



ESTUDO COMPARATIVO DE PAVIMENTOS PERPÉTUOS E PAVIMENTOS CONVENCIONAIS.

THIAGO MENDONÇA MARTINS SANTOS

novembro de 2017

ESTUDO COMPARATIVO DE PAVIMENTOS PERPÉTUOS E PAVIMENTOS CONVENCIONAIS

THIAGO MENDONÇA MARTINS SANTOS

Orientador: Ângelo Manuel Gonçalves Jacob

Co-orientador: Patrícia Barboza da Silva (Universidade Presbiteriana Mackenzie)

OUTUBRO DE 2017

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Ilustrações.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xv
Abreviaturas	xvii
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Revisão da Literatura.....	7
Capítulo 3 Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Convencionais.....	23
Capítulo 4 Pavimento Perpétuo.....	31
Capítulo 5 Estudo de Caso	47
Capítulo 6 Estruturas Finais e Estudo Técnico e Econômico.....	73
Capítulo 7 Considerações finais	89
Referências Bibliográficas	93
Anexo I - Arquivo de Saída do Programa Elsym5	99
Anexo II - MEMORIAL DE CÁLCULO PAVIMENTO PERPÉTUO	111
Anexo III - Memorial de Cálculo Restauração dos Pavimentos.....	114

RESUMO

Esta dissertação foi baseada no estudo de Pavimentos Perpétuos que atualmente é um termo usado para descrever um projeto estrutural de longa duração, construção e conceito de manutenção para pavimentos flexíveis. Se bem mantido e rehabilitado, um pavimento perpétuo pode ser projetado e construído para durar mais de 40 anos sem requerer grande reabilitação estrutural ou reconstrução e precisando apenas de renovação periódica da superfície em resposta as patologias confinadas ao topo do pavimento. A dissertação se fundamenta em um amplo estudo do estado da arte de pavimentos perpétuos e conta com a apresentação de um dimensionamento de um pavimento perpétuo pelo método Shell, com o auxílio do software Alize LCPC, como ferramenta de apoio para a definição da melhor estrutura para o pavimento perpétuo. O dimensionamento foi realizado através de um projeto de duplicação de uma rodovia localizada na região central do estado de São Paulo - Brasil, executado pela VETEC Engenharia para o DER/SP – Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo. O projeto de duplicação desta rodovia foi realizado através do método preconizado pelo DER/SP, com o auxílio do software ELSYM 5 para definição da estrutura de pavimento semi-rígido, tradicionalmente executado no Brasil. Com a definição de ambas as estruturas finais é realizada uma comparação entre as técnicas, avaliando os custos estimados para concepção e manutenção de ambos os pavimentos, para um período de 13 anos, período mínimo definido pela *APA – Asphalt Pavement Alliance*, que uma estrutura de pavimento flexível deve durar antes de necessitar de uma manutenção para que a estrutura seja reconhecida como perpétua. O objetivo da avaliação dos resultados finais desta comparação é verificar se um pavimento perpétuo que possui vantagens como: menor frequência de manutenção, diminuição de atrasos de usuários, economia de materiais e mão de obra para manutenção e vida útil superior, se justifica financeiramente, uma vez que seu custo de concepção é notavelmente superior a um pavimento convencional, porém existe uma economia considerável no que diz respeito a manutenção de ambos os pavimentos, é importante destacar que está análise é contextualizada no cenário brasileiro, portanto, alguns materiais não são utilizados em escala comercial, o que encarece sua produção.

Palavras-chave: Pavimento Perpétuo, Estrutura, Pavimento Flexível, betão betuminoso

ABSTRACT

This dissertation was based on the study of Perpetual Pavements that is currently a term used to describe a long term structural design, construction and maintenance concept for flexible pavements. If well maintained and rehabilitated, a perpetual pavement can be designed and built to last for more than 30 years without requiring major structural rehabilitation or reconstruction and requiring only periodic surface renovation in response to pathologies confined to the top of the pavement. The research is based on an extensive study of the state of the art of perpetual pavements and has the presentation of a scaffolding of a perpetual pavement by the Shell method, with the help of Alize LCPC software, as a support tool for the definition of the best structure for the perpetual pavement. The design was done through a duplication project of a highway located in the central region of the state of São Paulo - Brazil, executed by VETEC Engenharia for the DER / SP - São Paulo Roads and Highway Department. The duplication project for this highway is performed using the method recommended by DER / SP, with the help of ELSYM 5 software to define the semi-rigid pavement structure traditionally executed in Brazil. With the definition of both final structures, a comparison of the techniques is performed, evaluating the costs incurred for the design and maintenance of both pavements, for a period of 13 years, a minimum period defined by the APA - Asphalt Pavement Alliance, that a pavement must maintenance so that the structure is recognized as perpetual. The objective of the evaluation of the final results of this comparison is to verify that a perpetual pavement that has advantages such as: lower frequency of maintenance, reduction of user delays, saving of materials and labor for maintenance and superior useful life, is justified financially, a Since its design cost is remarkably higher than a conventional pavement, however, we have considerable savings in terms of maintaining both pavements, it is important to highlight that this analysis is contextualized in the Brazilian scenario, therefore, some materials are not used in commercial scale, which increases its production.

