também estrutural, pelo que envolve mais recursos.

- Índices de Qualidade do Pavimento (PCI)

Os sistemas de gestão de pavimento são baseados no desenvolvimento de índices de qualidade do pavimento para expressar o seu desempenho operacional (Ragnoli, Blasiis, & Benedetto, 2018).

O PCI (*pavement condition index*) é um indicador numérico que avalia o estado do pavimento com base na observação da sua superfície, o que também dá algumas indicações sobre a sua integridade estrutural e as suas condições operacionais. O PCI é um indicador global de qualidade base usado para determinar as necessidades de conservação e apoiar a decisão sobre a execução de reparações no pavimento (ASTM-D6433-09, 2017).

O PCI permite-nos ter a perceção do estado atual e servir de indicador do estado previsto de um pavimento ao nível da rede viária. Classifica os pavimentos de acordo com o nível de degradação; sem nenhuma degradação tem uma classificação de 100 (excelente), descendo progressivamente para a última classificação que é de 10-0 (ruína) (figura 2.12).

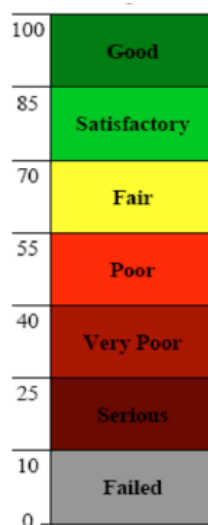


Figura 2.11 Índice de classificação do estado do pavimento (ASTM-D6433-09, 2017).

O método de determinação do PCI é baseado em inspeção visual, a qual permite observar o grau de deterioração em função do tipo de degradação, da sua gravidade, e quantidade ou densidade na amostra considerada.

2.5.2 Características Essenciais dum Sistema de Gestão

Estes sistemas consideram os dados resultantes da observação e gestão dos pavimentos para garantir a sua qualidade funcional e estrutural, otimizando os gastos. Assim, a arquitetura geral de um sistema é feita com base na necessidade de cada entidade gestora, com o intuito de adequar as funcionalidades às práticas habituais.

A entidade gestora do sistema define os objetivos a atingir, os recursos a serem envolvidos (físicos e económicos), sendo o sistema o suporte para a elaboração e execução de planos, programa de orçamentação, avaliação e eficácia das propostas.

A planificação estratégica apoiada num SGP é concebida para antecipar alguns cenários de um futuro incerto e fundamenta-se principalmente na manipulação seletiva de um grande volume de informação. Um SGP deverá ser dotado de três características fundamentais: ser aberto, interativo e dinâmico (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

- Aberto: o sistema pode ser executado em qualquer momento do estado de vida de um pavimento, sem existir ponto de partida;
- Interativo: o sistema deve permitir a atualização de dados bem como a modificação deles, e permitir simulações de análise de sensibilidade;
- Dinâmico: o sistema deve permitir a inserção de variáveis de leis de evolução ao longo do tempo. Estas leis são estabelecidas de acordo com métodos teóricos experimentais e mistos.

Os sistemas de gestão estão divididos em duas partes: sistema de gestão no domínio rodoviário; e sistemas de gestão de pavimentos.

- O primeiro é um sistema de carácter nacional, primando pelas necessidades das estradas nacionais de acordo com os recursos disponíveis;
- O segundo é um sistema de gestão de carácter local, dando primazia a estradas locais, sendo a gestão feita por administrações locais.

Um SGP é, em geral, formado pela seguinte estrutura (figura 2.13).

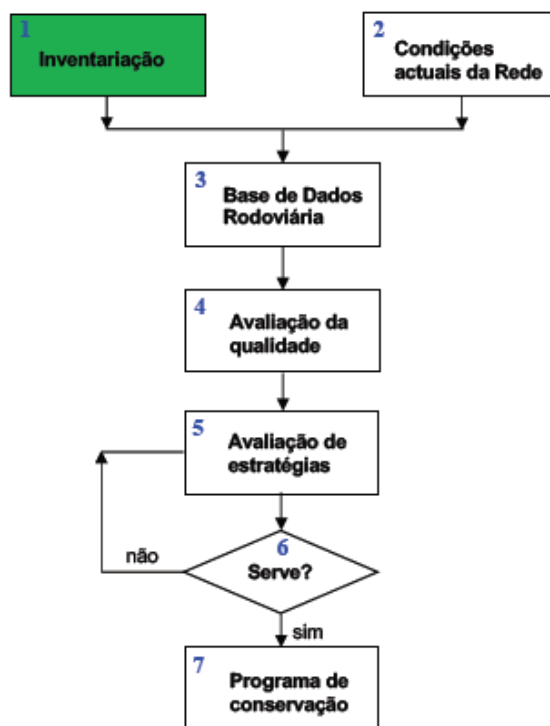


Figura 2.12 Estrutura de um sistema de gestão de pavimentos (Santos L. d., S/D).

Em que:

- A inventariação - fase inicial na qual se reúne informação relacionada com a estrada. Esta informação vai desde caracterizações gerais (identificação da via, extensões, larguras, responsável ou direção de gestão), informação georreferenciada (tipo de tráfego, nós, secções e segmentos), informação sobre as características do pavimento (estrutura, tipo de solo e seu CBR);
- Condições atuais da rede – nesta secção são guardadas informações sobre o estado atual da via, registado o tipo de degradações e a área que foi afetada. Com base nestas informações são feitas as previsões do estado futuro do pavimento;
- Base de Dados Rodoviária – a base de dados da informação caracterizadora de rede permite saber o estado atual da via, assim como registar informações futuras relativas a ações de conservação realizadas e novos valores do nível de qualidade da rede;
- Avaliação da qualidade – este módulo do sistema é responsável por fazer a avaliação do estado de conservação da rede, produzindo um índice da qualidade global do pavimento;
- Avaliação de estratégias - neste módulo são avaliadas várias estratégias de conservação futura, de forma a, por exemplo, minimizar os custos de construção, mantendo a rede com um nível de qualidade aceitável, ou maximizando a qualidade para as disponibilidades financeiras da administração. Para este fim são usados modelos de otimização.
- Serve (sim/não) - com base na avaliação das estratégias é analisada a viabilidade dos cenários para efetuar a programação das ações de conservação.

- Programa de conservação – quando se escolhe uma determinada estratégia, é feita a programação das intervenções de conservação. Tem o objetivo a aplicação da intervenção certa, no tempo certo e nos segmentos certos da rede.

2.5.3 Equipamentos de Observação de Pavimentos

Para avaliar a qualidade do pavimento é necessário fazer uma observação sistemática do pavimento, a qual pode ser realizada de forma manual ou recorrendo a equipamentos. A inspeção manual exige muita mão-de-obra e o resultado pode ser influenciado pelo juízo do inspetor. Os desenvolvimentos mais recentes em ciência da computação oferecem cada vez mais possibilidades de deteção e classificação automatizada de defeitos no pavimento (Golroo, 2017), embora o processo não esteja livre de problemas.

As degradações observadas são registadas num sistema informático formado por teclados complementares usados para registar os tipos e a gravidade das degradações observadas por inspeção visual (Branco, Pereira, & Santos, 2011). Dentro destes sistemas são integrados GPS para facilitar a localização das patologias ao longo da rede (figura 2.14).



Figura 2.13 – a) Sistema informático VIZIROAD e teclados de apoio b) Aspectos dos teclados para registo das degradações (Santos L. d., S/D).

Estes equipamentos são instalados em veículos acompanhados de um medidor de distância, o qual é ligado ao computador. Após a instalação do equipamento no veículo, ao longo da sua deslocação, o operador vai marcando no ecrã as informações observadas, obtendo assim um registo destes dados em suporte digital (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Este processo assistido pelo computador tem o nome de VIZIROAD e foi desenvolvido pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) destinado à colheita de informação

rodoviária. É constituído por um computador com dois teclados adicionais integrados no mesmo *hardware* (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Tecnologias como a da figura 2.15 (denominada de imagem estéreo), tem sido usadas para a deteção de fendas. Fazendo a selagem de uma fenda antes da sua deterioração pode reduzir consideravelmente os custos de conservação dos pavimentos (Zou, Cao, Li, Mao, & Wang, 2011).



Figura 2.14 Método *Crack-Tree* - Para deteção automática de fendas (Zou, Cao, Li, Mao, & Wang, 2011).

CAPÍTULO 3

3. Informações Sobre a Estrada da Serra da Leba

3.1 Descrição Geral

Até meados do século XIX, Huíla esteve na dependência de Benguela, por não ter uma via de ligação ao litoral. A província de Huíla foi tida sempre como uma província com grande potencial económico, havendo a necessidade de existir um intercâmbio comercial com Namibe, o que dificultou o desenvolvimento e a organização da mesma, (Sá, s.d.).

A evolução dos transportes e a crescente importância demográfica, económica, social e política das duas cidades do sul de Angola, não podiam sujeitar-se por mais tempo aos condicionalismos de tal ligação. Foi assim que, em meados da década de 60, se iniciaram os estudos para a construção de uma estrada, tendo-se colocado nessa altura três hipóteses de traçados: a primeira era o aproveitamento de um traçado existente com 221 km; a segunda ligava Namibe – Caine-Capangombe – Chibia – Lubango, com um traçado mais longo com 264 km, tendo a vantagem de contornar a serra da Chela, ligando-se ao sul do Lubango; a terceira que previa o traçado da Serra da Leba com 175 km que, embora com um percurso reduzido, exigia mais recursos humanos e financeiros para a sua execução (Monteiro, 2008).

O ano de 1923 ficou marcado pela chegada dos caminhos-de-ferro ao Lubango e pela sua ascensão à categoria de cidade. Esta altura estava já marcada pela motorização dos transportes nesta região e tinha sido adotado o traçado de 221 km, em terrapleno e sem obras de arte, tornando-se difícil a circulação em épocas chuvosas pelo elevado caudal em determinadas linhas de água e com os deslizamentos de terras (Monteiro, 2008).

Com o aproximar da guerra, Portugal procurou assegurar a sua soberania no sul de Angola frente à Alemanha, transportando maquinaria de guerra e recursos humanos, e aplicando recursos financeiros, tendo-se adotado a terceira hipótese com 175 km, ou seja, o traçado da Leba. A decisão foi baseada em estudos de avaliação de custos de construção e de utilização, sendo a solução escolhida a mais económica no que concerne aos custos de transporte, apesar de ser a mais dispendiosa em termos de investimento inicial. (Sá, s.d.)

As figuras 3.1 A e B são fotografias que retratam a serra antes da abertura da via e depois de efetuada a terraplenagem da via. As imagens foram retiradas do boletim cultural de Sá da Bandeira e tinham a seguinte legenda “Hoje, a Leba é o símbolo da vontade e do querer dos portugueses” (Sá, s.d.).

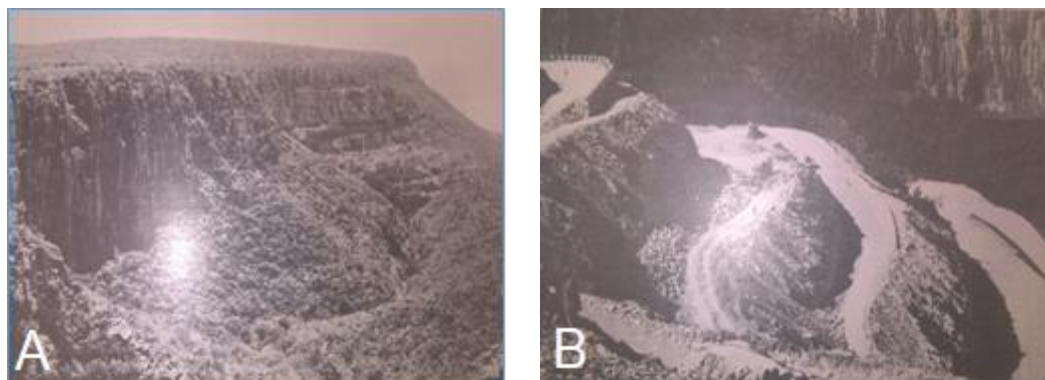


Figura 3.1 – Serra da Leba : a) serra antes da abertura da via ; b) serra depois da abertura da via. (Sá, s.d.)

3.1.1. Ligação entre a Huíla e Namibe

A Serra da Leba está localizada na cordilheira da chela, situada no sul de Angola, com cerca de 1200 metros de altitude, atingindo no seu ponto mais alto aproximadamente 2111 metros. A serra funciona como fronteira entre dois territórios com condições naturais totalmente diferentes. De um lado existem as terras do Namibe, situadas a sudoeste de Angola, caracterizadas por um clima seco e árido, e a sudeste a província da Huíla com um clima quente e temperado.

Entre aqueles dois importantes territórios do sul de Angola, encontra-se a Serra da Leba caracterizada por uma grande biodiversidade. Na figura 3.2 pode observar-se a marcação da via (a vermelho escuro), assim como as curvas de nível.

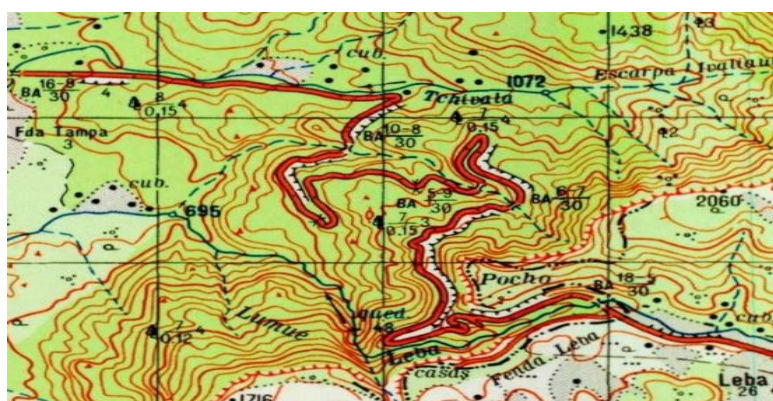


Figura 3.2 – Mapa topográfico da região da serra da Leba (SGA, 2019)

3.1.2 Portagem

A portagem de uma determinada localidade encontra-se no término da mesma e no princípio de uma outra área territorial. A Serra da Leba tem o seu controlo (portagem) conforme é chamado nesta localidade, no sentido Humpata (município da Huíla) - Mangueiras (localidade pertencente a província do Namibe). Neste controlo apenas são registados os veículos e cobrada

a taxa de portagem aos utentes que saem da Humpata com destino ao Namibe. Trata-se de uma portagem simples do ponto de vista de infraestrutura.

Embora seja cobrada portagem apenas num sentido, a estrada apresenta duas vias, uma no sentido descendente e outra no sentido ascendente. Por isso há partilha da mesma via por veículos ligeiros e pesados (figura 3.3 A e B). Na figura 3.3 B mostra-se a presença de um agente regulador com a tarefa de fiscalizar as condições dos veículos e dos automobilistas, estando ao seu lado o responsável pela cobrança da portagem.



Figura 3.3 – Portagem na serra da Leba saída da Huíla- a) Veículo ligeiro; b) veículo pesado.

3.1.3 Tráfego

A estrada da serra da Leba, por ser um percurso de ligação direto, de acesso fácil e rápido entre as duas capitais, acaba por ter uma grande procura e um trânsito elevado. A estimativa de contagem de tráfego foi feita com base na informação disponível na portagem, a partir dos *tickets* registados para todos os veículos que saem. Não se dispõe de informação relativa ao tráfego ascendente, o qual será estimado a partir dos registos do tráfego descendente.

Segundo os registos de *tickets* diários, aproximadamente 200 veículos ligeiros e 250 veículos pesados, descem diariamente a serra da Leba. Contudo, é de prever alguma imprecisão na estimativa porquanto a maior parte dos veículos pesados são de transporte de mercadorias e optam por circular no período noturno.

Inicialmente, a estrada foi concebida para 55 veículos ligeiros e 43 pesados, tendo sido projetada para um cenário de crescimento pouco significativo do tráfego nos anos posteriores (Instituto Nacional De Estradas De Angola INEA, 1965).

3.1.4 Construção e Ações de Conservação

Julga-se que a estrada da serra da Leba foi construída e pavimentada nas décadas de 60 e 70 do século XX. A inauguração viria a acontecer nas vésperas da independência de Angola. Desde a

sua abertura ao tráfego a via sofreu muitas intervenções, tanto para conservação das características superficiais do pavimento, como para reparações mais profundas, necessárias após os frequentes deslizamentos de terras, que obrigam a uma intervenção na zona afetada.

Segundo o Instituto Nacional de Estradas de Angola (INEA), o seu programa de manutenção e conservação da estrada EN 280, troço da serra da Leba, consiste na limpeza das bermas e das passagens hidráulicas, na reparação de zonas deterioradas da superfície do pavimento e das guardas de segurança, colocação e manutenção da sinalização horizontal e vertical e, conforme mostram as imagens da figura 3.4, o reforço do pavimento e a cravação das guardas de segurança neste troço (INEA, s.d.).



Figura 3.4- Trabalhos de conservação na Serra da Leba (INEA, s.d.)

3.2 Descrição do Pavimento

3.2.1 Constituição do Pavimento

O pavimento construído inicialmente era constituído por uma base de *tout-venant* britado, com uma espessura de 20 cm, revestido superficialmente com betuminoso. O dimensionamento do pavimento foi feito pelo método do CBR e para um rodado com 5.500 kgf.

O material britado foi obtido a partir da britagem da rocha calcária existente no local, onde se fez a instalação de britagem. O CBR de projeto considerado para o material, com um grau de compactação de 0.95, foi de 20%. A camada de desgaste aplicada era constituída por um revestimento superficial betuminoso duplo.

Foi também executada uma camada drenante sob a base. A sua espessura mínima foi de 10 cm, tendo uma espessura de 30 cm onde havia superfícies rochosas. Os materiais empregues nestas camadas eram permeáveis e não plásticos, apresentando um $CBR \geq 20\%$ (Instituto Nacional De Estradas De Angola INEA, 1965).

3.2.2 Patologias do Pavimento

Apesar das intervenções feitas nos últimos anos, a estrada da Leba tem estado a apresentar diversos problemas, tornando-se dispendioso manter um nível elevado de ações de conservação.

Ao longo do percurso da Leba observam-se algumas patologias, tais como rodeiras, fendilhamento, peladas, entre outros.

Como se observa na figura 3.5, há uma rodeira, ou seja, uma ligeira deformação entre o lancil e o centro da faixa de rodagem.



Figura 3.5- Rodeira no pavimento da estrada da serra da Leba

A figura 3.6 apresenta uma parte do troço da Leba com uma patologia designada por pele de crocodilo, de malha estreita e fendas abertas, evidenciando um estado de ruína estrutural. A evolução natural da pele de crocodilo conduz à desagregação dos bordos das fendas, dando lugar a formação de ninhos e covas.



Figura 3.6- Pele de crocodilo de malha estreita – Estrada da serra da Leba.

A figura 3.7 representa uma situação de pelada, ou seja, o desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste desligadas da camada subjacente.



Figura 3.7- Desagregação da camada de desgaste (Pelada) – serra da Leba

A estrada da Leba regista outros tipos de patologias no pavimento, provocadas pelo deslizamento de terra e queda de pedregulhos, devido à instabilidade dos taludes desta região, danificando o pavimento (figura 3.8).



Figura 3.8- Serra da Leba: a) Deslizamento de materiais; b) Deformação da encosta que afeta o pavimento

Nas considerações finais da memória descritiva do projeto da estrada da Leba são feitas algumas observações relativamente a problemas esperados: “o troço Leba será por certo o caso mais delicado de construção rodoviária de Angola e também um dos mais importantes de todo o território nacional. Mas são tais as vantagens que advêm da sua adoção” (Instituto Nacional De Estradas De Angola INEA, 1965). No referido documento destacam-se alguns aspetos identificados como merecedores de especial atenção que se sintetizam a seguir:

- Depósito de blocos a cerca de 150 m a leste da zona dos lacetes - estes blocos, por vezes, de grandes dimensões dispõem-se sensivelmente segundo o talude de equilíbrio;
- Zona dos lacetes - nesta zona, o plano de estabilidade das rochas está inclinado de 30 a 55 graus no sentido da estrada, onde se preveem alguns cortes superiores a 10 m. Deverá prever-se a possibilidade de fracturação e deslizamento de massas rochosas;

- Falésia - a estrada está implantada junto à falésia de altura superior a 250 m, correndo paralelamente a ela. As rochas que a constituem fraturam-se segundo diaclases que lhe são paralelas. Embora não haja sinais de desprendimento iminente de massas rochosas a partir das diaclases, deverá prever-se a possibilidade de que tal possa vir a acontecer, se para tanto se vierem a verificar condições meteorológicas especiais;
- Blocos Soltos - dado que o troço se desenvolve num terreno rochoso de forte inclinação, será necessário proceder à remoção dos blocos soltos que se encontrem nas zonas sobranceiras à estrada, prevendo a sua segurança, não só durante a construção, mas também durante a sua exploração.

A estrada nacional EN 280 no troço da Leba é uma parte de grande importância, permitindo a ligação entre dois territórios de forma rápida. Para tal, é necessário que o mesmo troço esteja em bom estado conservação garantindo a segurança dos utentes.

De acordo com a descrição feita no ponto 3.2.2, pode afirmar-se que várias das patologias identificadas revelam problemas estruturais, resultando também em falta de qualidade funcional do pavimento. Assim, julga-se ser necessária uma avaliação estrutural da estrutura do pavimento, de modo a estudar cenários de reconstrução ou de reabilitação da estrutura existente para as condições de solicitação a que está sujeita.

3.3 Condições climáticas - Temperatura e Precipitação

As diferentes condições climáticas em Angola são resultado de diversos fatores como a proximidade do oceano e a topografia das diferentes zonas. O território de Angola desenvolve-se desde as proximidades do equador até perto do trópico de capricórnio ao longo de 14 graus de latitudes, explicando a diminuição geral da radiação solar recebida com as temperaturas médias de noroeste a nordeste; Cabinda: 24,7°C; Dundo:24,6°C; sudoeste e sueste do Namibe: 20°C; Cuangar 20,7 °C (Russo & Almeida, 2019).

No que se refere ao clima em Angola há a considerar duas estações (épocas) climáticas:

- O verão (época chuvosa) compreende um período de seis meses que tem início a meados de outubro e termina em meados de abril;
- O cacimbo (época seca) referente aos restantes meses do ano.

A Leba encontra-se num dos pontos de maior altitude do país. Nessa zona registam-se temperaturas baixas, em comparação com outras regiões do país, com uma temperatura média anual de 13,5°C. As temperaturas mínimas variam entre 4°C e 7°C, referindo-se ao período de frio de maio a agosto, nos quais é frequente a ocorrência de geada (figura 3.9). O período quente do ano é de setembro a abril, coincidindo em grande parte com a época chuvosa (figura 3.10). Outubro é o mês mais quente do ano com uma temperatura média mensal de 19 °C nesta região, sendo o mês de março o que tem maior precipitação (cerca de 172 mm).

O município da Humpata da província da Huíla é o mais próximo da serra da Leba em relação a Caraculo, tendo as características em termos de temperatura médias e precipitação ao longo do ano que se indicam nas figuras 3.11 e 3.12.

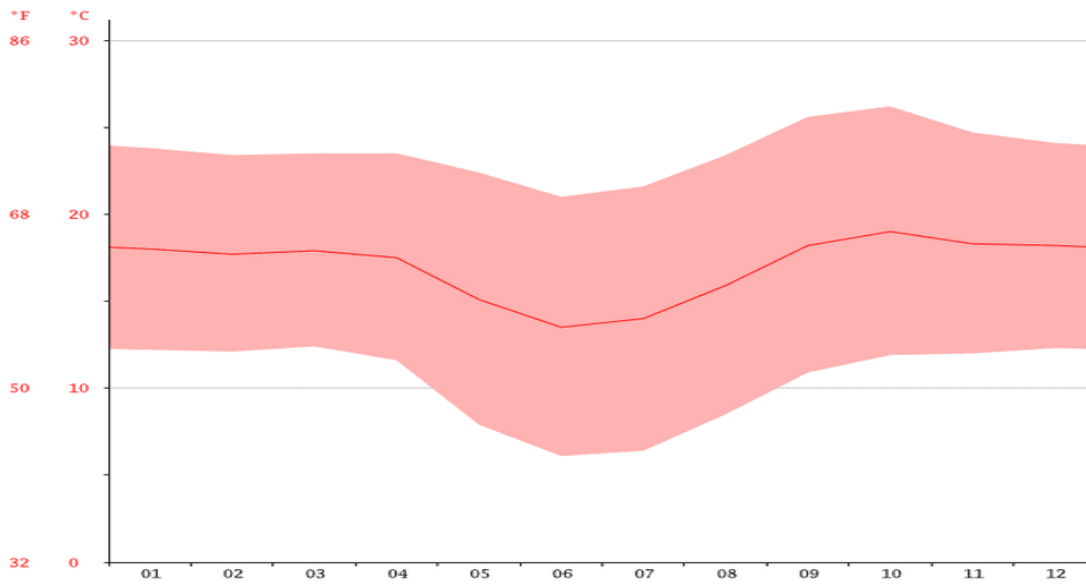


Figura 3.9-Variação da temperatura média ao longo do ano no município da Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).

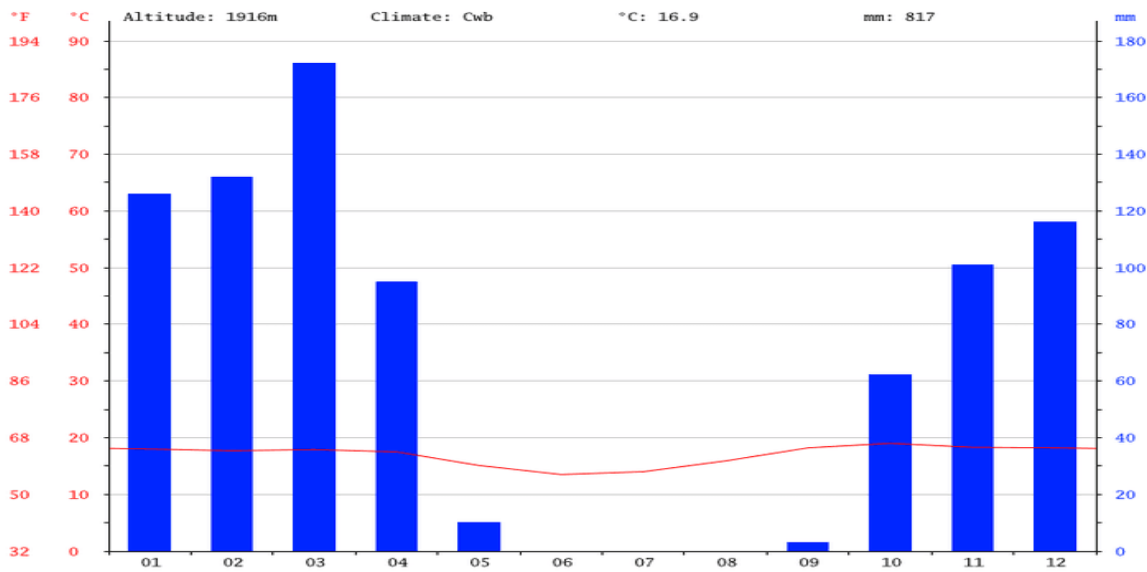


Figura 3.10- Gráfico-Variação da precipitação média ao longo do ano no município da Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).

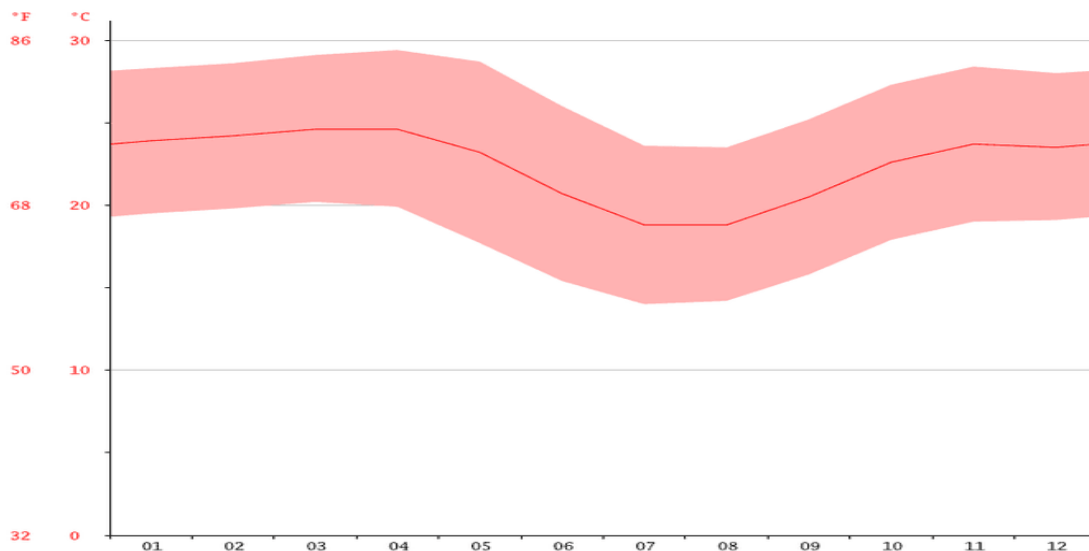


Figura 3.11- Variação da temperatura média ao longo do ano no município da Caraculo (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).

O clima desta região é desértico com uma temperatura média anual de 22.5 °C.

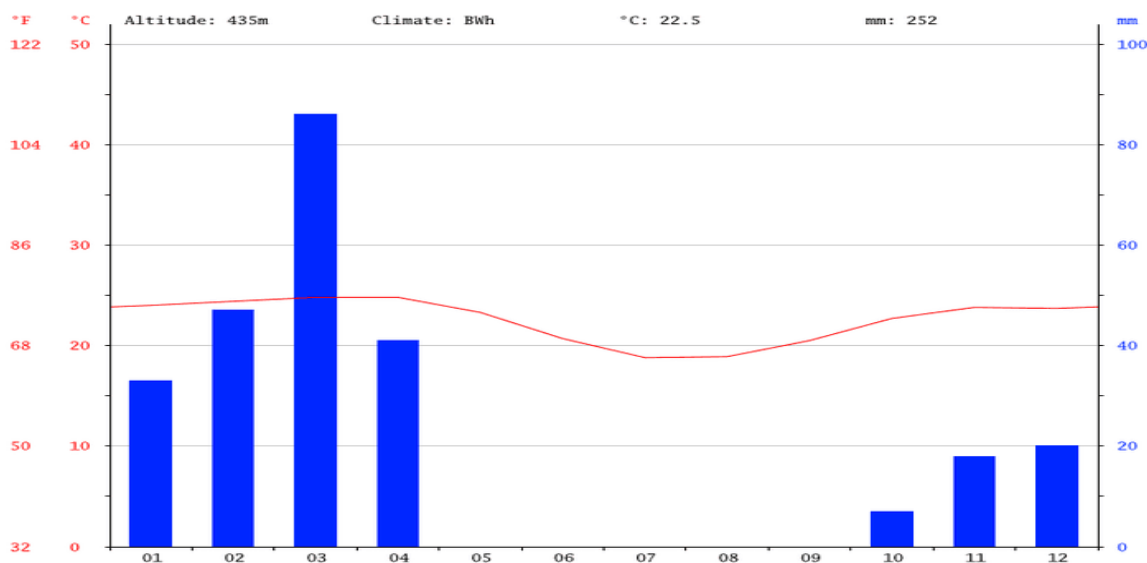


Figura 3.12- Gráfico-Variação da precipitação média ao longo do ano no município da Caraculo (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).

Os meses de maio a setembro são os meses mais secos do ano, apresentando características diferentes do restante território do país devido à proximidade do deserto. O mês de maio é tido como o mês com menor precipitação no ano, sendo março o mês com a maior média de precipitação, com cerca de 86 mm.

Para o processo de dimensionamento usar-se-ão dados climáticos da região da Huíla-Humpata, em vez dos dados climáticos relativos a Namibe-Caraculo, porque esta região se encontra a uma distância superior da Leba do que Humpata. Não se utilizaram dados climáticos da chamada região das mangueiras, mais próxima da estrada, por não existirem dados disponíveis.

CAPÍTULO 4

4. Conceção e Dimensionamento de Estruturas de Pavimento para a estrada da Leba

Para diminuir o risco de insucesso das estruturas de pavimentos é necessário o seu dimensionamento. Habitualmente, os pavimentos rodoviários flexíveis dimensionam-se recorrendo a modelações empírico-mecanicistas, considerando leis de comportamento específicas para as diferentes camadas de materiais. Estes métodos consideram como ações nos pavimentos o tráfego e a temperatura. É a aplicação destes princípios que permite estabelecer a constituição das camadas de pavimentos e suas respetivas espessuras.

Para o dimensionamento da estrutura do pavimento em estudo vai recorrer-se a diferentes manuais e metodologias que se indicam a seguir:

- Catálogo espanhol (Norma 6.1-1C);
- Manual de conceção de pavimentos para a rede rodoviária nacional;
- Método da AASHTO 93;
- Método empírico-mecanicista da Shell;
- Método empírico-mecanicista MeDiNa.

Depois disso, far-se-á a comparação entre as várias estruturas de pavimentos obtidas e a escolha das estruturas a ser adotadas.

4.1 Características do Tráfego

Saber as características do tráfego é um dos aspetos importantes para o dimensionamento do pavimento. Nos pavimentos rodoviários apenas se consideram as ações introduzidas pelos veículos pesados, uma vez que, pela magnitude das cargas que aplicam, são aqueles veículos que induzem o aparecimento de fendilhamento e de deformação nos pavimentos. O dano induzido por cada veículo pesado depende da carga por eixo e da respetiva configuração.

As cargas por eixo dos veículos pesados podem variar bastante, dependendo de diversos fatores, desde o tipo de veículo até ao tipo de eixos (CEPSA, 2014). Existe uma enorme variedade de veículos pesados em circulação, com características, eixos e peso bastante diferente uns dos outros. Na figura 4.1 ilustram-se alguns dos tipos de pesados que circulam na estrada da Serra da Leba, não existindo um controlo sistemático dos níveis de carga aplicados ao pavimento.



Figura 4.1- Veículos com diferentes cargas e pesos na serra da Leba

Na província da Huíla, bem como a província do Namibe, não estão divulgados dados relacionados com as cargas e tipologias de eixos dos veículos que percorrem a estrada nacional EN 280. Nesta região, o único posto de pesagem de veículos localiza-se na região de Palanca, o qual dista cerca de 10 km da portagem da Leba (Figura 4.2), encontrando-se fora de serviço. Estas circunstâncias tornam difícil a obtenção de dados e uma correta avaliação do tráfego a considerar no processo de dimensionamento do pavimento em termos do número de passagens de eixos padrão.

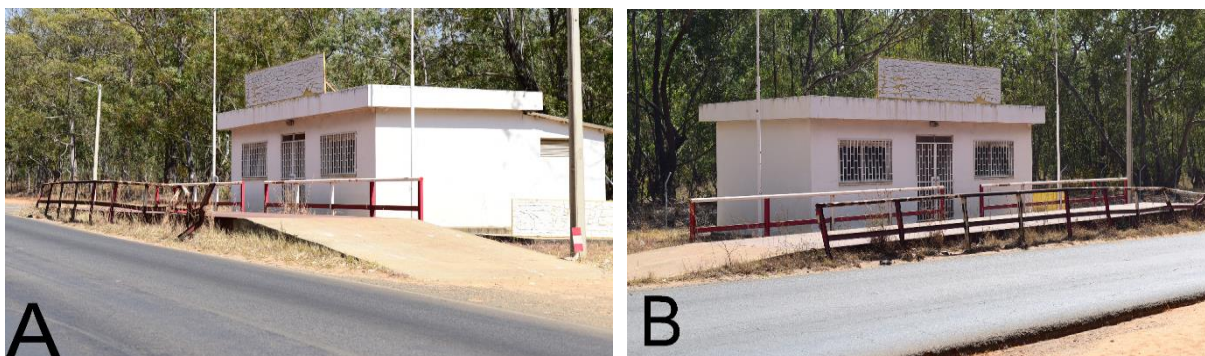


Figura 4.2- Vistas do posto de pesagem de veículos localizado na Província da Huíla

Segundo dados da Direção de Viação e trânsito da Huíla, e de acordo com a natureza histórica e socioeconómica das duas regiões ligadas pela estrada, observou-se um crescimento reduzido do tráfego nos últimos seis anos devido à crise económica e ao decreto-lei 77/04, de 23 julho, que “proíbe a entrada de veículos com o volante à direita e usados há mais de 5 anos”. Com base nos dados recolhidos junto daquelas instituições, considerou-se verosímil estimativas de 2 e 3% para a taxa de crescimento anual do tráfego de pesados (Remessa de Dados, 2019).

As províncias da Huíla e do Namibe enquadram-se no complexo da ordenha, também denominado complexo do leite, caracterizado pela predominância de populações de feição

pastoril e agro-pastoril. A atividade agrícola decaiu gravemente nos últimos 25 anos e as províncias têm dependido de importações para satisfazer a procura. Devido à crise instalada em Angola, no segundo semestre de 2014 houve necessidade de alavancar a economia e reduzir a dependência do petróleo, tendo sido criado o plano de diversificação da economia (CESO Development Consultants, 2015).

Tendo em conta o plano de diversificação da economia, as duas províncias têm muito a oferecer desde a agricultura a recursos minerais, bem como um grande potencial turístico. Além disso, a atividade económica tem vindo a crescer entre as duas províncias, nomeadamente pela existência do porto marítimo do Namibe, que é um dos importantes portos para a região sul do país, podendo contribuir para um aumento da taxa de crescimento do tráfego nos próximos 20 anos.

Para efetuar o dimensionamento do pavimento será necessário considerar o efeito do tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDA). Como o pavimento deve assegurar a circulação do tráfego durante um certo número de anos n (período de dimensionamento), a verificação da capacidade de carga do pavimento é feita com base no número acumulado de veículos pesados (N_{Pes}) que se prevê venham a circular sobre o pavimento durante esse período.

O número de pesados (N_{Pes}) que solicitará o pavimento durante o número de anos n , para pavimentos flexíveis, é o previsto para 20 anos. O N_{Pes} calcula-se pela expressão 4.1 (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

$$N_{pes} = 365 \times (TMDAp) \times \frac{(1 + t)^n - 1}{t} \quad (4.1)$$

Em que:

- TMDAp - Tráfego médio diário anual de veículos pesados na via do projeto;
- t - taxa de crescimento anual de tráfego pesado;
- n - vida útil do pavimento.

Com base na expressão 4.1, para o cálculo do N_{PES} e uma taxa de crescimento de 2%, para um TMDA de 500 veículos (valor indicado no capítulo anterior, para os dois sentidos), obteve-se um número acumulado de pesados em 20 anos de $4,43 \times 10^6$, ou seja, $2,217 \times 10^6$ na via mais solicitada. Para uma taxa de crescimento de 3% obteve-se um número acumulado de pesados de $4,90 \times 10^6$, o que corresponde a $2,42 \times 10^6$, na via de projeto.

O manual de dimensionamento da SATCC (SATCC, 2001) para países africanos pertencentes à SADC, indica os valores recomendados para o coeficiente de equivalência (ou fator de agressividade, α) entre veículos pesados e eixos a serem usados nos casos em que se conhecem os materiais das estruturas dos pavimentos, propondo a utilização do valor 4 caso isso não aconteça. Para o pavimento em estudo, formado por materiais granulares e betuminosos, o manual da SATCC indica que para este tipo de pavimento deverá usar-se um fator de

agressividade de 4. A expressão 4.2 permite a determinação do número acumulado de eixos padrão de 80 kN, considerando o referido valor do fator de agressividade.

$$N_{80}^{dim} = 365 \times (TMDAp) \times \frac{(1 + t)^n - 1}{t} \times \alpha \quad (4.2)$$

Considerando os valores de TMDAp acima indicados para os dois cenários em estudo e o valor de 4 para o fator de agressividade, obtêm-se valores de N_{80}^{dim} de $8,8 \times 10^6$ e $9,8 \times 10^6$, respetivamente, para os cenários de taxa de crescimento de 2 e 3%.

4.2 Temperatura de Serviço

A temperatura tem um caráter importante no processo de dimensionamento de pavimentos. As variações da temperatura ambiente não têm geralmente uma grande influência nas camadas constituídas por materiais não ligados, tendo, no entanto, uma importância relevante no comportamento dos materiais betuminosos. Utilizou-se o procedimento da Shell (Shell, 1977) para a quantificação da ação da temperatura no pavimento. O método faz uso da média anual ponderada do ar (w-MAAT) que se determina com base nos valores das temperaturas médias mensais do ar (MMAT). Consideraram-se os valores disponíveis para a região de Humpata, conforme se indica no Quadro 4.1.