Keywords: Perpetual Pavement, Structure, Flexible Pavement, Asphalt Concrete

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria, pela força e pela coragem que me concedeu, permanecendo ao meu lado em todo o percurso desta caminhada.

Ao Engenheiro Ângelo Jacob, meus mais sinceros agradecimentos, por sua grande hospitalidade, respeito e dedicação em compartilhar todos seus conhecimentos e conselhos sem hesitar um minuto e por sua grande contribuição na orientação na conclusão desta dissertação.

À Profa. Dra. Patrícia Barboza da Silva, minha eterna gratidão, por ter sido co-orientadora persistente e amiga que, com diretrizes seguras, muita paciência, constante acompanhamento e incentivo, me aceitou com todas as minhas restrições.

À Dra Andrea Severi que me auxiliou com todo seu conhecimento e disponibilizou de seu tempo para a conclusão desta dissertação.

À VETEC Engenharia, que disponibilizou os projetos que foram fonte de estudo desta dissertação.

À minha família, pela paciência e compreensão.

ÍNDICE DE TEXTO

Capítulo 1	Introdução	1
1.1	Âmbito	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo Geral.....	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Metodologia.....	3
1.4	Estrutura	4
Capítulo 2	Revisão da Literatura.....	7
2.1	Generalidades.....	7
2.2	Tipos de Pavimentos	10
2.2.1	Pavimentos rígidos	10
2.2.2	Pavimento semirrígido	12
2.2.3	Pavimentos flexíveis	14
2.3	Revestimentos Asfálticos.....	16
2.4	Regas ou Imprimação betuminosa	18
2.5	Gerenciamento e Conservação de Pavimentos.....	19
Capítulo 3	Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Convencionais.....	23
3.1	Método do DER/SP (Departamento de Estradas e Rodagem do Estado De São Paulo).....	23
3.2	Método Shell (Claessen et al., 1997)	26
3.2.1	Módulo de deformabilidade das camadas betuminosas (Emb).....	28
3.2.2	Extensões.....	29
Capítulo 4	Pavimento Perpétuo.....	31

ÍNDICE DE TEXTO

4.1	Contextualização.....	31
4.2	Método de dimensionamento	32
4.1	Camadas do Pavimento Perpétuo.....	36
4.2	Construção do Pavimento Perpétuo.....	42
Capítulo 5	Estudo de Caso.....	47
5.1	Enquadramento do estudo de caso	47
5.2	apresentação dos dados para estudo.....	48
5.3	Localização, Clima e Tráfego Atuantes na Região.....	52
5.4	Calculo do Número N	58
5.5	Estudos Geotécnicos.....	61
5.6	Dimensionamento Pavimento Semirígido – Método do DER/SP	63
5.6.1	Verificação Mecanicista	64
5.7	Dimensionamento Pavimento Perpétuo – Método Shell.....	68
5.7.1	Temperaturas de serviço	69
5.7.2	Módulo de deformabilidade	71
5.7.3	Deformações máximas de tração e compressão vertical	71
Capítulo 6	Estruturas Finais e Estudo Técnico e Econômico.....	73
6.1	Apresentação dos custos de concepção dos pavimentos.....	73
6.2	Programa de Gerenciamento, Controle e Manutenção	78
6.3	Análise Comparativa	83
6.4	Análise financeira.....	85
Capítulo 7	Considerações finais	89
7.1	Conclusões	89
7.2	Desenvolvimentos Futuros	91

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário.....	9
Figura 2.2 - Distribuição dos esforços provenientes do tráfego em pavimentos flexíveis e rígidos.....	11
Figura 2.3 - Tipos de pavimento semi-rígido.....	13
Figura 2.4 - Estruturas típicas de pavimentos flexíveis.	15
Figura 2.5 - Campo de Tensões de Pavimentos Flexíveis	16
Figura 2.6 – Ilustração da aplicação de uma rega de colagem.....	19
Figura 2.7 - Sistema de gerência de pavimentos.....	20
Figura 2.8 - Fluxograma de tomada de decisão.	22
Figura 3.1 - Ábaco de dimensionamento - Manual de Pavimentação	25
Figura 3.2 - Espessuras do Pavimento.....	25
Figura 3.3 - Temperatura de serviço das camadas.....	27
Figura 4.1 – Fluxograma de concepção de pavimentos perpétuos. (Adaptado de Grillo, 2015).....	33
Figura 4.2 - Esquema de trincamento por fadiga causado por tensões de tração na fibra inferior do revestimento.....	35
Figura 4.3 - Estrutura de um pavimento perpétuo. (Adaptado de Grillo, 2015).....	36
Figura 4.4 - Estruturas dos pavimentos nas pistas de testes N8 e N9	39
Figura 4.5 - Comparação dos custos médios no Kansas - EUA (2002)	43
Figura 4.6– Distribuição de prêmios para pavimento perpétuos	46
Figura 5.1 – Traçado do projeto em estudo – Cidades de Jáu e Barra Bonita.	49
Figura 5.2 – Corte transversal tipo – Estrutura pavimento semi-rígido.	50
Figura 5.3 – Estrura final pavimento existente	51
Figura 5.4 - Mapa do Estado de São Paulo.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.5 - Resultados da verificação método DER/SP.	67
Figura 5.6 - Dados de entrada do Pavimento Perpétuo. (Alize LCPC)	72
Figura 5.7 - Características de um carregamento com eixo de 80kN. (Alize LCPC).....	72
Figura 6.1 - Custo comercial CAP AM-1 para mistura betuminosa EME	77
Quadro 2.1 -Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário	8
Quadro 5.1 - Lista de documentos fornecidos para estudo	48
Gráfico 5.1- Temperatura do Ar (Média dos últimos 20 anos)	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Espessuras mínimas recomendadas para o revestimento asfáltico (IP-DE-P00/001).....	24
Tabela 4.1 - Composições de camadas utilizadas para pavimentos perpétuos.....	41
Tabela 4.2 - Módulo de deformabilidade durante as estações do ano.	42
Tabela 5.1 - Especificações Técnicas DER/SP	51
Tabela 5.2 - Análise dos dados de temperatura do ar na região de estudo.	53
Tabela 5.3 - Cargas por Tipo de Eixo – Norma do CONTRAN (conselho...)	55
Tabela 5.4 - Cálculo do Fator de Veículo da Frota (Sentido Crescente).....	56
Tabela 5.5 - Cálculo do Fator de Veículo da Frota (Sentido Decrescente).....	57
Tabela 5.6 - Cálculo Numero N.....	59
Tabela 5.7 - Calculo Número N.....	60
Tabela 5.8 - Espessuras mínimas de substituição do solo.....	62
Tabela 5.9 - Espessuras específicas de substituição do solo.....	63
Tabela 5.10 - Modelo estrutural – Pista de Rolamento	66
Tabela 5.11 - Estrutura Final Pavimento Semi-rígido.....	68
Tabela 5.12 - Temperaturas de Serviço.....	70
Tabela 5.13 - Temperaturas de Serviço.....	70
Tabela 5.14 - Módulo de deformabilidade das camadas	71
Tabela 5.15 - Deformações Máximas Admissíveis de Tração e Compressão.....	71
Tabela 5.16 - Deformações do Pavimento Dimensionado pelo método Shell.....	72
Tabela 6.1 - Estruturas finais dimensionadas.....	73
Tabela 6.2 - Análise Financeira pavimento semi-rígido	74
Tabela 6.3 - Análise Financeira pavimento perpétuo.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.4 - Composição de Custos por m ² de Mistura EME.....	76
Tabela 6.5 - Levantamento das áreas de pavimentação	79
Tabela 6.6 – Quantificação das áreas para aplicação das soluções de manutenção	80
Tabela 6.7 - Composição de custos por m ² de Solução	82
Tabela 6.8 – Preço Total por m ² da Concepção do pavimento	85
Tabela 6.9 – Preço Total para manutenção das estruturas.....	86

ABREVIATURAS

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABGE	Agregado Britado de granulometria extensa
APA	Asphalt Pavement Alliance - Aliança do Pavimento de Asfalto
ARTESP	Agência de Transporte do Estado de São Paulo
BGS	Brita graduada simples
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente – Betão Betuminoso Unisado á quente
CG	Cegonheiro
CO	Caminhão e Ônibus Convencional
CPA	Camada porosa de atrito
CPGP	Comissão Permanente de Gerência de Pavimentos
CS	Conservação
D	Deflexão
DEF	Deflection
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S/A
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
ELSYM5	Elastic Layered System
ES	Especificação de Serviço