Quadro 4.1- Cálculo dos valores de w-MAAT para Humpata

Determinação de w-MAAT		
Meses	MMAT, °C	Fator de Ponderação
janeiro	20,9	1,6
fevereiro	20,55	1,41
março	20,7	1,46
abril	20,5	1,4
maio	18,75	0,87
junho	17,25	0,72
julho	17,8	0,78
agosto	19,65	0,96
setembro	21,9	1,89
outubro	22,6	1,94
novembro	21,5	1,8
dezembro	21,5	1,8
Fator de ponderação total		16,63
Fator de ponderação medio		1,3858
w-MAAT (°C)		21

Após o cálculo do w-MAAT, a determinação da temperatura de serviço no pavimento é obtida em função da espessura da camada betuminosa do pavimento, com base no ábaco da Shell (figura 4.3).

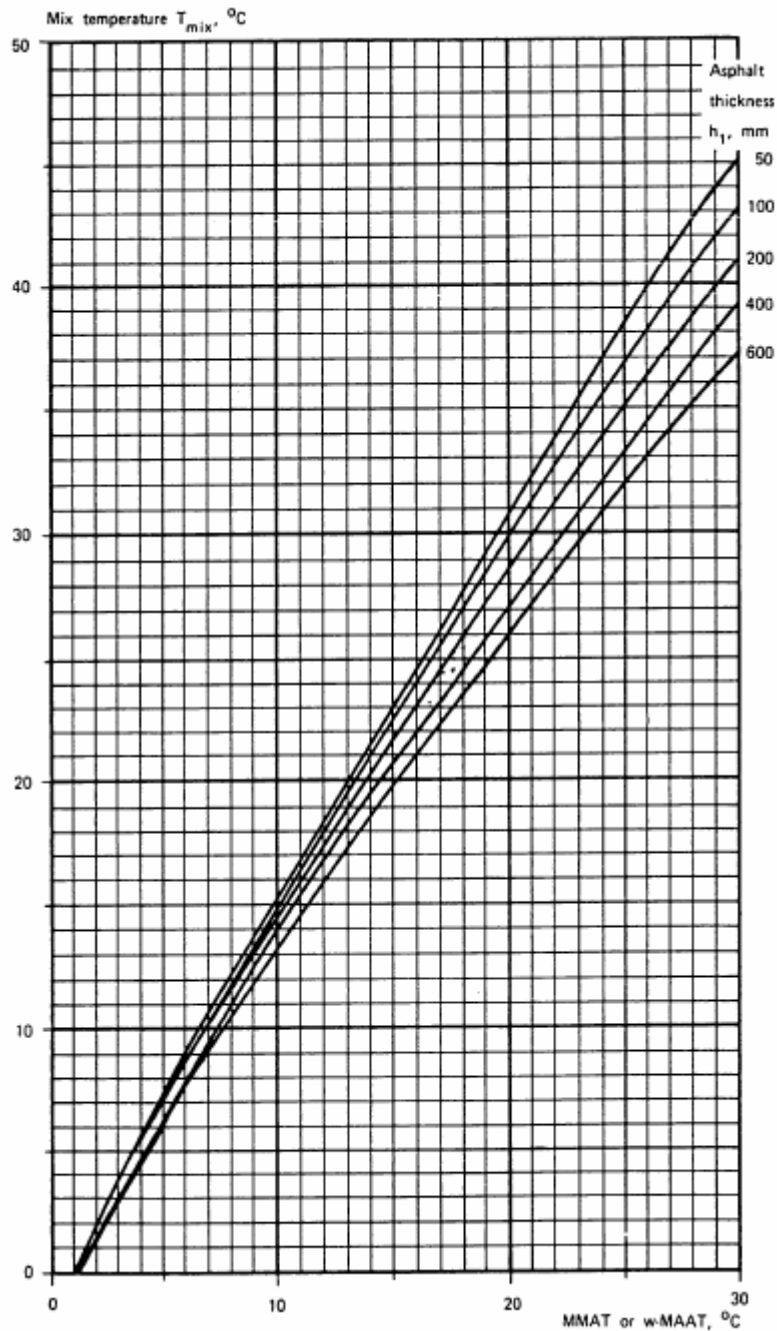


Figura 4.3 – Ábaco para a determinação da temperatura de serviço (Shell, 1977)

4.3. Pré-dimensionamento da Estrutura de Pavimento por Diferentes Métodos

4.3.1 Catálogo Espanhol

O catálogo espanhol, publicado na Norma 6.1-1C, permite escolher estruturas de pavimento com base no tráfego, clima, tipo de camadas e materiais a empregar no pavimento (Ministro de Obras Públicas, 2002).

- Tráfego

O catálogo define oito categorias de tráfego pesado, em função do volume médio diário de veículos pesados na via de projeto, no ano de abertura ao tráfego, de acordo com o Quadro 4.2 (Ministro de Obras Públicas, 2002).

Quadro 4.2. Categorias de tráfego pesado (Ministro de Obras Públicas, 2002)

Categorias de Tráfego Pesado		IMDp Pesados
Categorias de Tráfego Pesado T00 a T2	T00	$IMDp \geq 4000$
	T0	$2000 \leq IMDp < 4000$
	T1	$800 \leq IMDp < 2000$
	T2	$200 \leq IMDp < 800$
Categorias de Tráfego Pesado T3 a T4	T31	$100 \leq IMDp < 200$
	T32	$50 \leq IMDp < 100$
	T41	$25 \leq IMDp < 50$
	T42	$50 < IMDp$

Nota: IMDp – sigla utilizada no manual espanhol para tráfego médio diário anual na via de projeto.

De acordo com o Quadro 4.2, e com base nas características do tráfego médio diário considerado para a Serra da Leba de 250 veículos, conclui-se que o tráfego corresponde à categoria T2. Para trechos com inclinação superior a 3%, o catálogo espanhol refere que deve considerar-se uma categoria superior de tráfego pesado. No caso em estudo, optou-se por não aplicar apenas a categoria recomenda uma vez que 250 veículos corresponde ao limite inferior da categoria T2. Assim, para o dimensionamento pelo catálogo vai considerar-se as classes T1 e T2.

- Fundação

Para definir as estruturas do pavimento analisaram-se três categorias de fundação, denominadas E1, E2 e E3. Estas categorias correspondem a diferentes valores de módulo de deformabilidade, medido no segundo ciclo de carga (E_{V2}) de um ensaio de carga com placa (Quadro 4.3), realizado de acordo com a norma espanhola NLT 357.

Quadro 4.3 Categoria de fundação (Ministro de Obras Públicas, 2002).

Categoria de fundação	E1	E2	E3
E_{V2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

De acordo com a informação recolhida, os materiais usados na construção da estrada da Serra da Leba foram solos locais escavados e terraplenados, os quais apresentam um índice de plasticidade de 20% e um CBR mínimo de 20%. Considerando as indicações do catálogo espanhol, pode obter-se a estrutura de fundação que se ilustra no Quadro 4.4, da categoria E₂.

Quadro 4.4 Tipo de estrutura para fundação para a estrada da Leba (Ministro de Obras Públicas, 2002).

E ₂	Solos selecionados
E_{V2}	≥ 100 cm
Nota: 3 corresponde a solos selecionados com um CBR $\geq 20\%$ e para uma espessura de 100 cm.	

- Seleção do Tipo de Estrutura de Pavimento

O catálogo espanhol apresenta propostas de estruturas de pavimentos baseadas, fundamentalmente, na consideração do tráfego e da capacidade de carga da fundação.

As estruturas apresentadas no catálogo são codificadas com base em 3 algarismos, sendo o primeiro corresponde à categoria de tráfego, o segundo o tipo de plataforma e o terceiro o tipo de secção. O Quadro 4.5 apresenta as quatro estruturas a que se chegou para o caso em estudo (espessuras em centímetros).

Quadro 4.5 Estruturas de pavimentos obtidos para a estrada da serra da Leba com base no catálogo espanhol

		Classes de tráfego			
		T1		T2	
Leito do pavimento	E ₂	 121 MB 30 ZA 25	 122 ⁽³⁾ MB 20 SC 25 ⁽²⁾	 221 MB 25 ZA 25	 222 ⁽³⁾ MB 18 SC 22 ⁽²⁾
		 MB : Mistura betuminosa	 ZA : Zahorra artificial	 SC : Solo-Cimento	Zahorra artificial: agregado britado de granulometria extensa.

4.3.2 Manual de Conceção de Pavimentos Português - MACOPAV

O MACOPAV também apresenta soluções de estruturas de pavimentos com base nas características do tráfego, da capacidade de carga da fundação, dos materiais a utilizar e das condições de temperatura.

- Tráfego

O manual de conceção de pavimentos português considera sete classes de tráfego pesado, definidas tal como se indica no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 Classes de Tráfego - Método Português (CEPSA, 2014)

Classe	TMDAp	Taxa de crescimento anual (%)	Pavimento Flexível
			Fator de Agressividade Eixos 80 kN
T7	<50	Estudo específico	
T6	50-150	3	2
T5	150-300		3
T4	300-500	4	4
T3	500-800	4	4.5
T2	800-1200	5	5
T1	1200-2000		5,5
T0	>2000	Estudo específico	

Para as características de tráfego da estrada da Serra da Leba, ou seja, para um TMDAp de 250 veículos na via de projeto e uma taxa de crescimento de 3%, obtém-se, de acordo com o Quadro 4.6, uma classe de tráfego de a T5. Contudo, considerando um fator de agressividade de 4, tal como referiu acima, e o correspondente valor de N_{80}^{dim} $9,8 \times 10^6$ eixos-padrão de 80 kN, deve considerar-se uma classe T4, uma vez que a classe T5 tem como limite superior um valor de 8 milhões de eixos-padrão.

- Fundação

A fundação de um pavimento depende da natureza e das propriedades dos solos existentes no local da obra (CEPSA, 2014). De acordo com os solos característicos na região da Leba (solos siltosos), e com base na metodologia de classificação de solos do MACOPAV, os solos da Leba pertencem ao grupo S3 (solos siltosos com um CBR de 10 a 20%).

No âmbito do MACOPAV, considera-se uma fundação de pavimento formada por camada de leito do pavimento e solos subjacentes que condicionam o seu comportamento até à profundidade de um metro. O manual português considera 4 classes de fundação, conforme se indica no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 Classes de fundação propostas no MACOPAV (CEPSA, 2014)

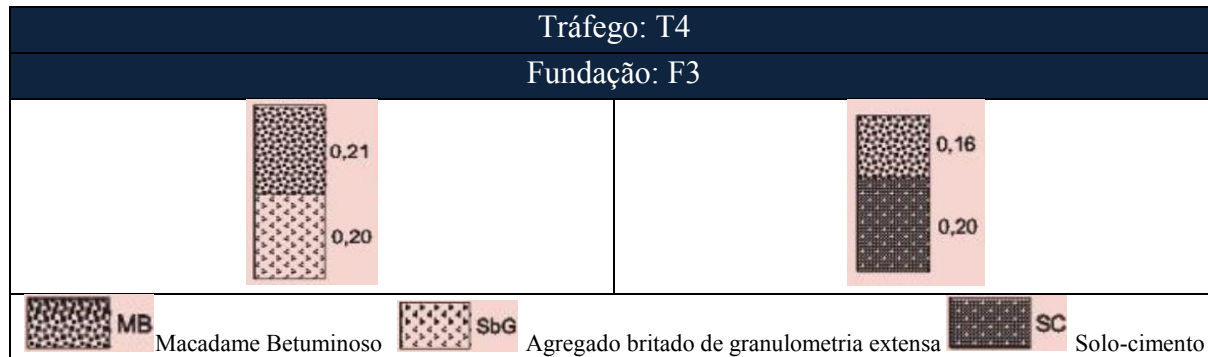
Classe de Fundação	Módulo da fundação E_f (MPa)		Classes de tráfego
	Gama	Valor de cálculo	
F1	$30 < E_f \leq 50$	30	T5 T6
F2	$50 < E_f \leq 80$	60	T3 T4 T5 T6
F3	$80 < E_f \leq 150$	100	T1 T2 T3 T4 T5 T6
F4	$E_f > 150$	150	T1 T2 T3 T4 T5 T6

O solo considerado na estrada da Serra da Leba, com um CBR mínimo de 20%, pode classificar-se como S3 pelo MACOPAV, o que permite considerar uma fundação da classe F3, portanto, com um módulo de deformabilidade de 100 MPa.

- Seleção do Tipo de Estrutura de Pavimento

De acordo com as várias estruturas indicadas no manual, no Quadro 4.8 estão apresentadas as estruturas adequadas para o pavimento da estrada da Serra da Leba, uma com sub-base granular e outra com sub-base de solo-cimento.

Quadro 4.8 Estruturas de pavimentos adequadas para a estrada da Serra da Leba, Manual Português (CEPSA, 2014).



4.3.3 Utilização do Software Paviflex

O paviflex é um *software* de dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis, baseado nos princípios do MACOPAV mas que incorpora algumas melhorias, designadamente pela consideração mais ajustada da ação da temperatura e das condições de sollicitação dos pavimentos.

- Temperatura

A aplicação disponibiliza dados que permitem avaliar a ação da temperatura para quarenta localidades de Portugal continental.

A opção localidade destina-se a escolher a localização da estrada, o que permite seleccionar dados climáticos dessa zona e, assim, quantificar a ação da temperatura pelos métodos considerados na aplicação e validados para Portugal continental (Figura 4.4).

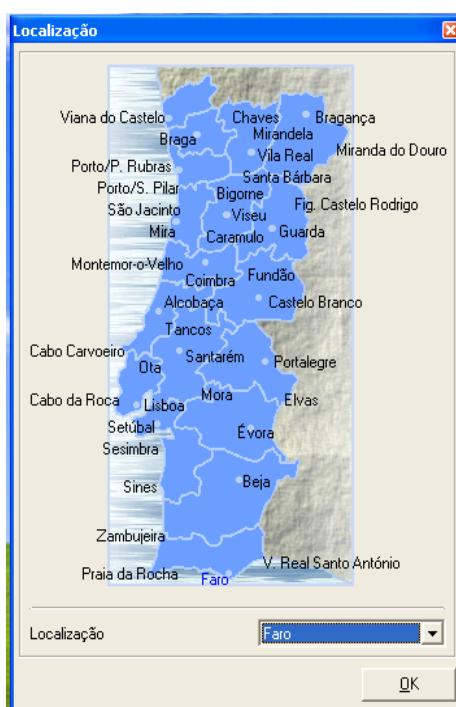


Figura 4.4 Localização geográfica da estrada para consideração da temperatura de serviço

Para que fosse possível utilizar o Paviflex para o caso em estudo, considerou-se com suficiente aproximação, para efeitos de pré-dimensionamento, a escolha de uma localização no território continental de Portugal com as características térmicas razoavelmente próximas das existentes na região de Humpata (Serra da Leba). A comparação com várias localizações geográficas portuguesas permitiu concluir que a região de Faro seria a mais adequada, não obstante as diferenças verificadas. A Figura 4.5 representa graficamente dados da temperatura média máxima das duas regiões.

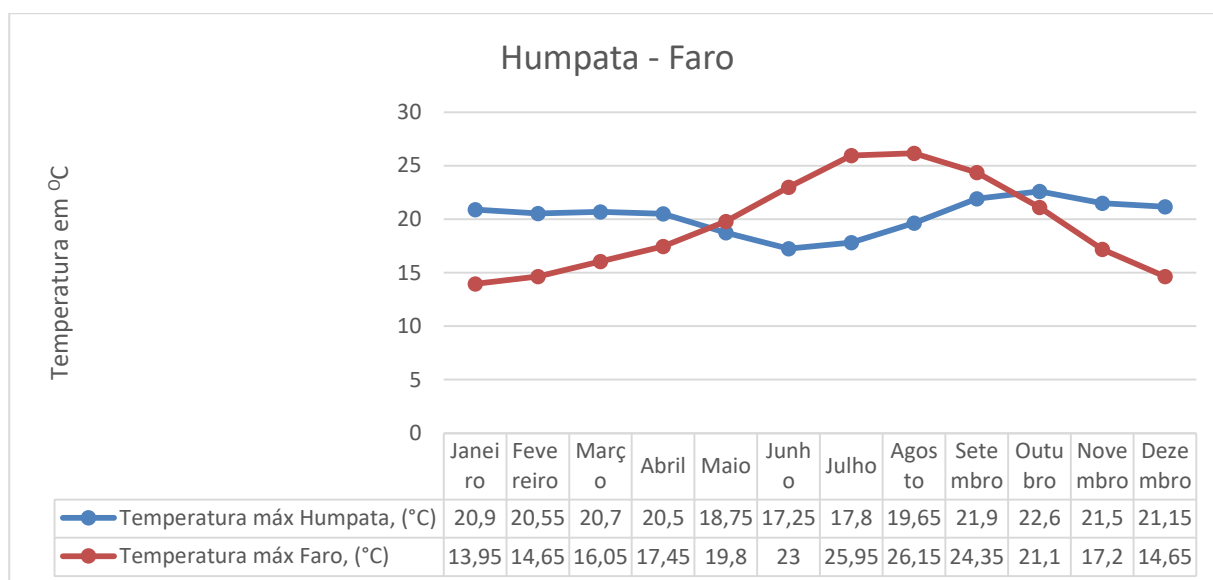


Figura 4.5 Comparação das temperaturas médias máximas entre a cidade de Faro e Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).

Uma vez escolhida a localização geográfica, o Paviflex determina a temperatura de serviço no pavimento com base nos dados de temperatura do ar relativos à localização escolhida, uma vez que a temperatura de serviço depende também da estrutura que se determina no dimensionamento.

- Tráfego

Para a quantificação da ação do tráfego são introduzidas informações relacionadas com o período de dimensionamento, a velocidade média do tráfego pesado ou o tempo de carregamento. Posteriormente, o número acumulado de eixos-padrão de 80 kN é determinado com base no tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, na taxa média de crescimento anual do tráfego pesado e no respetivo fator de agressividade. Na Figura 4.6 ilustra-se a caixa de diálogo do Paviflex relativa ao preenchimento dos dados de tráfego para o pavimento em estudo. Para os dados indicados, obteve-se um número de repetições de carga do eixo-padrão de 80 kN de 9,81 milhões, tal como se mostrou anteriormente para o MACOPAV.

Figura 4.6 Janela de introdução das características do tráfego no Paviflex

- Fundação e características do pavimento

A classe de fundação, o tipo de estrutura de pavimento e as dos materiais das camadas betuminosas são indicados no ecrã que se ilustra na Figura 4.7. Foi feito o dimensionamento apenas para o tipo de estrutura de pavimento que o *software* permite, ou seja, pavimento de base betuminosa. Considerou-se uma fundação da classe F3, com 100 MPa de módulo de deformabilidade, e as camadas betuminosas formadas por misturas convencionais com um betume do tipo 50/70.

Figura 4.7 Opções para a escolha do tipo de pavimento- Pavimento de base betuminosa

- Dimensionamento e seleção da estrutura de pavimento

Dos métodos de dimensionamento disponíveis no Paviflex, escolheu-se o método da Shell, tendo-se simulado a probabilidade de sobrevivência do pavimento de 95%, uma vez que a estrada da Serra da Leba é uma via estruturante da rede e fundamental ao desenvolvimento da atividade económica da região. Para os coeficientes de distribuição lateral dos rodados e de repouso entre carregamento consideraram-se os valores habituais para um pavimento novo, conforme a Figura 4.8.

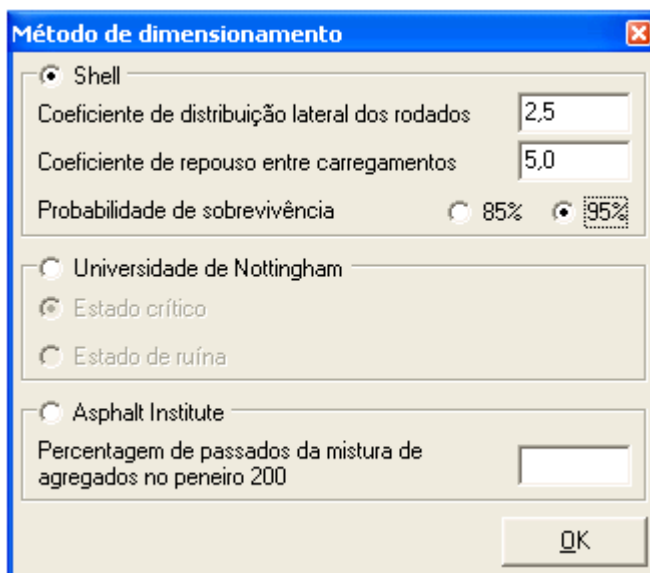


Figura 4.8 Ecrã de escolha do método de dimensionamento no Paviflex

Os métodos de dimensionamento considerados pelo programa permitem um processo de verificação do pavimento à fadiga e à deformação permanente. No menu cálculo foi efetuado o dimensionamento para os dois tipos de pavimento analisados. Os resultados são avaliados em função das ações do tráfego e da temperatura, calculando danos de fadiga e de deformação permanente no pavimento, o que permite determinar o dano global no período de vida útil considerado (Figuras 4.9). A estrutura de pavimento obtida têm as espessuras indicadas no Quadro 4.9.

Dados	Resultados		
Localização representativa: Faro	Mes	Dano Fadiga(%)	Dano Def. Permanente(%)
Método de dimensionamento: Shell	Janeiro	0,13	0,86
Coefficiente de distribuição lateral dos rodados = 2,5	Fevereiro	0,15	0,97
Coefficiente de repouso entre carregamentos = 5,0	Março	0,27	2,03
Probabilidade de sobrevivência = 95%	Abril	0,42	3,76
Tráfego	Maio	0,69	8,05
Período de dimensionamento = 20 anos	Junho	0,96	15,99
Velocidade da corrente de tráfego = 50 km/h	Julho	1,33	25,84
Tempo de Carregamento = 0,0200 s	Agosto	1,19	22,06
Tráfego médio diário anual = 250	Setembro	0,81	10,71
Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado = 3,0%	Outubro	0,48	4,36
Factor de agressividade do tráfego = 4,0	Novembro	0,22	1,54
Número acumulado de eixos padrão de 80 kN = 9,81 milhões	Dezembro	0,15	0,96
Pavimento flexível de base betuminosa	Total	6,80	97,12
Classe de fundação = F3 (100 MPa)			Temperatura Equivalente Fadiga = 25,64 °C
Tipo de Betume = 50/70			Temperatura Equivalente Deformação Permanente = 28,47 °C
Penetração do betume [25°C, 100g, 5s] = 60,0 0,1 mm			Espessura das camadas betuminosas = 21 cm
Volume de vazios no esqueleto de agregado da mistura = 16,0%			
Percentagem volumétrica de betume = 10,0%			
Percentagem volumétrica de agregado = 84,0%			
Porosidade = 6,0%			
Índice de penetração = -0,1627			
Temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (T _{abr}) = 57,2°C			

Figura 4.9 Dimensionamento do pavimento de base betuminosa no Paviflex

Quadro 4.9 Espessuras para o pavimento de base betuminosa dimensionado pelo Paviflex

Material	Esp das camadas betuminosas
Base betuminosa (20 cm de camada granular)	21 cm

4.3.4 Método da AASHTO 93

O método da AASHTO é uma metodologia de dimensionamento empírico-mecanicista que, tal como outras, considera na avaliação as condições do clima e do tráfego e, quando aplicável, as condições do pavimento existente. O nível de confiança no dimensionamento varia em função do grau de importância que a via tem no sistema rodoviário em que está integrada, permitindo, assim, um dimensionamento ajustado ao nível de risco pretendido.

Para o processo de dimensionamento pelo método da AASHTO recorreu-se à plataforma *on-line* PAVEXPress. O processo de dimensionamento será descrito à medida que se apresenta.

A PAVEXPress é uma ferramenta *on-line* que permite uma abordagem simplificada para dimensionar e avaliar projetos de estruturas de pavimentos, tanto flexíveis como rígidos. Para o processo de dimensionamento utiliza o método da AASHTO 93. O processo de dimensionamento é feito em quatro etapas que serão apresentadas a seguir (PAVEInstruct, 2018).

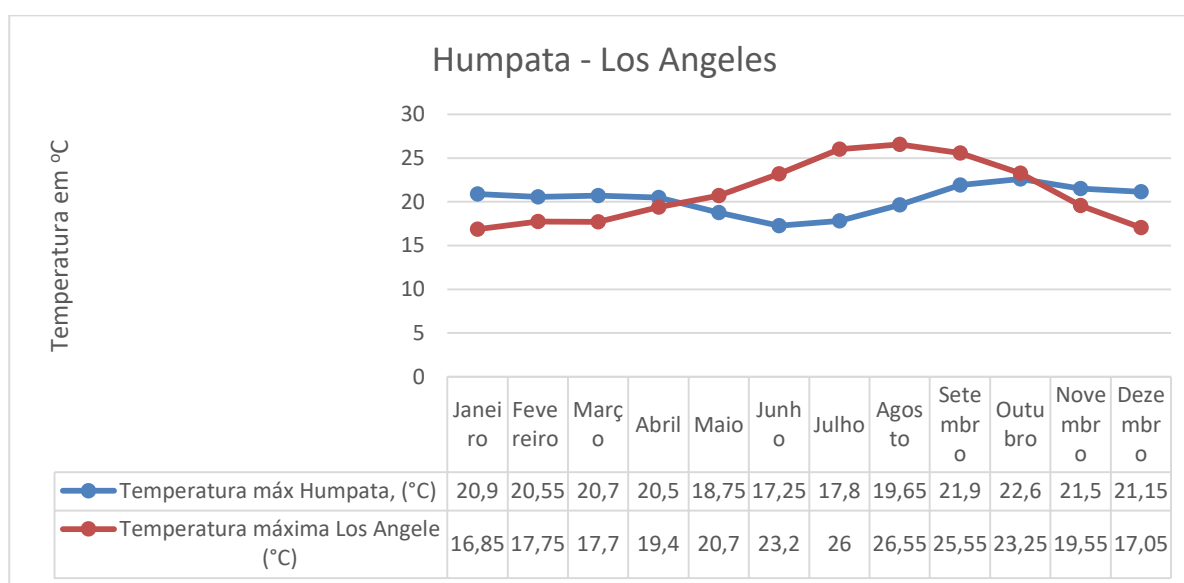
- Cenário de dimensionamento

No ecrã de entrada do PAVEXPress são introduzidas informações relacionadas com o projeto a ser executado, conforme se mostra na Figura 4.10. São indicados a designação do projeto, o estado americano onde se localiza a estrada, o ano de conclusão do projeto, a classificação da estrada (considerou-se semelhante a uma interestadual no caso em estudo) e o tipo de pavimento.

The screenshot shows two panels: 'Scenario Information' and 'Pavement Design'. The 'Scenario Information' panel includes fields for 'Scenario Name' (Serra da Leba), 'Scenario Description' (Pavimento de base granular), and 'State' (California). The 'Pavement Design' panel includes fields for 'Estimated Completion Year' (2020), 'Roadway Classification' (Interstate), and 'Project Type' (New - Asphalt).

Figura 4.10- Caixa de diálogo introdutória da plataforma PAVEXPress

Uma vez que a aplicação apenas considera localizações geográficas dos Estados Unidos da América, foi necessário escolher uma localização que simulasse de forma suficientemente satisfatória as condições de temperatura da Serra da Leba. Depois de várias tentativas, considerou-se que o estado da Califórnia, por ter cidades com climas semelhantes ao de Humpata, poderia ser considerado na simulação. A Figura 4.11 apresenta a comparação das temperaturas média máximas mensais do ar de Humpata com as das cidades de Los Angeles e de San Diego.



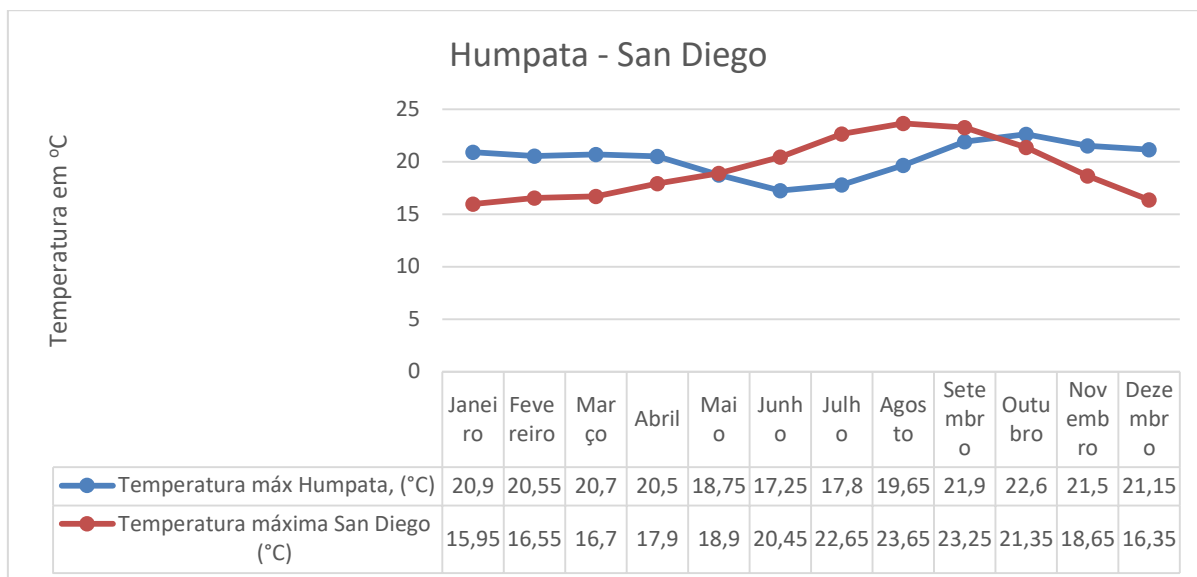


Figura 4.11 Comparação das temperaturas médias máximas mensais entre a cidade de Los Angeles, San Diego e Humpata (CLIMATE-DATA.ORG, 2020)

- Parâmetros de Projeto

Na segunda etapa do dimensionamento definem-se alguns parâmetros de projeto, tais como o período de dimensionamento (20 anos para o caso em estudo), nível de confiança (95% no caso em estudo, considerando a importância da estrada), e um erro, S_0 , de 5%, recomendado para pavimentos flexíveis para ter em conta a incerteza geral envolvida nos valores considerados para o tráfego e para o desempenho do pavimento.

No método de dimensionamento da AASHTO é necessário definir a qualidade de serviço (através do índice PSI – *present serviceability index* em inglês) pretendido para o pavimento aquando da sua entrada ao serviço (índice inicial), no final da vida (índice terminal), estabelecendo, assim, a variação do PSI pretendido ao longo do período de serviço. Na Figura 4.12 mostra-se um exemplo da variação do valor de PSI em função do tempo. O PSI varia entre valores de zero e cinco, sendo tanto mais elevado quanto melhor é a qualidade do pavimento. No caso em estudo considerou-se um valor de PSI de 4,5 para o pavimento novo e uma redução de 1,5 (Δ PSI) em 20 anos, de modo a considerar o valor terminal de 3, ou seja, o valor representativo do limite superior da gama de valores geralmente considerados aceitáveis. Na Figura 4.13 mostra-se o ecrã de entrada de dados.

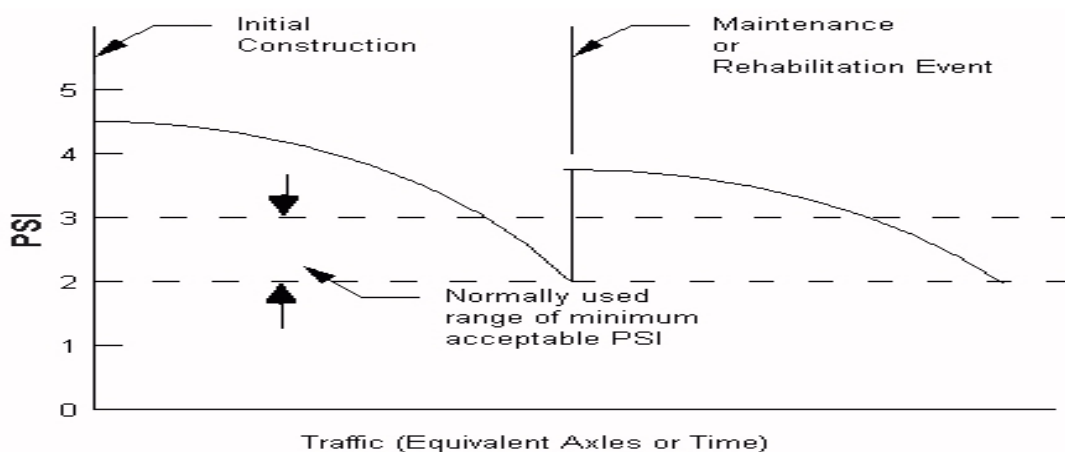


Figura 4.12 Variação indicativa do PSI do pavimento com o tempo (PAVEInstruct, 2018).

Design Parameters	Serviceability
Design Period ? <input type="text" value="20"/> years	Initial Serviceability Index (p_i) ? <input type="text" value="4.5"/>
Reliability Level (R) ? 95 ▾ $Z_R = -1.645$	Terminal Serviceability Index (p_t) ? <input type="text" value="3"/>
Combined Standard Error (S_0) ? <input type="text" value="0.5"/>	Change in Serviceability (ΔPSI) ? <input type="text" value="1.5"/>

Figura 4.13 Introdução dos parâmetros de projeto na plataforma da PAVEXPress

- Tráfego

A terceira etapa do dimensionamento consiste na definição da ação do tráfego. No caso em estudo optou-se por introduzir diretamente o número acumulado de eixos-padrão – ESALs – determinado anteriormente (Figura 4.14).

Traffic Data	Traffic Growth
Method of Determining ESALs ? Using AADT Annual ESALs Design ESALs	Total Design ESALs (W_{18}) ? <input type="text" value="9,800,000"/>

Figura 4.14 Introdução de dados de tráfego na plataforma da PAVEXPress

- Estrutura do Pavimento

Na quarta parte do dimensionamento determina-se a estrutura do pavimento, dividida em três camadas, a camada superficial, a intermédia e a de base, conforme se mostra na figura 4.15. Cada uma delas é caracterizada pela sua influência na capacidade resistente do pavimento (*Layer coef.*) bem como a sua espessura.

Pavement Structure (Flexible) (Asphalt)

Use Multiple Lifts ?

Yes ▾

Asphalt Layers

Layer	Layer Coef	Drainage	Thickness	Edit?
Surface	0.44	1	2 in.	
Binder/Intermediate	0.44	1	2 in.	
Base	0.44	1	? in.	

Figura 4.15 Camadas do pavimento (PAVEInstruct, 2018)

O coeficiente de drenagem representa a perda relativa de resistência da camada devido às condições de drenagem e o tempo total em que é exposta a condições de humidade desfavoráveis (Figura 4.16). O método da AASHTO 93 foi utilizado para o dimensionamento de um pavimento com sub-base granular.

Base Layers

Layer Type	Layer Coef.	Drainage Coef.	Thickness	Resilient Mod	Action?
Aggregate Base	0.14	1	4 in.	35000	

Add Layer

Subgrade

Resilient Modulus (M_R) ?

14500 psi **Calculate MR**

Figura 4.16 Definição das características da sub-base granular

Os módulos de resiliência da camada granular e da fundação (M_R) correspondem, respetivamente, a cerca de 240 MPa e 100 MPa, o que é semelhante à gama de valores considerados anteriormente nos métodos utilizados.

Após a introdução de todos os dados na plataforma, foi gerada uma estrutura com 7,5 polegadas (19 cm) de camadas betuminosas e 8 polegadas de camada granular (20 cm), conforme se mostra na Figura 4.17.

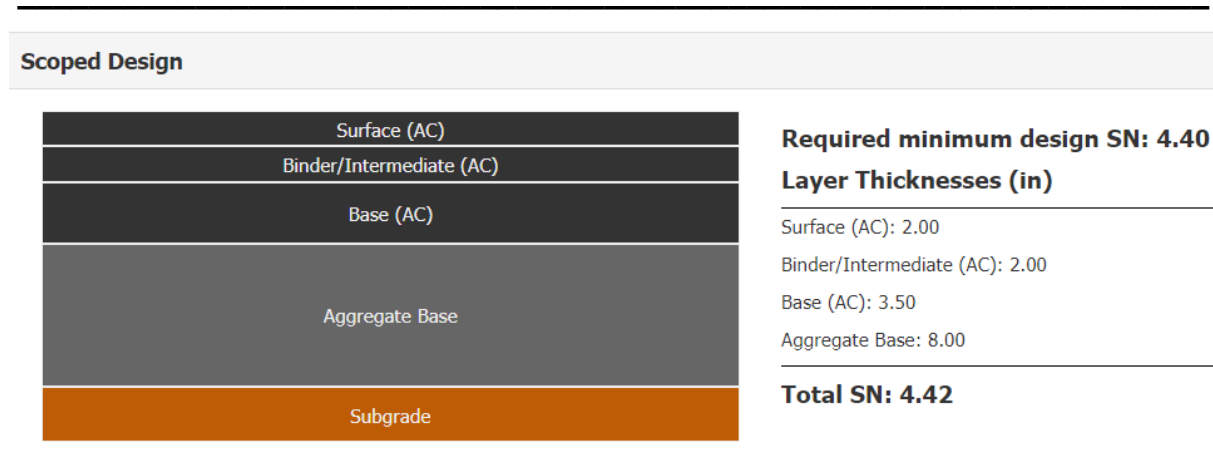


Figura 4.17 Estrutura de pavimento dimensionado para a estrada da serra da Leba pelo método da AASHTO 93

4.3.5 Comparação das Estruturas Pré-dimensionadas por Diferentes Metodologias

O estudo feito por diferentes métodos para definir a estrutura do pavimento novo da estrada da Serra da Leba serve de base para comparar as diferentes propostas de estrutura de pavimento. De forma a facilitar a escolha da estrutura que melhor se adapta às características da estrada em estudo, optou-se por fazer uma representação gráfica (Figuras 4.18 e 4.19) para ilustrar as espessuras das estruturas dos pavimentos obtidas.