ABREVIATURAS

FEO	Fatores de Equivalência de Operações
FHWA	Federal Highway Administration
FV	Fator de Veículo
FWD	Falling Weight Deflectometer
HDM	Highway Development and Management System
ICPF	Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedito
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	International Roughness Index ou Índice de Irregularidade Internacional
ISC	Índice de Suporte Califórnia
MT	Ministério dos Transportes
ONU	Organização das Nações Unidas
OR	Ônibus rodoviário
PCA	Portland Cement Association
TMD	Tráfego médio diário
TPU/DER-SP	Tabela de Preço Unitários do Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo
TPU/SP	Tabela de Preços Unitários da Prefeitura de São Paulo
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército Americano
VMD	Volume Médio Diário Anual de Tráfego
VP	Veículo leve

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO

O pavimento constitui a parte de maior custo na infraestrutura de transportes de uma rede rodoviária ou urbana, representando um investimento cujo gerenciamento, manutenção e conservação adequados são de extrema importância para a minimização do custo global envolvido no transporte e para garantir a sustentabilidade do projeto (VILLELA, 2015).

O termo sustentabilidade teve seu marco inicial com a primeira Conferência das Nações Unidas (ONU) sobre o Meio Ambiente Humano, que ficou conhecida como Conferência de Estocolmo, realizada em junho de 1972 na Suécia. Até então acreditava-se, mundialmente, que o meio ambiente era uma fonte inesgotável de recursos. Porém após a realização de estudos científicos que identificaram problemas como secas, chuvas ácidas e inversões térmicas que estavam afetando a população, atestou-se o contrário.

A partir de então o mundo voltou-se a desenvolver técnicas que utilizam em menor quantidade as matérias primas não renováveis, ou que as utilizem com a melhor eficiência quanto for possível e que busque a reutilização de todo produto que até então poderia ser apenas descartado.

Além desse fato, verifica-se no Brasil uma oferta insuficiente de infraestrutura de transporte rodoviário, tanto em extensão quanto na qualidade das vias. O mau gerenciamento e a má conservação das rodovias impacta negativamente na economia do País, além de gerar um processo de *“antieconomia”*, ou seja, o volume poupado no uso de uma técnica de implementação de um pavimento com baixo investimento inicial ou serviços de manutenção no momento adequado resulta em acréscimos nos gastos futuros com obras de reconstrução e em custos adicionais para os usuários (BARTHOLOMEU, 2006 apud VILLELA, 2015).

Desse modo, cabe às pesquisas em pavimentação o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a construção de rodovias com uma maior durabilidade, proporcionando a postergação de intervenções de reabilitação e a diminuição na frequência de atividades de manutenção (NEVES FILHO, 2004).

O conceito de Pavimentos Perpétuos é uma proposta de técnica de pavimentação executada com êxito na Europa e nos EUA – Estados Unidos da América, que visa construir pavimentos para elevado volume de tráfego com uma vida útil superior à dos pavimentos flexíveis tradicionais, que atualmente duram em média 30 anos, se os trabalhos de monitoramento e manutenção sejam realizados periodicamente, enquanto que o Pavimentos Perpétuos trabalham com uma vida útil superior a 40 anos. Para isso o pavimento é projetado restringindo todas as patologias na superfície da sua camada de desgaste. As patologias estruturais profundas, tais como a trincamento por fadiga que ocorrem das camadas inferiores se propagando para as camadas superficiais, que danificam estruturalmente o pavimento, são consideradas improváveis (GARG,2012).

Em estruturas de pavimentos perpétuos, todas as camadas, exceto a camada superficial, são consideradas permanentes e não necessitam de manutenção. A camada superior (desgaste) sofre manutenções periódicas através da utilização da técnica de fresagem e substituição do betão betuminoso, apenas nos primeiros centímetros de espessura, isso garante a qualidade de rolamento do pavimento, uma vez que as patologias são concentradas apenas nessa camada. Esta estratégia de reparação permitiu a utilização do material do revestimento fresado que pode ser reciclado para reutilização na mesma camada, proporcionando diminuição de custos, além de benefícios ambientais. Outro benefício dos pavimentos perpétuos é garantir a utilização mínima de recursos e materiais não renováveis, contribuindo para a conservação ambiental. (GARG,2012)

Uma estrutura de pavimento perpétuo possibilita rodovias de maior durabilidade e segurança, sem a necessidade de manutenções frequentes que podem ocasionar interrupções ao tráfego promovendo, além dos gastos inerentes à manutenção, outros gerados pelo maior tempo de viagem como: consumo de combustível, de pneus, graxas e lubrificantes, peças de reposição, tempos de viagens, aumento de sinalização de segurança e insatisfação de usuários.