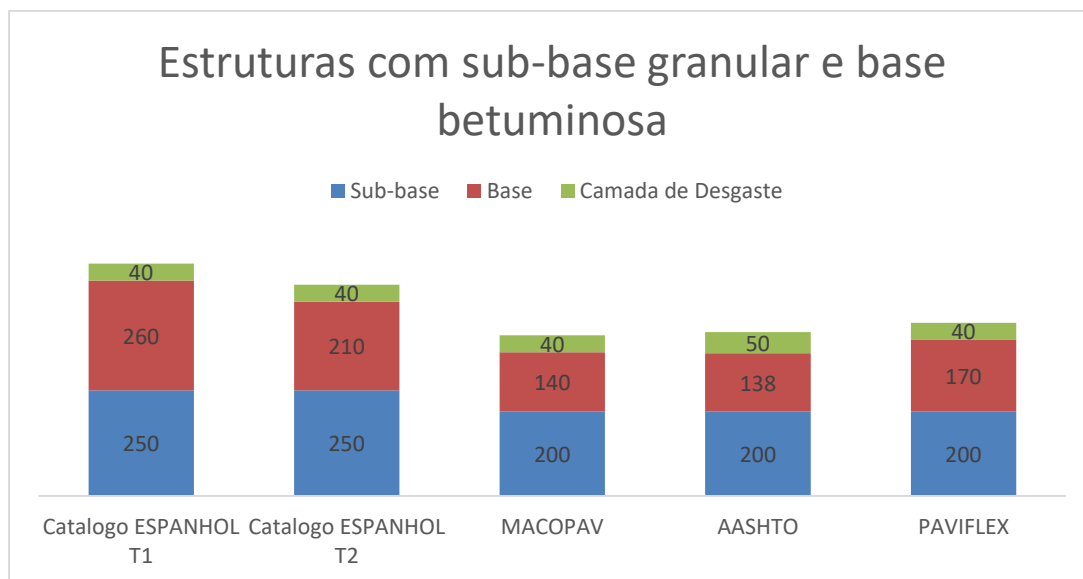


Figura 4.18 Estruturas propostas por diferentes manuais com sub-base granular e base betuminosa

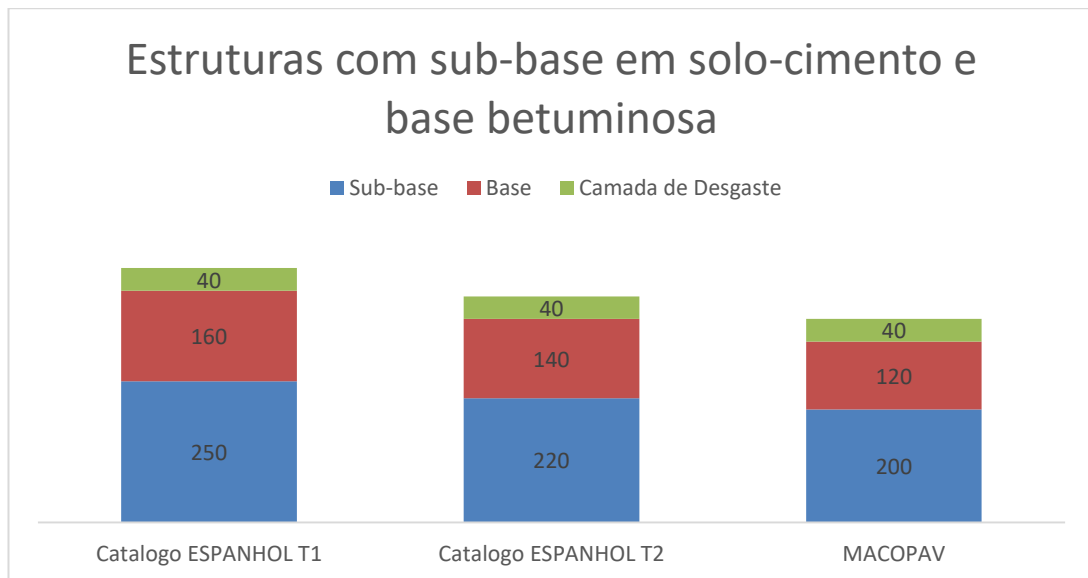


Figura 4.19 Estruturas propostas por diferentes manuais com a sub-base em solo-cimento

Para o caso em estudo, após analisadas as estruturas consideradas, optou-se por prosseguir tendo como referência as propostas obtidas pelos diferentes métodos. Uma vez que não se conhece com precisão a estrutura de pavimento existente na estrada da Serra da Leba, vão considerar-se dois cenários distintos, um com uma espessura próxima dos menores valores obtidos e um semelhante às maiores espessuras obtidas.

4.4 Dimensionamento Empírico-Mecanicista pelo Método da Shell

O dimensionamento empírico-mecanicista pelo método da Shell considera critérios de ruína de fadiga e de deformação permanente no pavimento para determinadas circunstâncias de solicitação e de propriedades dos materiais constituintes. Em geral, a estrutura é modelada através de um sistema de múltiplas camadas considerando um comportamento linear elástico. O *software* BISAR, desenvolvido pela Shell, calcula tensões e deformações em qualquer ponto do pavimento proposto para determinadas combinações de carga, atuando na superfície do pavimento, podendo ainda considerar deslizamento entre camadas (falta de aderência entre elas). O material de cada camada é caracterizado pelos seus módulos de rigidez e coeficiente de Poisson (Tavallae, Santos, & Neves, 2016).

Uma vez que não se dispõe de informação fidedigna sobre a constituição do pavimento da estrada da Serra da Leba, para a realização do dimensionamento empírico-mecanicista do pavimento foram considerados os dois cenários indicados no Quadro 4.10.

Também foram tidas em conta as temperaturas do ar determinadas em 4.2 para um w-MAAT de 21° C. Com base neste valor foi determinada a temperatura de serviço nas camadas betuminosas de acordo com as espessuras dos dois cenários.

Quadro 4.10- Características dos pavimentos e informações complementares

Cenários	Camadas	Espessuras (cm)	Temperatura nas camadas	Observações
Pavimento de 17 cm	Desgaste	4	32	Temperatura de serviço 21 °C
	Betuminosas	13	31	
	Sub-base granular	20		
Pavimento de 26 cm	Desgaste	4	32	
	Betuminosas	22	30	
	Sub-base granular	20		

A previsão dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas é efetuada a partir de fórmulas desenvolvidas com base em ensaios de cargas repetidas. Para isso, é necessário considerar o parâmetro rigidez do betume, de acordo com as expressões 4.3 e 4.4:

$$s_b = 1,157 \times 10^{-7} \times t_c^{-0,368} \times 2,718^{-IPen} \times (Tab - T)^5 \quad (4.3)$$

Em que:

Sb – rigidez do betume (MPa);

tc – tempo de carregamento (s);

IPen – índice de penetração do betume;

Tab – temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola (°C);

T – temperatura de serviço (°C).

$$IPen = \frac{20 \times Tab + 500 \times \log(\text{pen}25) - 1955,55}{Tab - 50 \times \log(\text{pen}25) + 120,15} \quad (4.4)$$

Em que:

Tab – temperatura de amolecimento (°C) pelo método do anel e bola;

pen 25 – penetração do betume a 25 °C do betume recuperado, calculado pela expressão (4.7).

A expressão é válida se:

$$\begin{aligned} 20^\circ C &\leq (Tab - T) \leq 60^\circ C \\ 0,01s &\leq t_c \leq 0,1s \\ -1 &\leq IPen \leq 1 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Para o cálculo de Tab é usada a expressão (4.6):

$$Tab_r = 99,13 - 26,53 \times \log(pen25_r) \quad (4.6)$$

Em que:

r – índice que indica que a grandeza se refere a betume recuperado de misturas de serviço, nas quais já ocorreu o envelhecimento correspondente ao fabrico e colocação da mistura em obra.

$$pen25_r = 0,65 \times pen25 \quad (4.7)$$

Pela seguinte expressão (4.8) determina-se o tempo de carregamento:

$$tc = \frac{1}{V} = \frac{1}{50} = 0,02s \quad (4.8)$$

Em que:

V – representa a velocidade média da corrente de tráfego pesado (km/h);

O tempo de carregamento deve estar compreendido entre 0,01 e 0,1 segundos.

Para estas análises utilizar-se-ão os dados já considerados para o uso do *software* Paviflex, adaptando apenas a correção da temperatura de serviço em função das espessuras consideradas. Os valores do índice de penetração e da rigidez do betume são apresentados no quadro 4.11.

Quadro 4.11- Cálculo de S_b

Designação AC 20 bin 50/70	Esp cm	TS (°C)	P25 (0,1 mm)	Tab (°C)	P25r (0,1 mm)	Tabr (°C)	IPen	V (km/h)	t (s)	Sb (MPa)
Pav. de 17 cm	4	32	60,0	57,2	39,00	57,20	-0,16	50	0,020	5,8
	13	31	60,0	57,2	39,00	57,20	-0,16	50	0,020	7,1
Pav. de 26 cm	4	32	60,0	57,2	39,00	57,20	-0,16	50	0,020	5,8
	17	30	60,0	57,2	39,00	57,20	-0,16	50	0,020	8,6

- Módulos de Deformabilidade

Para o método empírico-mecanicista da Shell a previsão do modelo de deformabilidade, E_m , para uma rigidez do betume, S_b , é obtido a partir da expressão (4.9).

$$5 \text{ MPa} < S_b < 1000 \text{ MPa}$$

Parâmetro A:

$$A = \frac{S_{89} + S_{68}}{2} \times (\log S_b - 8) + \frac{S_{89} - S_{68}}{2} \times |\log S_b - 8| + S_{m108} \quad (4.9)$$

Sendo:

$$S_{89} = 1,12 \times \frac{S_{m3109} - S_{m108}}{\log 30}$$

$$S_{68} = 0,6 \times \log \frac{1,37 \times v_b^2 - 1}{1,33 \times v_b - 1}$$

$$S_{m3109} = 10,82 - \frac{1,342(100 - v_a)}{v_a + v_b}$$

$$S_{m108} = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \times v_a + 2,35 \times 10^{-4} \times v_a^2$$

Em que:

v_b – volume de betume (%);

v_a – volume de agregados (%).

Quadro 4.12- Módulos de deformabilidade – Método da Shell

Designação		Betume	Vb (%)	Va (%)	S _{m108}	S _{m3109}	S ₆₈	S ₈₉	A	E _m (MPa)
Pav. 17 cm	Desgaste	50/70	10,0	84,0	9,98	10,59	0,63	0,46	9,16	1626
	Base/ligação	50/70	10,0	84,0	9,98	10,59	0,63	0,46	9,21	1837
Pav. 26 cm	Desgaste	50/70	10,0	84,0	9,98	10,59	0,63	0,46	9,16	1626
	Base/ligação	50/70	10,0	84,0	9,98	10,59	0,63	0,46	9,26	2065

Para a fundação do pavimento considerou-se um módulo de deformabilidade de 80 MPa que é o limite inferior proposto pelo MACOPAV para uma fundação da classe F3, tendo-se considerado um coeficiente de Poisson de 0,35.

Para as camadas granulares determinou-se o módulo de deformabilidade (E_{cg}) pela expressão (4.10).

$$E_{cg} = K \times E_{sf} \quad (4.10)$$

Em que:

$$k = 0,2 \times h_g^{0,45}$$

hg- é a espessura da camada granular sobre o solo de fundação, em mm;

Esf – módulo de deformabilidade da fundação.

No quadro 4.13 são apresentados os valores já calculados dos módulos de deformabilidade, para dada camada do pavimento correspondente aos três cenários.

Quadro 4.13 Módulos de deformabilidade das camadas

Pavimento de 17 cm		Pavimento de 26 cm		Coeficiente de Poisson
Espessuras (cm)	Módulos (MPa)	Espessuras (cm)	Módulos (MPa)	
4	1626	4	1626	0,35
13	1837	22	2065	
20	174	20	174	
100	80	100	80	

Realizada a caracterização mecânica das diversas camadas constituintes do pavimento e a caracterização geométrica, procedeu-se à análise das tensões e deformações. Na análise realizada foi usado o modelo de Burmister (análise com base na teoria da elasticidade), recorrendo ao Bisar 3.0.

Considerou-se o eixo-padrão de 80 kN, formado por dois rodados de duas rodas gêmeas, com a geometria do método da Shell, ou seja, uma distância de 105 mm entre as rodas e um raio da área carregada de 105 mm, correspondendo a uma pressão de contacto de 570 kPa.

Neste método a lei de comportamento à fadiga é dada pela expressão 4.11.

$$\varepsilon_t = \frac{0,856 * Vb + 1,08}{E_m^{0,36} * N^{0,2}} \quad (4.11)$$

Em que:

ε_t - extensão de tração na face inferior das camadas betuminosas (adimensional);

N – número de eixos-padrão de 80 kN;

V_b – percentagem volumétrica de betume;

Em – módulo de deformabilidade da mistura (Pa).

A lei de deformação permanente considerada no método da Shell é a data pela expressão (4.12):

$$\varepsilon_{dp} = k_s * N_{80}^{-0,25} \quad (4.12)$$

Em que:

ε_{dp} – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação;

N_{80} – número de eixos-padrão de 80 kN;

K_s – parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento (50%, 85% e 95% de probabilidade de sobrevivência).

A percentagem do dano é dada pela expressão (4.13):

$$D_{dp} = \frac{N_{80}}{N_{adm}} \times 100 \quad (4.13)$$

Em que:

N_{80} - número acumulado de repetições de carga;

N_{adm} - número admissível de repetições de carga.

Nos quadros 4.14 e 4.15 apresenta-se o resultado da avaliação do dano de fadiga e de deformação permanente para os dois cenários analisados.

Quadro 4.14 - Danos de fadiga

Designação	ε_t	Vb (%)	F	Em (Pa)	$N_{adm}(x10^6)$	$N_{80}(x10^6)$	Dano
Pav. 17 cm	0,000241	10	4	1836947281	8,72	9,80	112%
Pav. 26 cm	0,000140	10	4	2065485876	106,63	9,80	9%

Quadro 4.15 - Danos de deformação permanente

Designação	Observação	ε_{dp}	$N(x 10^6)$	N passa	Dano
Pav. 17 cm	95% sobrev.	0,000525	1,38	9,80	708%
Pav. 26 cm		0,000309	11,53	9,80	85%

Os cenários estudados mostram que a estrutura inicialmente construída no pavimento da estrada da serra da Leba seria manifestamente insuficiente. Mesmo a estrutura com 17 cm de camadas betuminosas apresentou um dano muito acima de 100%, o que evidencia insuficiência estrutural. A estrutura com 26 cm de camadas betuminosas sobre 20 cm de camadas granulares, afigura-se como a estrutura adequada para o tráfego de pesados e as condições de solicitação do pavimento da estrada da serra da Leba.

4.5 Método de Dimensionamento Empírico-Mecanicista MeDiNa

O MeDiNa é um *software* para dimensionar e verificar estruturas de pavimentos rodoviários, recorrendo a um método empírico-mecanicista de análise elástica de múltiplas camadas de pavimento. No processo de análise são calculadas tensões e deformações na estrutura do pavimento, induzidas pelo carregamento das rodas dos veículos pesados. Além disso, a metodologia considera modelos de fadiga e deformação permanente específicos para ajustar as espessuras das camadas do pavimento (Franco & Motta, 2020).

O programa foi desenvolvido por Filipe Franco, em 2007, na sua tese de doutoramento intitulada “Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos-SisPaV”. No ano de 2013, após atualização, o *software* foi denominado SisPaVBr. No intervalo de tempo entre 2015 a 2018, através de uma parceria celebrada entre o Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR), o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRI) e centro de pesquisa da Petrobrás, foi criada a primeira versão para testes do MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), tendo sido tornada pública a primeira versão em 2 de março de 2018. O *software* já conta com mais duas versões após a primeira, sendo a última versão a 1.1.4), de 30 de junho de 2020. É importante referir que o método MeDiNa recebeu o acrónimo em homenagem ao professor emérito da COPPE/UFRJ, Jacques de Medina 1924-2019 (Franco & Motta, 2020).

O MeDiNa faz parte de um pacote de programas que auxiliam o processo de dimensionamento de pavimentos. Um destes programas é o AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas). Trata-se de um programa de computador de análise de camadas elásticas desenvolvido como uma componente dos programas de MeDiNa e BackMeDiNa, permitindo, assim, combinar carregamentos com mais de uma roda, por meio do princípio da sobreposição de efeitos e de elasticidade linear, permitindo assim a avaliação do desempenho do pavimento.

Para o processo de cálculo do pavimento da Serra da Leba, admitiram-se cenários para o dimensionamento da estrutura nova semelhantes aos considerados anteriormente neste trabalho. Assim, o quadro 4.16 apresenta os cenários a serem dimensionados e os módulos de deformabilidade dos pavimentos considerados.

Quadro 4.16 – Constituição dos pavimentos para o dimensionamento com o MeDiNa

Cenários				
Pavimento de 17 cm		Pavimento de 26 cm		Coeficiente de Poisson
Espessuras (cm)	Módulos (MPa)	Espessuras (cm)	Módulos (MPa)	
4	1626	4	1626	0,35
13	1837	22	2065	
20	174	20	174	
100	80	100	80	

- Interface do Software MeDiNa e processo de dimensionamento

O programa é constituído por um menu principal que está dividido nas seguintes opções: Projeto; Editar; Análise; e Ajuda.

- O Menu Projeto disponibiliza as funções para manipular os arquivos de dados do programa, com as seguintes opções de execução: pavimento novo; reforço; abrir; salvar; salvar como; e sair.
- Menu Editar permite navegar entre as subsecções estruturas e modelação do programa e ainda, recuperar a base de dados.
- Menu Análise é constituído pelas seguintes opções: dimensionar a estruturas; avaliar a estrutura; tensões e deformações no AEMC; e resultados.

- Menu Ajuda permite aceder ao manual de utilização do MeDiNa.

A figura 4.21 mostra a introdução da informação relativa ao pavimento.

MeDiNa - v.1.1.4.0 - agosto/2020

Projeto Editar Análise Ajuda

ESTRUTURA MODELAGEM RESULTADOS

RESPONSÁVEL: Euclides Bengui EMPRESA: ISEC

PROJETO: Identificação da via, rodovia, trecho, km, estaca, etc MODO: Pavimento Novo (Nível A)

Alterar Estrutura >>

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	DESGASTE	5,0	1626	0,35
>> 2 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	REGULARIZAÇÃO	14,7	1837	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	GRANULAR	20,0	174	0,35
SL	SUBLEITO	solo leba	0,0	80	0,35

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO

DADOS DO TRÁFEGO

Tipo de Via: Sistema Arterial Principal

VMD (1º ano): 250

FV: 3,999

N anual (1º ano): 3,65e+05

% Veículos na faixa de projeto: 100

N Anual da faixa: 3,65e+05

Taxa de crescimento (%): 3,0

Período de projeto (anos): 20

N Total: 9,81e+06

Figura 4.20 Ecrã de entrada do *software* MeDiNa

Antes de se preencher os dados do projeto é necessário definir-se o tipo de dimensionamento que se pretende efetuar (pavimento novo ou reforço do pavimento existente). Para um pavimento novo as propriedades são obtidas em laboratório. Para o reforço de pavimento as propriedades são obtidas por retroanálise. Para a simulação pretendida, foram utilizados os dados do laboratório da base de dados do programa para o dimensionamento do pavimento novo, fazendo apenas alterações aos valores dos coeficientes de Poisson e dos módulos de deformabilidade (figura 4.20), de modo reproduzir o que tinha sido efetuado para o método da Shell.

- Definição da Estrutura do Pavimento no Software MeDiNa

O programa tem pré-definidas 4 camadas de pavimento, incluído a fundação do pavimento (designada subleito), sendo possível considerar um máximo de 8 e um mínimo de 3 camadas. Na tabela que exhibe a estrutura do pavimento são apresentadas informações resumidas das propriedades de cada uma das camadas da estrutura do pavimento, tais como: o material que constitui cada camada, a sua espessura, o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson, conforme a figura 4.21, na qual se apresentam as características do pavimento com 17 cm de camadas betuminosas do caso em estudo.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	DESGASTE	5,0	1626	0,35
>> 2 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	REGULARIZAÇÃO	12	1837	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	GRANULAR	20,0	174	0,35
SL	SUBLEITO	solo leba	0,0	80	0,35

Figura 4.21 Estrutura do Pavimento de 17 cm da estrada da Serra da Leba no *software* MeDiNa.

É importante referir que, para o dimensionamento, o programa admite um valor mínimo de 5 cm para as espessuras das camadas, pelo que a camada de desgaste foi considerada com essa espessura.

- Materiais e Suas Propriedades

Na aba propriedades o *software* apresenta uma base de dados na qual constam materiais e suas propriedades, obtidas por meio de ensaios laboratoriais. Também existe a possibilidade de inserção de dados de pesquisa do utilizador. Os materiais que se encontram na base de dados do *software* possuem propriedades fixas, não permitindo qualquer alteração. Cada camada do pavimento tem uma janela com as suas respetivas propriedades, conforme ilustra a figura 4.22.

Propriedades da Camada 1

BASE DE DADOS

- Projeto
- Classe 1
- Classe 2
- Classe 3
- Classe 4
- RJ CAP 50/70 #12,5mm Sepetiba
- RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba
- RJ CAP 30/45 #19,1mm Sepetiba
- RJ CAP 50/70 #19,1mm Sepetiba
- REFORÇO
- REGULARIZAÇÃO
- DESGASTE

CONCRETO ASFÁLTICO

Material: DESGASTE

Parâmetros

- Espessura (cm): 5,0
- Coefficiente de Poisson: 0,35
- Contacto: Aderido

Módulo (MPa)

- Modelo Constituinte: Resiliente Linear
- Módulo (MPa): 1626

Características

- Norma ou Especificação: DNIT ES 31
- Abração Los Angeles (%): 40
- Faixa Granulométrica: 12,5
- Volume de vazios (%): 5
- Teor de asfalto (%): 6
- Resistência à tração (MPa): 1,91
- Massa específica (g/cm³): 2,6
- Tipo de CAP: CAP 50/70- PG 64 -16

Curva de Fadiga

- Modelo: k1 .(et ^ k2)
- Coefficiente de Regressão (k1): 5,496e-11
- Coefficiente de Regressão (k2): -3,253
- Classe de Fadiga: 4
- FFM (100µ a 250µ): 4,82

Excluir Atualizar Salvar OK Cancel

Figura 4.22 – Janela propriedades dos materiais betuminosos - MeDiNa

O programa MeDiNa divide os materiais asfálticos em três conjuntos: as camadas tradicionais, as camadas betuminosas com betume modificado com polímeros e as camadas betuminosas com incorporação de borracha.