1.2 OBJETIVOS

O modal rodoviário é o de maior representatividade entre os existentes para o escoamento da produção do Brasil, pois segundo dados da Confederação Nacional do Transporte, dentro do setor de transporte nacional de cargas o rodoviário representa 61% do total (CNT, 2015). Este fato evidencia a importância das rodovias para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil e prevê a necessidade de projetos bem elaborados e que não necessitem de grandes manutenções.

Baseado nestas premissas o pavimento perpétuo vem como uma alternativa para a construção de pavimentos com uma vida útil superior aos pavimentos convencionais. Somados a sua vida útil superior, os pavimentos perpétuos possuem espessuras totais de camadas inferiores aos dos pavimentos flexíveis

e não necessitam de reconstrução estrutural dispendiosa, demorada, que interrompe o trânsito e visa minimizar o consumo material, o custo de atraso de usuário e o custo de ciclo de vida de maneira eficiente (NEWCOMB,2011).

Logo, esta dissertação se justifica na medida em que contribui para a inserção dos pavimentos perpétuos no cenário das infraestruturas brasileiras, mostrando as vantagens e desvantagens do uso de um pavimento perpétuo em relação aos pavimentos flexíveis, contribuindo assim para os estudos de implantação deste tipo de pavimento no cenário brasileiro.

1.2.1 Objetivo Geral

Efetuar uma análise comparativa entre estruturas de pavimentos perpétuos com estruturas de pavimentos convencionais.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Estudar as técnicas de pavimentos convencionais aplicadas nos projetos brasileiros;
- b) Apresentar os conceitos e metodologias de dimensionamento e execução de pavimentos perpétuos, por meio de revisão bibliográfica;
- c) Fazer um estudo de caso em um trecho de rodovia que empregue uma estrutura de pavimento convencional e efetuar uma análise comparativa, hipotética, caso este empregasse uma estrutura de pavimento perpétuo;
- d) Comparar os custos despendidos para a concepção e manutenção de ambos os pavimentos e verificar sua viabilidade técnica e econômica.

1.3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta dissertação contempla duas fases de elaboração que visa o estudo e a análise do assunto discutido.

A primeira fase, pesquisa bibliográfica, prevê a recolha de bibliografia relevante, para encontrar referências sobre o tema central – Pavimento Perpétuo – com a apresentação de alguns conceitos importantes de pavimentação que serão necessários para a compreensão e contextualização do estudo.

Na segunda fase, estudo de caso, foi realizado o dimensionamento de um trecho de uma rodovia de um projeto realizado para o DER/SP – Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo, localizado na região central do Estado de São Paulo - Brasil, entre as cidades de Jaú e Barra Bonita, utilizando a técnica de Pavimentação Perpétua. Este dimensionamento foi realizado através do método

CAPÍTULO 1

Shell, devido ao fato dos métodos utilizados no Brasil, como os métodos do DER/SP e DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, não possuem parâmetros para dimensionamento de pavimentos que considere a contribuição estrutural das camadas de alto módulo. O dimensionamento teve auxílio do software de dimensionamento Alize-LCPC para verificação das análises mecanicistas.

Este dimensionamento foi utilizado na comparação com o pavimento que está executado atualmente no local de estudo. O trecho em estudo foi dimensionado pela VETEC Engenharia, uma empresa do grupo SYSTRA, que forneceram os projetos para o desenvolvimento deste estudo. O pavimento do estudo de caso, é uma estrutura semi-rígida, dimensionada pelo método do DER/SP, com auxílio do software ELSYM5, e plano de manutenção e gerenciamento concebido seguindo orientações do capítulo 2.4 desta dissertação e com auxílio do software HDM 4 – Highway Development and Management System, dimensionado e fornecido pela Dr^a Andrea Severi.

Por fim, a dissertação foi concluída por meio de uma análise das informações obtidas durante a pesquisa teórica e os resultados da comparação dos dimensionamentos, verificando os materiais utilizados, vantagens e desvantagens dos pavimentos e uma análise de custos de concepção, construção, gerenciamento e manutenção.