O MeDiNa usa informações obtidas em ensaios por compressão diametral realizados a 25°C, com os quais foi calibrado o *software*, para obtenção do comportamento das misturas em relação à fadiga. A expressão 4.14 representa a lei de comportamento cujos parâmetros k_1 e k_2 são obtidos por regressão estatística dos resultados do ensaio (Fritzen, Franco, Nascimento, Motta, & Ubaldo., S/D).

$$N = k_1 \times \varepsilon_t^{k_2} \quad (4.14)$$

Em que:

N – é a vida de fadiga em laboratório;

ε – é a extensão de tração;

k_1 e k_2 – são constantes de regressão.

Para a avaliação da resistência à fadiga, o programa MeDiNa utiliza o estado de tensão calculado em dez pontos na superfície, espaçados de 3,65 cm, e mais dez pontos na fibra inferior da última camada betuminosa. O dano de fadiga é calculado em cada um dos vinte pontos e é feita a média. Com esta média o programa MeDiNa calcula a área fendilhada previsível (Franco & Motta, 2020).

Os chamados fatores de fadiga da mistura (FFM) permitem comparar misturas diferentes em relação à resistência à fadiga. Misturas com valores maiores de FFM e de módulo de deformabilidade tenderão a melhores resistências à fadiga. Para bases com módulo elevado, as deformações de tração estão geralmente fora do intervalo de cálculo do FFM de 100 μ a 250 μ , (Fritzen, Franco, Nascimento, Motta, & Ubaldo., S/D).

O MeDiNa utiliza um modelo de separação de misturas baseados em classes de fadiga conforme se indica a seguir:

- Classe 1 e 2 – misturas formuladas por métodos que não se focam no desempenho das misturas à fadiga; 54% das misturas são constituídas por ligantes não modificados;
- Classe 3 e 4 – misturas mais difíceis de serem obtidas, pois requerem um desempenho superior, incorporando agentes modificadores no ligante; 50% das misturas incorpora betume modificado (Fritzen, Franco, Nascimento, Motta, & Ubaldo., S/D).

As classificações são apresentadas na figura 4.23, mostrando-se a forma como foram separados os materiais em classes.

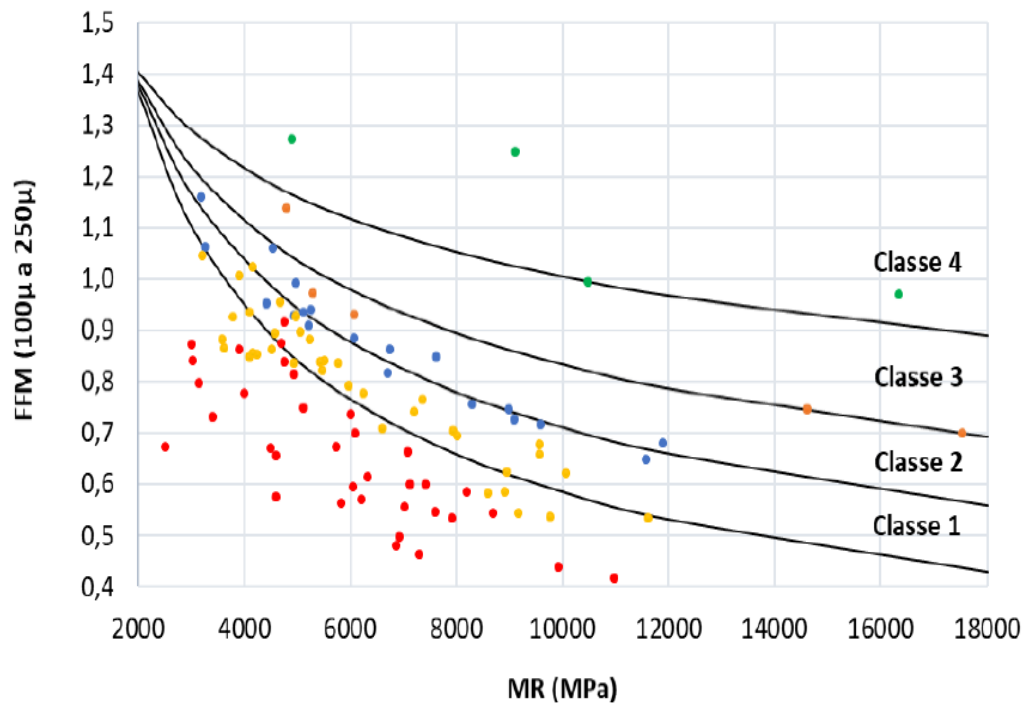


Figura 4.23 – Classificação das misturas betuminosas em relação ao desempenho à fadiga – MeDiNa, (Fritzen, Franco, Nascimento, Motta, & Ubaldo., S/D).

Para o caso em estudo foram tidas em consideração as propriedades baseadas na classe de fadiga 1 e 2, tanto para o dimensionamento dos pavimentos novos como para o dimensionamento do reforço.

Para as deformações permanentes, o programa utiliza um modelo melhorado do proposto por (Guimarães, 2009), baseado em solos tropicais e na geomorfologia brasileira. Este modelo considera a deformação permanente em função de parâmetros como deformabilidade, tensão confinante, tensão desviatória e número de ciclos de repetição de cargas (Antunes, Guimarães, & Marques, 2020). A expressão 4.15 representa a lei de comportamento considerada.

$$\varepsilon_p = \Psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\Psi_2} \times \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\Psi_3} \times N^{\Psi_4} \quad (4.15)$$

Em que:

ε_p - deformação permanente;

$\Psi_{1,2,3,4}$ – Parâmetros da regressão;

σ_3 – tensão confinante;

ρ_0 - tensão de referência;

N- número de ciclos de aplicação de carga.

Para a análise relativa à deformação permanente, o programa MeDiNa utiliza o estado de tensão calculado nos pontos sob a roda e entre as rodas (figura 4.24), no centro das camadas. A deformação permanente calculada para cada camada é somada para determinar a deformação permanente total (Franco & Motta, 2020).

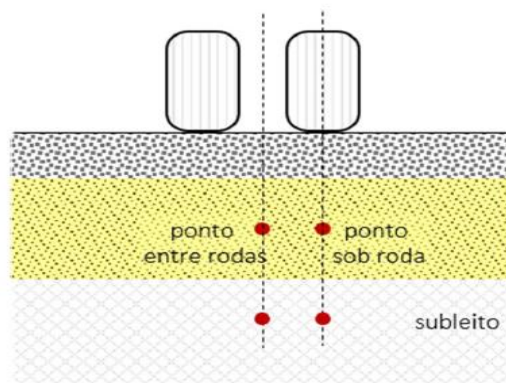


Figura 4.24 – Pontos do pavimento onde se calcula a deformação permanente MeDiNa, (Franco & Motta, 2020).

A base de dados do MeDiNa estabelece para cada mistura valores constantes de k_1 e k_2 bem como valores para o FFM apresentados no quadro 4.17.

Quadro 4.17 - Valores constantes dos parâmetros usados pelo MeDiNa (Franco & Motta, 2020).

Classe da Mistura	Coefficientes de Regressão K1	Coefficientes de Regressão K2	Classe de fadiga	FFM (100 μ a 250 μ)
Classe 1	5,496 e -11	-3,253	1	0,84
Classe 2	1,11e-13	-3,979	2	0.86
Classe 3	1e-12	-3,75	3	0,90
Classe 4	1,91e-5	-1,9	4	1

- Definição do Tráfego e do Tipo de Via

O *software* utiliza o conceito do número equivalente de eixos-padrão para representar a estimativa da ação do tráfego. Esse valor de N baseia-se em informações do volume médio diário (VMD) de veículos pesados em conjunto com o chamado fator de veículos (FV).

Para o cálculo do fator de veículos, o programa tem uma janela opcional interativa na qual constam vários tipos de eixos de veículos (figura 4.25).

Para o caso em estudo, uma vez que não é conhecida a distribuição de cargas por eixo, foram selecionados os seguintes eixos e suas percentagens de forma a garantir o fator de agressividade (F.V.) de aproximadamente 4 e o número N semelhantes aos utilizados anteriormente: eixos simples (34,5%); dois eixos simples-direcional (10%); eixos de roda dupla (26%); dois eixos

Quadro 4.18 - Tipos de vias e níveis de confiança a considerar no dimensionamento (Franco & Motta, 2020)

Tipos de Vias	Confiabilidade	Área Fendilhada	Def. Permanente
Sistema Arterial Principal	95%	30%	10 mm
Sistema Arterial Primária	85%	30%	13 mm
Sistema Arterial Secundária	75%	30%	20 mm
Sistema Coletor Primário	85%	30%	13 mm
Sistema Coletor Secundário	75%	30%	20 mm
Sistema Local	65%	30%	20 mm

- Dimensionamento de Pavimentos – MeDiNa

Para o processo inicial de dimensionamento dos pavimentos novos foi preenchido o campo “estrutura” do MeDiNa com as informações de cada camada: módulos de deformabilidade, espessuras, e coeficientes de Poisson. A figura 4.26 mostra a janela do software para o pavimento de 17 cm.

O processo de dimensionamento com o *software* MeDiNa é feito selecionando a camada para a qual se deseja fazer a análise. O programa avalia a espessura necessária (espessura da camada em estudo), em função do período indicado no processo de dimensionamento da estrutura (no caso 20 anos), analisando o dano mensal que a estrutura vai ter até ao horizonte de projeto.

Alterar Estrutura >>					
CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	DESGASTE	5,0	1626	0,35
>> 2 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	REGULARIZAÇÃO	12	1837	0,35
3	MATERIAL GRANULAR	GRANULAR	20,0	174	0,35
SL	SUBLETTO	solo leba	0,0	80	0,35

Figura 4.26 - Estrutura inicial do pavimento de 17 cm – MeDiNa

Após início do dimensionamento na aba “Análise – dimensionamento”, para os dois tipos de pavimento, obteve-se um alerta do programa – “a espessura da camada atingiu o limite superior previsto” conforme a figura 4.27. Tanto o pavimento de 17 cm como para o de 26 cm, com os módulos indicados no quadro 4.16, não satisfazem o critério de fadiga para a metodologia do MeDiNa.

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **99,0%**.
Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **3,1mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

A

Área trincada prevista no pavimento no fim do período: **60,3%**.
Afundamento de Trilha de Roda previsto no pavimento no fim do período: **1,8mm**

ALERTAS

- Esta análise não constitui o dimensionamento da estrutura do pavimento!
- Tráfego elevado para a estrutura proposta.

B

Figura 4.27 – Alerta do MeDiNa – Tráfego elevado para a estrutura: a) estrutura do pavimento de 17 cm; b) estrutura do pavimento de 26 cm

No final do projeto o pavimento apresentaria áreas fendilhadas superiores a 30% para os dois pavimentos. Uma vez que no processo de dimensionamento o MeDiNa admite um máximo de 30% da área fendilhada do pavimento no final do tempo de vida, o é dano superior ao obtido pelo método da Shell. Assim, torna-se necessário fazer um dimensionamento para um pavimento novo com base nos critérios do MeDiNa para uma temperatura de serviço de 28°C, correspondente a um módulo de deformabilidade de 2690 MPa para as camadas de base, conforme apresentado na figura 4.28.

CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
1	CONCRETO ASFÁLTICO	DESGASTE	5,0	1626	0,35
>> 2 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	REGULARIZAÇÃO	11,2	2690	0,35
3	CONCRETO ASFÁLTICO	REGULARIZAÇÃO	15	2690	0,35
4	MATERIAL GRANULAR	GRANULAR	20,0	174	0,35
SL	SUBLEITO	solo leba	0,0	80	0,35

Figura 4.28 – Estrutura nova para um dimensionamento pelo MeDiNa

Verifica-se que para cumprir o critério de dimensionamento de área fendilhada máxima de 30%, o MeDiNa considera uma camada de ligação adicional com propriedades iguais às da camada de base, uma vez que o programa limita as espessuras de cada camada a um máximo de 15 cm. Após o dimensionamento, a espessura indicada pelo MeDiNa foi de 11,2 cm.

- Análise e Relatório do Dimensionamento do Pavimento

O MeDiNa gera um relatório associado ao processo de dimensionamento, o qual se sintetiza no quadro 4.19 e nos parágrafos seguintes.

Quadro 4.19 Resumo da análise dos pavimentos novos

Classe	Análise do Pavimentos	Pavimento Novo
I	Nível de confiabilidade da análise	95%
	Área de fendas estimada do pavimento no final do período	28,3%
	Profundidade das rodeiras	1,3 mm

Observações da análise feita para o novo pavimento:

- A profundidade de rodeira foi estimada para o final de vida do projeto, sendo na camada granular de 0,76 mm e na fundação de 0,52 mm, perfazendo um total de 1,3 mm, conforme se indicou no quadro 4.18.
- O MeDiNa determina os danos mensais que o pavimento vai sofrendo até atingir o seu tempo de via estimado (240 meses).
- O MeDiNa no seu processo de dimensionamento determina as deflexões de cada camada do pavimento, usando modelos de simulação de ensaios com a Viga Benkelman, com um raio da área carregada de 10,8 cm e uma carga de 8,2 toneladas-força, e com FWD (falling weight deflectometer) com uma placa de carga com 15 cm de raio e uma carga de 4 toneladas-força.

Após o dimensionamento do pavimento para uma vida útil de 20 anos, obtiveram-se as espessuras indicadas na figura 4.29.

Camada	Espessuras (cm)	Módulos (MPa)
Desgaste	5	1626
Ligação e base	26,2	2690
Sub-base	20	174
Fundação	100	80

Figura 4.29 Espessuras finais após o dimensionamento do Pavimento

Os resultados permitem concluir que é o fendilhamento por fadiga que condicionam a geometria do pavimento quando se utiliza o MeDiNa, enquanto no método da Shell é o critério da limitação de deformação permanente que é dimensionante. Verificou-se que as leis de fadiga do MeDiNa são muito mais conservadoras que a lei de fadiga da Shell.

4.6 Avaliação da Capacidade de Carga

Na estrada da serra da Leba já existe uma estrutura de pavimento que sofreu muitas intervenções desde a sua abertura ao tráfego. Contudo, não está disponível informação fidedigna sobre a geometria atual da estrutura. Para averiguar sobre a eventual necessidade de reforço, seria necessário fazer uma avaliação da capacidade de carga do pavimento. Geralmente, essa avaliação da capacidade de carga é realizada com recurso a ensaios de carga no pavimento efetuados com equipamentos como o defletómetro de impacto. Por não existirem informações disponíveis de ensaios de carga efetuados no pavimento, vai recorrer-se a potenciais cenários de perda de capacidade de carga do pavimento, utilizando métodos habituais, como o método da Shell e o método das espessuras efetivas do Asphalt Institute.

Para cada uma das possíveis estruturas de pavimentos consideradas anteriormente, ou seja, para os pavimentos com 17 e 26 cm de camadas betuminosas, foram simulados dois cenários, um que considerou uma redução de 20% do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas e outro que considerou uma redução de 40%, conforme é apresentado nos quadros 4.20 e 4.21.

Quadro 4.20 – Módulos das camadas de pavimento com 17 cm, considerando reduções de 20% e 40% dos módulos das camadas betuminosas

Espessuras	20% de redução	40% de redução
4	1301	976
13	1469	1102
20	174	174
100	80	80

Quadro 4.21 - Módulos das camadas de pavimento com 26 cm, considerando reduções de módulo de 20% e 40% dos módulos das camadas betuminosas

Espessuras	20% de redução	40% de redução
4	1301	976
22	1652	1239
20	174	174
100	80	80

- Método da Shell

Nos quadros 4.22 e 4.23 apresentam-se os danos de fadiga e de deformação permanente obtidos para os cenários simulados.

Quadro 4.22 - Danos de Fadiga e de Deformação Permanente para os cenários de redução de 20% dos módulos

Danos de fadiga							
Designação	ε_t	Vb (%)	F	Em (Pa)	Nadm(x10 ⁶)	N ₈₀ (x10 ⁶)	Dano
Pav. 17 cm	0,000268	10	4	1470374026	7,61	9,80	129%
Pav. 26 cm	0,000159	10	4	1652665211	82,66	9,80	12%

Danos de Deformação Permanente

Designação	Observação	ϵ_{dp}	Nadm(x 10 ⁶)	N ₈₀ (x10 ⁶)	Dano
Pav. 17 cm	95% prob. Sob.	0,000563	1,04	9,80	940%
Pav. 26 cm		0,000340	7,86	9,80	125%

Quadro 4.23 - Danos de Fadiga e de Deformação Permanente para os cenários de redução de 40% dos módulos

Danos de fadiga							
Designação	ϵ_t	Vb (%)	F	Em (Pa)	Nadm(x10 ⁶)	N ₈₀ (x10 ⁶)	Dano
Pav. 17 cm	0,000304	10	4	1101625123	6,81	9,80	144%
Pav. 26 cm	0,000186	10	4	1238495709	64,57	9,80	15%

Danos de Deformação Permanente					
Designação	Observação	ϵ_{dp}	Nadm(x10 ⁶)	N ₈₀ (x10 ⁶)	Dano
Pav. 17 cm	95% prob. Sob	0,000612	0,75	9,80	1310%
Pav. 26 cm		0,000381	4,99	9,80	196%

Para os cenários simulados, os quais se afiguram verosímeis para a situação da estrada da Serra da Leba, observou-se que uma estrutura do pavimento será débil para o tráfego estimado, uma vez que os valores do número admissível de repetições de carga (capacidade de carga) em qualquer dos cenários está muito abaixo do tráfego previsto.

4.7 Dimensionamento do reforço

- Método das espessuras efetivas do Asphalt Institute

O método das espessuras efetivas é um processo de dimensionamento expedito de pavimentos e do seu reforço que também pode ser utilizado para avaliar a capacidade de carga. Este método geralmente é usado apenas para estudos prévios ou para estradas menos importantes. Basicamente, o método parte do pressuposto de que o pavimento apresenta alguma perda de capacidade com o tempo de serviço, o que é representado por uma espessura mais reduzida que a existente (espessura efetiva). O processo de cálculo da espessura efetiva de cada camada, T_e , é feito com base no produto dum fator de conversão, C , pela espessura real da camada. A espessura efetiva total resulta da soma das espessuras efetivas parciais de cada camada. O valor do fator de conversão é determinado recorrendo ao quadro 4.24 (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

Para o processo de avaliação da capacidade de carga do pavimento vai considerar-se o pavimento composto por misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e em camada de base, e por uma sub-base granular em agregado britado de granulometria extensa.

Quadro 4.24 Fator de conversão C (Branco, Pereira, & Santos, 2011)

Tipo	Descrição do material	Factor de conversão C
I	Leito do pavimento qualquer que seja.	0,0
II	Base ou sub-base granulares britadas de granulometria extensa e CBR>20, (C=0,1 se IP>6).	0,1-0,2
III	Base ou sub-base de solos com IP<10 e estabilizados com cal ou cimento.	0,2-0,3
IV	a) Misturas betuminosas a frio em bases, muito fendilhadas e com rodeiras de grande expressão.	0,3-0,5
	b) Pavimento rígido (mesmo com camada de desgaste em mistura betuminosa) e que vai ser partido antes de reforço em pedaços com 0,5 metros ou menos. Usar C= 0,3 quando a laje tiver sido directamente aplicada sobre o solo de fundação.	
	c) Base ou sub-base granulares britadas estabilizadas com cimento, que se apresentem com fendilhamento de contracção extensa (usar C=0,3 quando as fissuras tiverem 1 cm de espessura ou mais e o material se apresentar instabilizado).	
V	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento apreciável e interligado	0,5-0,7
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, com fendilhamento fino e com rodeiras de pequena expressão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento apreciável que será partido em bocados de 1 a 4 m ² antes de reforço.	
VI	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento fino, com pequena interligação e com rodeiras pequenas.	0,7-0,9
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, sem fendilhamento e com rodeiras de muito pequena expressão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento pequeno, em que os pedaços formados não são de dimensão inferior a 1 m ² .	
VII	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base sem fendilhamento e com rodeiras praticamente inexistentes.	0,9-1,0
	b) Pavimento rígido com camada de desgaste em mistura betuminosa, completamente estável e exibindo fendilhamento de reflexão desprezável.	
	c) Pavimento rígido praticamente novo.	