1.4 ESTRUTURA

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, como segue:

Capítulo 1 – Introdução – Neste Capítulo da dissertação é apresentada a introdução do assunto tratado, e também a apresentação do objetivo geral, dos objetivos específicos e por último apresenta-se a metodologia e estruturação para o desenvolvimento da dissertação.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica na qual é apresentada base teórica para a compreensão e contextualização do tema da dissertação utilizando-se de artigos, teses, dissertações, livros e normas para dar apoio. Além disso são introduzidos conceitos necessários ao entendimento do assunto.

Capítulo 3 – Este capítulo é composto pelos métodos de dimensionamento que são utilizados para a concepção das estruturas de pavimento que são propostas nesta dissertação.

Capítulo 4 – Pavimentos Perpétuos, na qual são apresentados, alguns estudos produzidos no Brasil e em outros países a respeito do desenvolvimento de pavimentos perpétuos, bem como conceitos específicos a esse tipo de estrutura, materiais utilizados e premissas de construção e manutenção .

Capítulo 5 – Apresentação do estudo de caso e resultados, na qual são expostos, o dimensionamento e os resultados da estrutura do pavimento convencional projetado pela VETEC Engenharia, bem como os

resultados obtidos no dimensionamento do pavimento perpétuo por meio da utilização da metodologia proposta.

Capítulo 6 – Este capítulo expõe as comparações das estruturas de ambos os pavimentos, bem como a comparação financeira de concepção e manutenção de ambos os pavimentos para o período de projeto estudado.

Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações para futuras pesquisas, apresentam-se as conclusões obtidas no desenvolvimento do presente trabalho, além de recomendações de trabalhos futuros relacionados ao tema estudado.

Anexos – Após as considerações finais, são exibidas as informações, dados e tabelas utilizados para a concepção desta dissertação. Estão divididas em quatro anexos, com todas as informações e detalhes utilizados nos capítulos anteriores.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GENERALIDADES

Um pavimento rodoviário em sua generalidade é parte da estrada, rua ou pista que suporta diretamente o tráfego de veículos e transmite e degrada as solicitações ao leito do pavimento. É uma estrutura laminar estratificada que se apoia continuamente em uma infraestrutura. (DNIT, 2006).

Segundo DNIT (2006) “Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito.”

Ainda como definição complementar para pavimentos rodoviários DNIT (2006) define: “[...] por injunções de ordem técnico-econômicas é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades que são colocadas em contato resultando daí um elevado grau de complexidade no que diz respeito ao cálculo das tensões e deformações atuantes nas mesmas resultantes das cargas impostas pelo tráfego.”

A principal função de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de desgaste livre e desempenada que permita a circulação de veículos em adequadas condições de conforto e segurança, durante todo o seu período de vida útil, estando submetido às ações do tráfego e intempéries atmosféricas. Sua funcionalidade durante toda vida útil é analisada por meio de dois aspectos importantes: a qualidade funcional e a qualidade estrutural (DNIT, 2006).

A qualidade funcional está relacionada às exigências dos usuários, em relação ao conforto e segurança da circulação. Isso só é possível por meio da análise de algumas características superficiais, tais como: irregularidade do pavimento, textura (que estão relacionadas as características antiderrapantes) e geração de ruídos na aderência entre pneu e pavimento (DNIT, 2006).

Segundo Ribeiro (2014) a qualidade estrutural garante a integridade do pavimento e está diretamente relacionada à sua capacidade de carga e de tráfego.

Segundo a CEPISA (2007), outras características funcionais de um pavimento são condicionadas essencialmente pela sua superfície. O acabamento da superfície e os materiais que nela são aplicados influenciam aspectos importantes e preocupantes para os usuários, tais como:

- A aderência entre o pneu e o pavimento;
- A projeção de água em tempo de chuva;
- O desgaste dos pneus;
- O ruído no exterior e no interior do veículo;
- A comodidade e a estabilidade durante a circulação;
- As ações dinâmicas do tráfego;
- A resistência ao rolamento (economia de combustíveis);
- O desgaste dos veículos.