De acordo com as características dos pavimentos admitiram-se os valores apresentados no quadro 4.25.

Quadro 4.25 - Cálculo das espessuras efetivas

Pavimento de 17 cm	Pavimento de 26 cm
Camada 1 (desgaste/betuminosa) – C = 0,5	
$Te_1 = 0,5 \times 4 \text{ cm} = 2 \text{ cm}$	$Te_1 = 0,5 \times 4 \text{ cm} = 2 \text{ cm}$
Camada 2 (betuminosa) – C = 0,5	
$Te_1 = 0,5 \times 13 \text{ cm} = 6,5 \text{ cm}$	$Te_1 = 0,5 \times 22 \text{ cm} = 11 \text{ cm}$
Camada 3 (sub-base granular) – C = 0,2	
$Te_2 = 0,2 \times 20 \text{ cm} = 4 \text{ cm}$	$Te = 0,2 \times 20 \text{ cm} = 4 \text{ cm}$
Logo a espessura efetiva do pavimento é: $Te = Te_1 + Te_2$	
$Te = 2 + 6,5 + 4 = 12,5 \text{ cm}$	$Te = 2 + 11 + 4 = 17 \text{ cm}$
13 cm	17 cm

Através do ábaco do Asphalt Institute (ver figura 4.30) obtém-se o número de eixos-padrão de 80 kN representativo da vida útil restante do pavimento, considerando a espessura efetiva determinada para os pavimentos simulados e o módulo de deformabilidade de fundação de 80 MPa (Quadro 4.26).

Quadro 4.26 - Espessuras efetivas para os diferentes cenários

Descrição	E_{sf}	T_e	N_{adm}
Pav. 17 cm	80 MPa	130 mm	1×10^5
Pav. 26 cm		170 mm	3×10^5

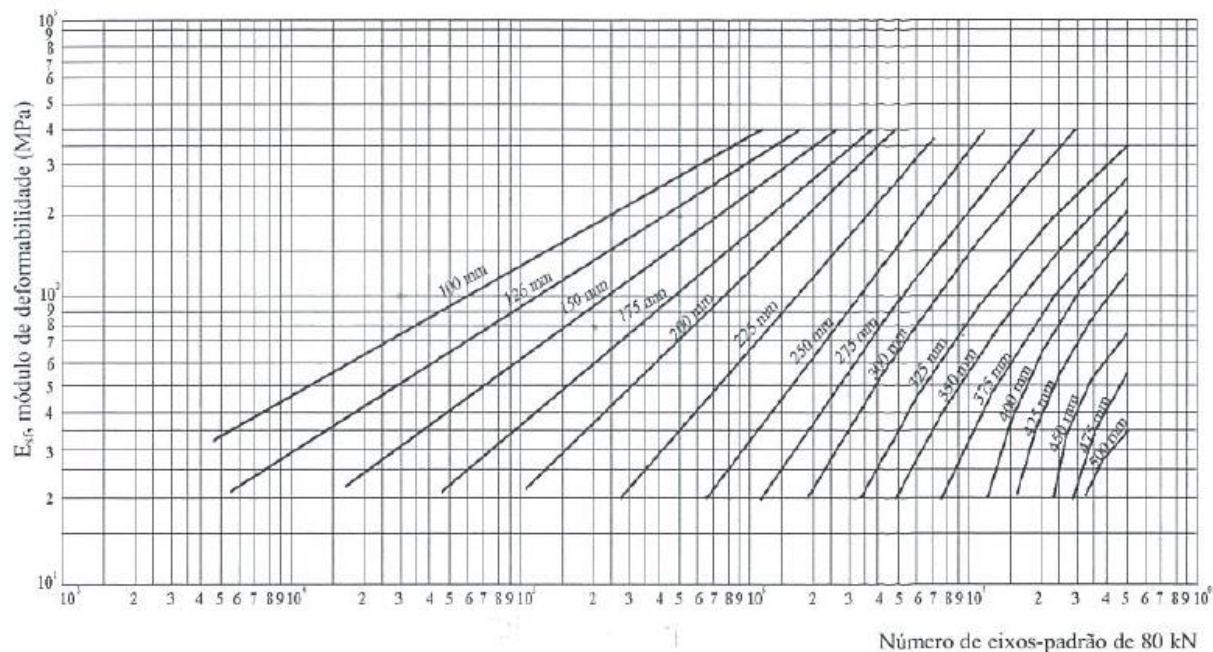


Figura 4.30 Ábaco do Asphalt Institute para aplicar o método das espessuras efetivas (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

O ábaco da figura 4.30 permite determinar a espessura requerida para o reforço, T_0 , com base na espessura (T_n) que seria necessária para um pavimento novo, integralmente constituído por camadas betuminosas. A espessura necessária para o reforço do pavimento é dada pela expressão 4.16.

$$T_0 = T_n - T_e \tag{4.16}$$

Em que:

T_0 - Espessura da camada de reforço;

T_n - Espessura requerida para o pavimento;

T_e - Espessura efetiva.

Assim, a espessura do pavimento integralmente formado por camadas betuminosas teria 325 mm de espessura, o que resultaria numa camada de reforço para o pavimento de 17 cm com 19 cm, e para o pavimento de 26 cm com 16 cm. Sabe-se que o método das espessuras efetivas pode ser conservador, o que, só por si, não explica os valores elevados obtidos. A falta de capacidade de carga do pavimento existente contribuiu também para isso.

- Método Baseado nas Deflexões Reversíveis e Fatores de Carga

De forma a simular as deflexões dos pavimentos com 17 e 26 cm de camadas betuminosas, considerando as camadas com redução dos valores dos módulos para 20% e 40%, recorreu-se ao programa BISAR para a simulação de ensaios com defletómetro de impacto. Considerou-se uma carga de 65 kN aplicada numa placa circular com um raio de 15 cm. As distâncias, em metros, das posições dos geofones ao centro da placa, para efeitos da simulação foram as seguintes: 0; 0,3; 0,45; 0,6; 0,9; 1,2; 1,8. Os resultados obtidos para os deslocamentos verticais UZ para as sete posições, correspondentes às deflexões do pavimento de 17 e 26 cm, são apresentados nos Quadros 4.27 e 4.28 e figuras 4.31 e 4.32.

Quadro 4.27 – Deflexões para o pavimento de 17 cm

Distância ao ponto de carga (m)	Deflexões Novo (μm)	Deflexões para redução de 20% do módulo (μm)	Deflexões para redução de 40% do módulo (μm)
0	1052,0	1105,0	1176,0
0,30	657,8	665,6	673,6
0,45	496,2	497,2	498,0
0,60	386,5	385,9	385,5
0,90	257,6	257,3	257,1
1,20	189,8	189,8	190,0
1,80	124,0	124,3	124,6

Quadro 4.28 – Deflexões para o pavimento de 26 cm

Distância ao ponto de carga (m)	Deflexões Novo (μm)	Deflexões para redução de 20% do módulo	Deflexões para redução de 40% do módulo
0	615,6	664,7	734,2
0,30	463,4	482,3	505,3
0,45	401,2	412,4	425
0,60	346,8	352,9	359,2
0,90	260,7	261,5	261,9
1,20	200,2	199,4	198,2
1,80	129,4	128,5	127,8

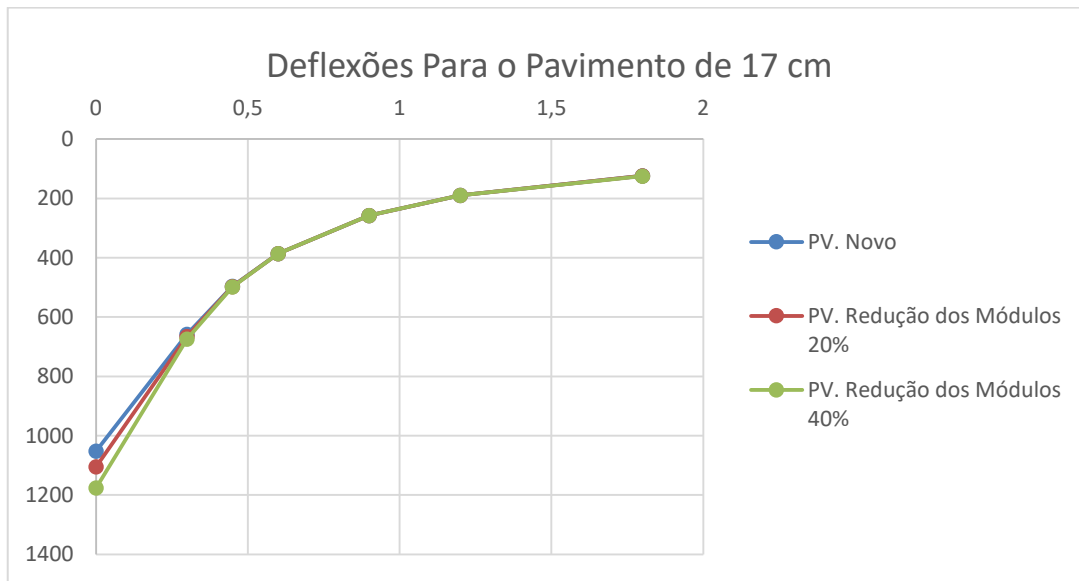


Figura 4.31 – Deflexões para o pavimento de 17 cm

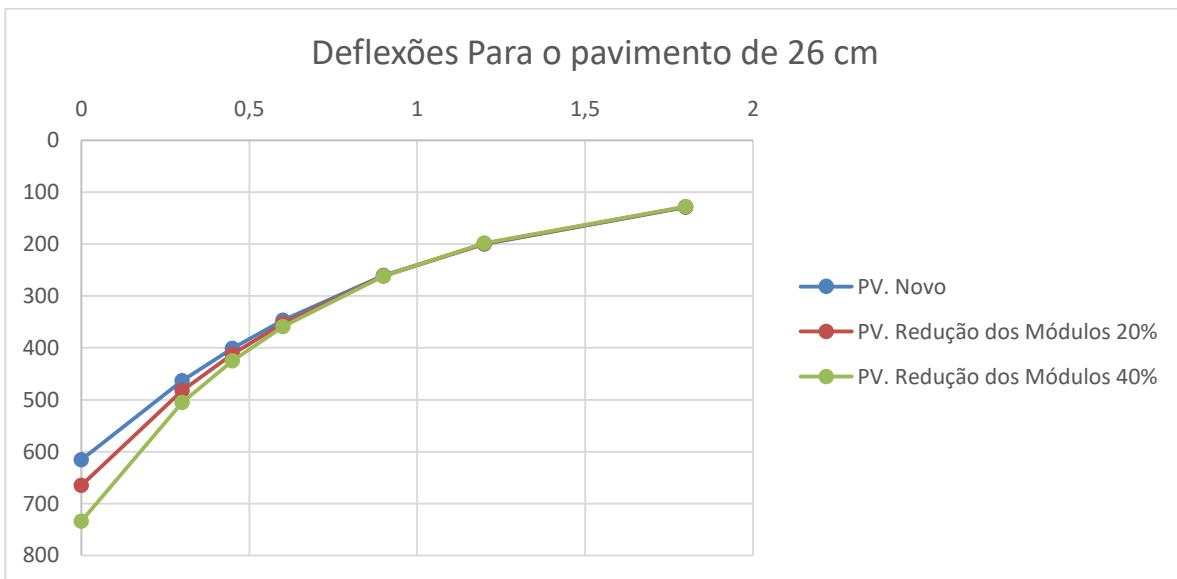


Figura 4.32 – Deflexões para o pavimento de 26 cm

Com base nos defletogramas obtidos, tanto para o pavimento novo como para os cenários de redução de módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, calculam-se os respetivos fatores de carga, através das expressões 4.17 e 4.18.

$$F_{cp} = \frac{D_{MAX} + D_{90}}{2} \quad (4.17)$$

$$F_{Novo} = \frac{D_{MAX} + D_{90}}{2} \quad (4.18)$$

Em que:

F_{cp} - Fator de carga do pavimento com redução de módulo de deformabilidade;

F_{Novo} - Fator de carga do pavimento novo;

D_{max} - deflexão máxima;

D_{90} - deflexão a 90 cm do centro da placa.

Os fatores de carga são um indicador da capacidade de carga do pavimento, sendo de esperar que uma degradação significativa daquela capacidade resulte numa relação mais baixa para o rácio f (F_{novo}/F_{cp}), ou seja, de uma percentagem maior de resistência que foi gasta (Branco, Pereira, & Santos, 2011). De acordo com a expressão 4.17 são apresentados no quadro 4.29 os valores para o pavimento de 17 cm e 26 cm com base nas deflexões simuladas do pavimento em estado novo, e após uma redução dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas de 20% e 40%.

Quadro 4.29 - Resultados do cálculo dos fatores de carga

Pavimento de 17 cm			Pavimento de 26 cm		
F_{Novo}	Redução de 20%	Redução de 40%	F_{Novo}	Redução de 20%	Redução de 40%
654,8 μm	681,15 μm	716,55 μm	438,15 μm	463,1 μm	498,05 μm

Após a determinação dos fatores de cargas dos pavimentos novos e existentes, determinaram-se os rácios f pelas expressões 4.19 e 4.20, sendo a interpretação que se faz a seguir a indicada por (Branco, Pereira, & Santos, 2011).

$$f = \frac{F_{Novo}}{F_{CP}} < 1 \quad (4.19)$$

$$f = \frac{F_{Novo}}{F_{CP}} \geq 1 \quad (4.20)$$

Em que:

f - rácio entre os fatores de carga do pavimento novo e considerando redução de módulo de deformabilidade;

Se $f < 1$ – dimensionar o pavimento como novo, afetando a espessura betuminosa existente de f e usando as características obtidas na retroanálise para as camadas não ligadas (admitindo que são inferiores às previsíveis para materiais novos);

Se $f \geq 1$ - dimensionar o pavimento como novo, considerando que as camadas existentes têm características de novas.

De acordo com a expressão 4.19 e 4.20 são apresentados no quadro 4.30, os valores dos rácios f calculados para o pavimento com 17 cm e com 26 cm.

Quadro 4.30 - Resultados obtidos para o rácio f

Pavimento de 17 cm		Pavimento de 26 cm	
Redução de 20%	Redução de 40%	Redução de 20%	Redução de 40%
0,96	0,914	0,94	0,88

Todos os rácios calculados foram inferiores a 1, pelo que se admite uma perda da capacidade de carga, afetando a espessura das camadas betuminosas, de acordo com a expressão 4.21.

$$Esp.R = Esp.Calc - f.Esp.exist \quad (4.21)$$

Em que:

Esp.R- espessura de reforço;

Esp.Calc – espessura calculada;

Esp.exist – espessura existente.

Com base na expressão 4.21, foi calculado o valor da espessura de reforço dos pavimentos de 17 cm e 26 cm, apresentados no quadro 4.31.

Quadro 4.31 Espessuras de Reforço dos Pavimentos.

Pavimento de 17 cm		Pavimento de 26 cm	
Redução de 20%	Redução de 40%	Redução de 20%	Redução de 40%
Reforço de 10 cm	Reforço de 11 cm	Reforço de 2 cm	Reforço de 4 cm

Os resultados mostram que para os cenários correspondentes à estrutura de pavimento com 17 cm haverá uma considerável necessidade de reforço estrutural, da ordem de 10 cm. A estrutura com 26 cm, mesmo com perda de capacidade de carga, exigirá apenas uma camada de reforço que, no máximo atingirá 4 cm.

- Dimensionamento do Reforço - MeDiNa

Para projetos de reforço, o MeDiNa permite a inserção de valores de deflexão obtidos com viga Benkelman ou FWD para avaliar as condições estruturais do pavimento. O *software* BlackMeDiNa, pertencente ao pacote MeDiNa, destina-se a efetuar retroanálise de um segmento homogéneo de um pavimento, para efetuar um diagnóstico estrutural do pavimento. Para isso, além dos valores da retroanálise, devem considerar-se o tráfego e o horizonte de projeto para o reforço, bem como a percentagem da área fendilhada, um índice de irregularidade longitudinal (IRI) (Quadro 4.32), e a idade do pavimento.

Quadro 4.32 Estado do pavimento com base em valores do IRI (Filho, Almeida, & Oliveira, 2019).

Estado do pavimentos	IRI (m/km)
Bom	IRI < 2,7
Regular	2,7-3,5
Ruim	3,5-5,5
Péssima	IRI > 5,5

O projeto de reforço pelo MeDiNa é feito na aba “reforço”, na qual se faz a inserção dos dados (quadro 4.32 e 4.33, para os cenários de 17 cm e 26 cm). Para calcular a espessura do reforço o programa realiza diversas análises considerando os critérios de dimensionamento já indicados. Dessa forma calcula a melhor espessura para atender o critério de máxima área fendilhada ao final do período do projeto (20 anos). O programa estabelece um limite de 15 cm para a camada de reforço. Caso no processo de cálculo a espessura exceda 15 cm, o projetista deverá prever outras soluções, como, por exemplo, a “reconstrução do pavimento” (Franco & Motta, 2020).

Após a inserção das informações dos pavimentos, calculou-se a espessura necessária para o reforço do pavimento com base nas temperaturas da região da Leba (módulos adequados à temperatura de serviço). Observou-se que para misturas convencionais (classe I e II), o reforço necessitaria de camadas com módulos altos apresentados em resumo no quadro 4.33.

Quadro 4.33 Módulos determinados para misturas da classe I e II

Classes	Espessura	Pavimento de 17 cm	Pavimento de 26 cm
I	Espessura máxima necessária 15 cm	Módulo mínimo 6145 MPa	Módulo mínimo 6145 MPa
II		Módulo mínimo 5100 MPa	Módulo mínimo 2663 MPa

Por não se conseguir atingir os valores dos módulos indicados no Quadro 4.32, considerou-se a utilização de misturas betuminosas com betumes modificados, ou seja, com misturas da classe III e IV (Quadro 4.17 parâmetros usados). É importante referir que o programa foi calibrado para uma temperatura inferior às temperaturas da região da Serra da Leba, pelo que se recorreu à expressão 4.22 para fazer o ajuste dos módulos das camadas betuminosas em função da temperatura de serviço. O quadro 4.34 apresenta o resumo das condições consideradas no dimensionamento.

$$E_T = (1,635 - 0,0317T)E_{20} \quad (4.22)$$

Em que:

E_T - módulo de deformabilidade para a temperatura de serviço (MPa);

T- temperatura de serviço (°C);

E_{20} - módulo de deformabilidade de referência em MPa obtido a 20 °C.

Quadro 4.34 Dimensionamento do Reforço do Pavimento

Análise do Reforço do pavimento	17 cm	26 cm
Classe III - módulo de 6344 MPa		
Nível de confiabilidade da análise	95%	95%
Área de fendas estimada do pavimento no final do período	29,9%	8,8%
Espessuras do reforço final	5	5
Classe IV – módulo de 8321 MPa		
Nível de confiabilidade da análise	95%	95%
Área de fendas estimada do pavimento no final do período	17,8%	6,3%
Espessuras do reforço final	5 cm Alerta: A análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada	5 cm Alerta: A análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada
Dados da estrutura existente		
Área fendilhada = 40%		
Condições de tráfego: Ruim (IRI= 4 m/km)		
Observação: considerar a adoção de medidas para evitar a reflexão de fendas.		
Deflexão Característica (dc) = 40,0 (0,01 mm)		
Observação: considerar a adoção de medidas para correção de irregularidade.		
Nota: a análise não considera a reflexão de fendas do pavimento existente		

Os resultados mostram as espessuras de reforço quando se consideraram mistura betuminosas das classes III e IV a colocar sobre os pavimentos de 17 e 26 cm de camadas betuminosas.

É importante referir que o MeDiNa apenas calcula a espessura de reforço e não leva em consideração as patologias existentes no pavimento antigo. Por isso, devem realizar-se previamente ao reforço, intervenções no pavimento existente para a eliminação de fendas antes da aplicação do reforço (Flores & Specht, 2019). Além disso, o programa permite a simulação de uma camada antifendas, interposta entre a existente e a camada de reforço. Essa camada pode ser uma SAMI – *stress absorbing membrane interlayer* –, cujas propriedades são fornecidas pela base de dados do MeDiNa: espessura de 2 cm; módulo de 1500 MPa; coeficiente de Poisson de 0,25.

A SAMI é uma camada de selagem das fendas feita com betume modificado com borracha (80% da constituição é betume e 20% é granulado de borracha de pneus). Esta camada pode ser usada como uma camada intercalar de alívio de tensões associadas à atividade das fendas. A sua principal função é retardar a propagação de fendas e melhorar a resistência à tração na parte inferior do reforço devido à presença do aglutinante betuminoso com borracha (Dhokal, Elseif, & Zhang, 2016).

No quadro 4.35 apresentam-se os resultados obtidos quando se considerou a camada antifendas.

Quadro 4.35 Inclusão da Camada Antirreflexão de Fendas

Análise do Reforço do pavimento	17 cm	26 cm
Classe III - módulo de 6344 MPa mais camada antirreflexão de 1500 MPa		
Área de fendas estimada do pavimento no final do período	16,6%	6,9%
Espessuras do reforço final	7 cm Alerta: A análise encerrou por ter atingido a espessura mínima da camada	7 cm Alerta: A análise encerrou por ter atingido a espessura mínima da camada
Classe IV - módulo de 8321 MPa mais camada antirreflexão de 1500 MPa		
Área de fendas estimada do pavimento no final do período	13,8%	4,8%
Espessuras do reforço final	7 cm Alerta: A análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada	7 cm Alerta: A análise encerrou por haver atingido a espessura mínima da camada

Após o dimensionamento do reforço considerando a camada de SAMI, e como seria de esperar, verifica-se uma redução da área fendilhada determinada pelo programa MeDiNa.

4.8 Comparação de Estruturas novas e com reforço – Métodos Mecanicistas

A aplicação do método da Shell, com a consideração de fatores de carga, e do MeDiNa, levou a estruturas com características distintas uma das outras. Na figura 4.33 observam-se as estruturas obtidas pelos diferentes métodos.

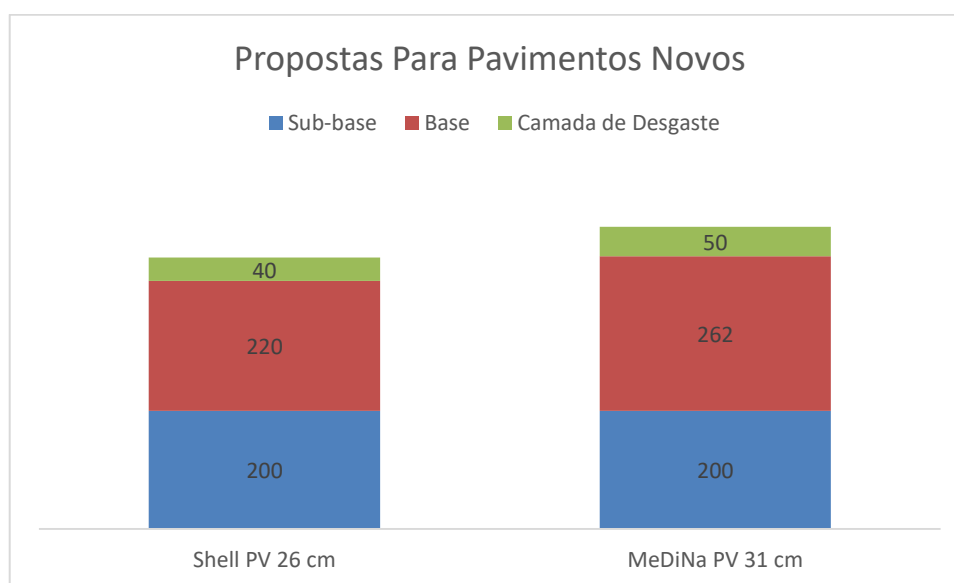


Figura 4.33 Estruturas dos pavimentos resultantes do dimensionamento empírico-mecanicista pelos diferentes métodos

As simulações efetuadas permitem concluir que as estruturas que resultam da aplicação dos modelos do MeDiNa são mais robustas e, portanto, mais caras, que as que resultam da aplicação dos modelos da Shell.

Para o projeto de reforço foram obtidas as soluções resumidas na figura 4.34 e 4.35. No caso do MeDiNa apenas se simulou uma redução de 40% do módulo das camadas existentes. Contudo, o reforço exigido quando se consideraram camadas com misturas do tipo III ou do tipo IV resultou num reforço igual para as estruturas com 17 e 26 cm, correspondente ao mínimo admitido pelo MeDiNa.

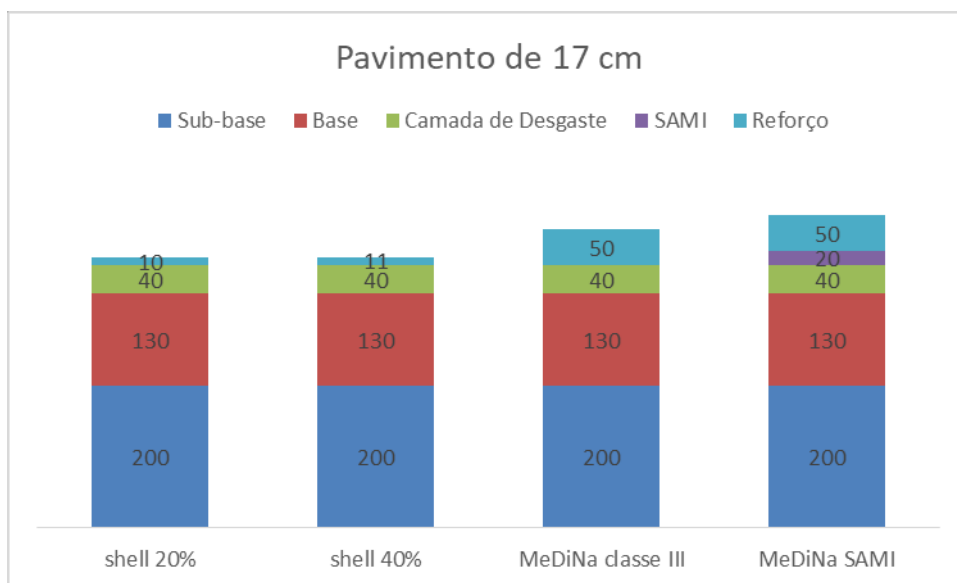


Figura 4.34 Estruturas de reforço do pavimento com 17 cm obtidas pelos diferentes metodos

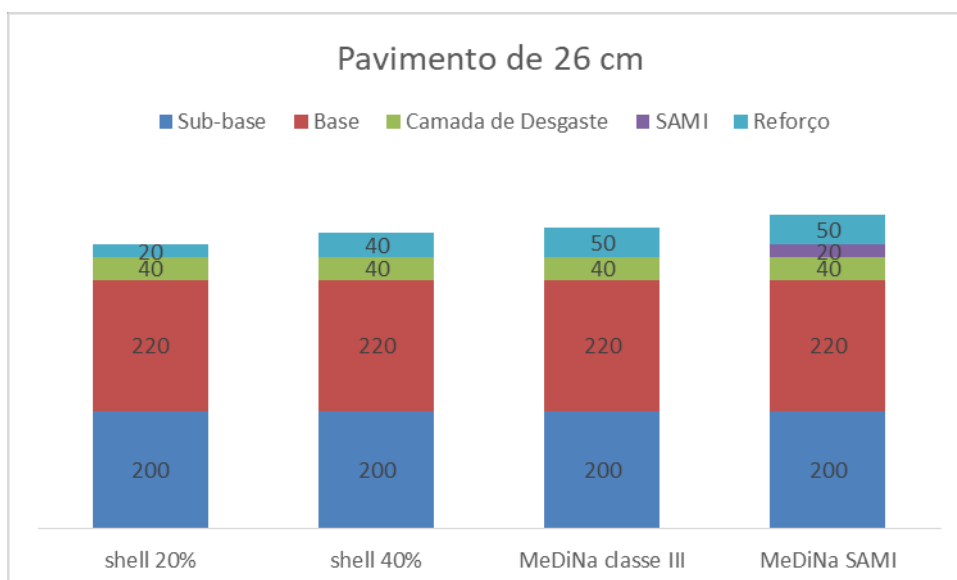


Figura 4.35 Estruturas de reforço do pavimento com 26 cm obtidas pelos diferentes metodos

4.9 Propostas de Ações de Monitorização e Acompanhamento do Estado de Conservação do Pavimento da Estrada da Serra da Leba

As análises efetuadas permitiram identificar algumas situações do pavimento da Serra da Leba que deverão ser acompanhadas no futuro. Para isso, são apresentados de forma resumida algumas soluções para a redução de degradações do pavimento da serra da Leba:

- Criação de um programa eficiente de acompanhamento da evolução das degradações no pavimento da serra da Leba, de modo a ter uma redução de custos de conservação, (económicos, humanos e ambientais), atuando no tempo certo e com as ações de conservação certas;
- Organização de uma base de dados de conservação, na qual deverão constar informações relevantes sobre o histórico das ações anteriores no pavimento;
- Regulação e inspeção das cargas permitidas por eixo para a circulação na Serra da Leba, assim como a reabilitação do posto de pesagem de veículos pesados, garantindo um controlo eficiente;
- Antes das intervenções de reforço fazer o saneamento das zonas fendilhadas e com degradações localizadas, reduzindo a propagação das fendas existentes para as camadas de reforço;
- Caso venha a realizar-se o reforço do pavimento, fazer análises prévias semelhantes às realizadas neste trabalho, de modo a avaliar a capacidade de carga alcançável com as soluções de projeto;
- Controlar o processo de fabrico das misturas, para que possam garantir uma maior durabilidade e boas características funcionais;
- Aplicar marcas rodoviárias que apoiem a condução noturna, recorrendo nas situações de traçado mais sinuoso a “olhos de gato refletores” ou iluminação LED solar das marcas rodoviárias;
- Garantir a proteção do pavimento contra deslizamentos de terras e queda de blocos de rocha, sabendo que é frequente o deslizamento de materiais que de alguma forma acabam por danificar o pavimento e colocar a vida dos utentes em risco;
- Criação de postos de assistência SOS para apoiar a ocorrência de avarias em viaturas, de modo a evitar os constrangimentos ao fluxo normal do trânsito e reduzir o risco dos restantes automobilistas.

CAPÍTULO 5

5. Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

5.1 Síntese de Trabalho e Conclusões Gerais

Com a elaboração deste trabalho pretendeu-se contribuir com propostas de soluções para melhorar as características superficiais e estruturais do pavimento da Serra da Leba, recorrendo a diversos métodos de dimensionamento e avaliação estrutural.

O presente documento foi dividido em cinco capítulos dos quais se apresenta de seguida uma breve síntese.

Primeiro, enquadrou-se a importância da estrada da Serra da Leba na rede de infraestruturas de transporte da região onde se insere. Mais adiante apresentou-se uma análise do estado do conhecimento relativa aos aspetos que foram considerados para apoiar o estudo de caso efetuado nos capítulos seguintes. Dentre esses aspetos, destacam-se as patologias que se desenvolvem nos pavimentos, bem como as suas causas e possíveis soluções para as corrigir. Além disso, abordaram-se alguns aspetos relativos à monitorização do estado de conservação, de modo a que possam servir de referência para a sua progressiva implementação na estrada da Serra da Leba.

A análise do caso concreto permitiu verificar que o pavimento da Serra da Leba se encontra em estado conservação débil por apresentar problemas funcionais e estruturais: rodeiras; fendilhamento, pele de crocodilo, entre outras patologias. Verificou-se que a redução da qualidade do pavimento da serra da Leba se deve a má conservação do pavimento, a deslizamentos de terras e à falta de controlo de pesagem de carga dos veículos pesados.

Para as análises estruturais necessárias, recorreu-se a diferentes metodologias, desde métodos mais expeditos como o manual de pavimentos português, espanhol ou ábacos do Asphalt Institute, até métodos empírico-mecanicistas como o método da AASHTO 93, o método da Shell ou o MeDiNa do Brasil.

Nos métodos mecanicistas consideraram-se dados climáticos e de tráfego, tanto quanto possível, aplicáveis à estrada da Serra da Leba. O MeDiNa revelou-se um método mais conservador, designadamente quando se utilizam misturas betuminosas convencionais, as mais habituais na prática construtiva em Angola. Mesmo assim, foi possível verificar que o pavimento da serra da Leba carece de reforço estrutural para os cenários estudados.

Com o estudo feito foi possível apresentar diferentes soluções de reforço do pavimento, de forma a devolver o conforto e a segurança aos utentes, e contribuir para a conservação do património público. Das várias soluções obtidas e apresentadas, estas deverão ser verificadas antes de as aplicar ou implementar em campo, por terem sido soluções criadas a partir de cenários plausíveis, mas não verificados, por exemplo, com ensaios de carga. No processo de aplicação das mesmas soluções deveram ser tidos em consideração fatores económicos, técnicos e ambientais.

Propôs-se a criação de políticas de controlo e gestão de pavimentos, de forma a ter uma maior visibilidade da evolução das suas condições de conservação, permitindo assim a otimização de recursos e a manutenção da qualidade estrutural e funcional dos pavimentos.

Julga-se que os objetivos inicialmente traçados foram alcançados. A compilação e análise de informação constituiu também uma aprendizagem para o autor, no que diz respeito aos processos de dimensionamento e reforço de pavimentos, e avaliação da sua capacidade de carga.

5.2 Trabalhos Futuros

O presente trabalho centrou-se em soluções para resolução de problemas estruturais do pavimento da serra da Leba, problemas esses que se estendem em torno da extensão da estrada e das diferentes camadas de pavimento.

Para a realização de trabalhos futuros, propõe-se a análise de outros aspetos da estrada, designadamente os relativos a outros elementos da mesma, como a melhoria do traçado, a estabilização de taludes ou a monitorização dos órgãos de drenagem.

Referências

- AASHTO. (2008). *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide*. America.
- Antunes, M. A., Guimarães, A. C., & Marques, G. L. (2020). A viable solution for recycling industrial slate waste applied in. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais pavements*, 240.
- ASTM-D6433-09. (2017). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Survey*.
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. (2011). *Pavimento Rodoviário*. Coimbra: Almedina, S.A.
- Capitão, S. (2020). *Apontamentos Teorico de Apoio as Aulas* . Coimbra: ISEC.
- Carvalho, R. L. (2006). *MECHANISTIC-EMPIRICAL DESIGN OF FLEXIBLE PAVEMENTS: A SENSITIVITY STUDY*.
- CEPSA. (2014). *Manual de Pavimentação*. Portugal.
- CESO Development Consultants. (2015). *Estudo de Mercado Sobre a Província de Angola*. Angola/Portugal .
- CLIMATE-DATA.ORG. (23 de 03 de 2020). *CLIMATE-DATA.ORG*. Obtido de pt.climate-data.org: <https://pt.climate-data.org/africa/angola/huila/humpata-506446/>
- Costa, G. d. (2012). *Análise dos criterios de aceitação/Rejeição do caderno de engargos tipo Obras da EP para paviemento*. Lisboa: FCT.
- Dhakal, N., Elseif, M. A., & Zhang, Z. (2016). Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements – A synthesis. *ScienceDirect*, 233.
- Diário de Notícias pt. (2014). Mercado automóvel angolano cresceu 30% no primeiro semestre do ano. *Diário de Notícias pt*.
- Filho, J. A., Almeida, L. C., & Oliveira, F. H. (2019). OBTENÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM PAVIMENTO RÍGIDO POR MEIO DE EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO INDIRETA. *61 congresso brasileiro do concreto CBC2019*, 4.
- Flores, G. C., & Specht, L. P. (2019). APLICAÇÃO DO SOFTWARE MEDINA NA ANÁLISE E NO PROJETO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS. *X SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL*, 3.
- Francisco, A. P. (2012). *Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança.
- Franco, F. A. (2007). *MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - SISPAV*. RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- Franco, F. A., & Motta, L. M. (Agosto de 2020). *Manual de Utilização do programa MeDiNa Projeto* . Brasil: UFRJ/DNIT.

- Franco, F. A., Ubaldo, M. d., Fritzen, M. A., Lima, C. D., & Motta, L. M. (2019). ANÁLISE DE PROJETO DE REFORÇO UTILIZANDO O MÉTODO M-E DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL - MEDINA. *33 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, 1.
- Freitas, O., & Torres, M. (2017). AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS DEGRADAÇÕES NO RUÍDOPNEU-PAVIMENTO. *Simpósio de Acústica e Vibrações*.
- Fritzen, M. A., Franco, F. A., Nascimento, L. A., Motta, L. M., & Ubaldo., M. d. (S/D). CLASSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO AO DESEMPENHO À FADIGA. *Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES)*, 2.
- Fundo Rodoviario. (S/D). Mapas do Estado de Conservação das estradas de Angola. *Mapas do Estado de Conservação das estradas de Angola*, p. 26.
- Golroo, T. B. (17 de setembro de 2017). A review on automated pavement distress.
- HABILFIX. (Agosto de 2016). *ESTUDO DE CASO – REPARAÇÃO DE BURACO COM HABILFIX*,. Obtido de habilfix.pt: https://cdnw1.omeuwebsite.com/users/habilfix-novo/case_study_habilfix.pdf
- INEA. (s.d.). *Manutenção e Conservação da Estrada EN 280*. Obtido de Grandes Obras De Estrada: <https://www.afa.pt/major-road-works/015-manutencao-e-conservacao-da-estrada-en-280-troco-lubango-serra-da-leba-namibe/?lang=pt-PT>
- InIR. (S/D). *Directiva para Concepção de pavimento- Criterio de Dimensionamento* . Portugal: CAeMD.
- Instituto Nacional De Estradas De Angola INEA. (1965). *Memória Descritiva (Tampa-Leba)*. Huíla-Lubango.
- Jiménez, F. E. (2014). *Manual de pavimentos (CEPSA)*. Lisboa.
- Minhoto, M. J. (2005). *Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos flexíveis* . Braga: U.M.Escola de Engenharia .
- Ministro de Obras Públicas. (30 de Setembro de 2002). Norma 6.1-1C Anejo 1 Seccione De Firme. *Anejo 1 Seccione De firme*.
- Monteiro, P. (16 de julho de 2008). *Leba recanto natural com Historia*. Obtido de Gentes do meu Tempo Baú de recordações: <http://princesa-donamibe.blogspot.com/2008/08/moamedenses-de-visita-serra-da-leba.html>
- Pais, J., Pereira, P., & Azevedo, M. (28-30 de Novembro de 2000). A qualidade rodoviaria na viragem do seculo. *Primeiro Congresso Rodoviario Portugues* .
- PAVEInstruct. (2018). *PAVEXpress*. Obtido de PAVEXpress: <http://projects.pavexpressdesign.com/#account/projects>
- Ragnoli, A., Blasiis, M. R., & Benedetto, A. D. (19 de Dezembro de 2018). Pavement Distress Detection Methods: A Review. *A Review*.
- Remessa de Dados, 583 (Direcção Nacional De viação e transito 10 de Junho de 2019).

- Russo, B. H., & Almeida, F. L. (2019). *Biodiversidade De Angola*. Porto.
- Sá, A. F. (s.d.). Vias de Ligação da Huíla com o Mar. *Boletim cultural - Camara Municipal de Sá da Bandeira*, 31.
- Santos, D. d. (2016). Travão aos camiões com excesso de peso. *Jornal Angola*.
- Santos, L. d. (S/D). *Sistema de gestão de pavimentos- estruturas, funcionais e implementação* . Lisboa: Técnico de Lisboa .
- SATCC. (2001). *Draft Code Of Proctice For The Rehabilitation Of Road Pavement*. South African: Prepared by the Division of Roads and Transport Technology, CSIR.
- Sell. (1977). *Asphalt Paviment Design Manual* . London: Interonational Petrleum Company.
- SGA. (5 de 9 de 2019). Curvas de Nível. Lubango, Huíla, Angola: SGA.
- Shell. (1977). *Asphalt Paviment Design Manual*. London: Interonational Petrleum Company.
- Tavallae, B., Santos, L. G., & Neves, J. M. (2016). Aplicação do Método Empírico-mecanicista da AASHTO ao dimensionamento de pavimentos em Portugal. *Congresso Rodoviário Português*.
- Transportation, U. D. (2014). *DISTRESS IDENTIFICATION MANUAL for the Long-Term Pavement Performance Program*. America: FHWA-HRT-13-092.
- Zou, Q., Cao, Y., Li, Q., Mao, Q., & Wang, S. (2011). CrackTree: Automatic crack detection from pavement images. www.elsevier.com/locate/patrec.