No Quadro 2.1, apresenta-se a descrição das principais camadas que constituem a estrutura de um pavimento flexível rodoviário e que será exemplificada pela Figura 2.1 posteriormente:

Quadro 2.1 -Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário

Camada do Pavimento		Função
Camadas de materiais Betuminosos	Desgaste	<ul style="list-style-type: none"> • Adequada circulação do tráfego com conforto e segurança • Drenagem ou impermeabilização • Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego
	Regularização	<ul style="list-style-type: none"> • Camada estrutural • Regularizar a superfície da camada base
	Base	<ul style="list-style-type: none"> • Camada estrutural
Camadas de materiais Granulares	Base	<ul style="list-style-type: none"> • Camada estrutural • Degradação das cargas induzidas pelo tráfego

	Sub-Base	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores • Proteger a base da subida de água capilar • Drenagem interna do pavimento • Camada estrutural • Resistência à erosão
Solo de Fundação	Subleito (terreno de fundação)	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar deformação do solo • Homogeneidade das características mecânicas da fundação • Plataforma construtiva • Possibilidade de compactação das camadas sobrejacentes em adequadas condições • Suporte do pavimento; • São as suas características que condicionam o dimensionamento

(Fonte: Ribeiro 2014).

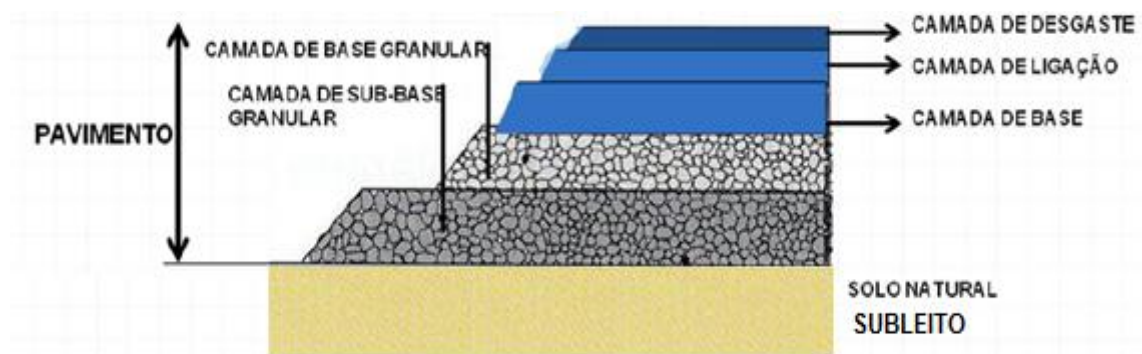


Figura 2.1 - Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário.

Fonte:(Adaptado de INIR, 2012)

2.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

Neste item serão apresentados os principais tipos de pavimentos utilizados, identificando suas características específicas, estruturas das camadas que compõem cada tipo de pavimento, materiais utilizados, distribuição de cargas entre outros conceitos que servirão de contextualização para o tema abordado.

2.2.1 Pavimentos rígidos

Utilizam revestimentos constituídos por uma placa de betão de cimento Portland, apoiada sobre uma sub-base de material granular que pode ser ou não tratada com aglomerante hidráulico e logo abaixo da sub-base, o subleito.

Segundo InIR (2012), a placa em betão pode ser contínua, com uma armadura longitudinal, denominada betão armado contínuo, ou descontínua com juntas. Nas juntas entre as placas de revestimento de betão de cimento Portland são utilizados elementos de ligação entre as placas chamadas de barras de transferência de carga.

Segundo Jacob (2016), os pavimentos rígidos possuem algumas características elementares que são apresentadas a seguir:

- Elevada resistência;
- Resistência a flexão do betão;
- Deformações elásticas muito reduzidas;
- São adequados para tráfegos intensos e de baixa velocidade;
- Elevado Módulo de deformabilidade;
- Grande capacidade de dissipação das cargas.

O comportamento dos pavimentos rígidos se difere dos outros tipos de pavimento devido a sua maior rigidez, que faz com que a placa absorva os esforços provenientes do tráfego e transmita de maneira mais uniforme à fundação quando comparado a um pavimento flexível. Por essa razão a sub-base granular acaba, em alguns casos, por apenas ter a função de regularizar a superfície (SILVA, 2015). Podemos verificar a comparação do comportamento dos pavimentos flexíveis e rígidos com a Figura 2.2.

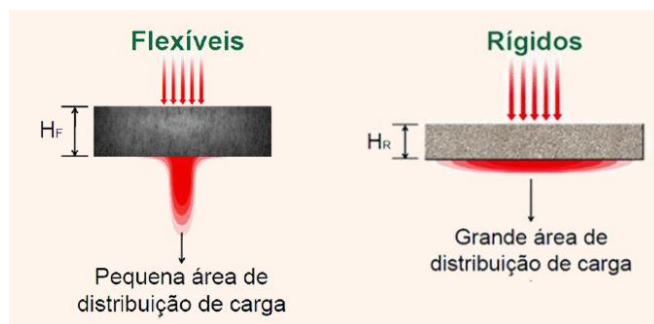


Figura 2.2 - Distribuição dos esforços provenientes do tráfego em pavimentos flexíveis e rígidos.

Fonte:(JACOB, 2016).

Os métodos de dimensionamento para pavimentos rígidos existentes são especificados para situações individuais, ou seja, para cada necessidade a ser suprida existe uma técnica de pavimentação rígida adequada. Os pavimentos podem ser de betão simples, betão estruturalmente armado e podem conter peças pré-moldadas (DNIT, 2015).

Tratando-se de pavimentos de betão simples surgem dois métodos de dimensionamento, ambos desenvolvidos pela *Portland Cement Association* (PCA), o primeiro elaborado em 1966 e por isso utilizado em larga escala aqui no Brasil; e após incrementar alguns aspectos importantes no estudo para o dimensionamento, em 1984, surge o PCA/84 que ainda se encontra em aberto para modificações (DNIT, 2005).

Em resumo o PCA/1884 abrange em sua nova estrutura questões essenciais para ampliar o campo de soluções alternativas e, conseqüentemente, a definição da solução mais econômica, essas novas características foram aprimoradas pelos estudos e os novos conhecimentos obtidos ao longo tempo, como cálculo de tensões, projetos geométricos, construção, e etc. O estudo do DNIT (2005) nos apresenta os fundamentos adotados no dimensionamento do PCA/1884, método mecanicista desenvolvido a partir de diversos parâmetros, e composição em um modelo de elementos finitos, esses parâmetros foram obtidos por estudos teóricos e análises computacionais, ensaios em laboratórios e modelos, pistas experimentais, e observações de pavimentos em serviços.

Em contraponto o PCA/1966, apesar de ser a base para o elaborado em 1984, tinha como parâmetros de dimensionamento apenas itens como características do betão, suporte da fundação, tráfego (tensões devido às cargas), e fatores de segurança; com o novo dimensionamento a preocupação com as patologias geradas nos pavimentos foi introduzida e os parâmetros para fadiga, ocasionadas pelas tensões de tração por flexão, e erosão, desenvolvida pela perda de material da camada suporte, foram acrescentados (DNIT, 2005).

O estudo do tipo de pavimento simples foi introduzido, já que podem ser apresentados como, pavimento de betão simples, pavimentos de betão simples com barras de transferência, ou com armadura contínua ou descontínua, e ainda pavimentos com juntas transversais de retração. Outros parâmetros abordados pelo novo método foram os acostamentos de concreto, sub-bases tratadas com cimento e barras de transferências, utilizadas quando não contém os dois itens anteriores (DNIT, 2005).

Os pavimentos rígidos possuem algumas características particulares, e também alguns cuidados que devem ser tomados, durante o processo de construção. A seguir apresenta-se, a descrição destes itens, segundo Jacob (2016):

- Fundação não sensível a água – os pavimentos rígidos são impermeáveis e por esse motivo o excesso de água vindo da fundação pode gerar uma subpressão causando sobreposição das placas. A sobreposição das placas ocorre com a pressão da água, vinda do subleito que empurra as placas para cima causando o desnivelamento. Outro motivo da sensibilidade da água é que, como os pavimentos rígidos praticamente não se deformam, se o solo de fundação sofrer algum recalque, recorrente a percolação da água, poderá causar a fissuração;
- Ligante hidráulico (cimento) – o uso de betão nos pavimentos deve ser tratado com cautela devido ao fenômeno de retração. Este é um fenômeno comum do betão e que, para minimizar a sua ocorrência, utiliza-se a construção de juntas de retração e de construção;
- Análise cuidadosa nos bordos ou cantos das placas devido a fragilidade do betão com esforços de tração;
- Cuidados com a rugosidade – O betão de cimento Portland tem tendência a ficar com pouca rugosidade superficial, se não controlada sua aplicação e granulometria;
- Cor clara do pavimento – Devido ao betão de cimento Portland apresentar cor mais clara que o betão betuminoso, esse apresenta melhor visibilidade noturna das vias.

2.2.2 Pavimento semirrígido

São os pavimentos caracterizados por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias (DNIT, 2006), apresentam desempenho intermediário entre pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. A composição de camadas empregada em sua estrutura é similar à de um pavimento flexível, em que as camadas superiores são em misturas asfálticas e a camada intermediária (base ou sub-base) é composta por uma camada granular tratada com aglomerante hidráulico.

Segundo a CEPISA (2010), o pavimento semirrígido distingue-se dos flexíveis, por ter uma maior rigidez das camadas que o constituem, em particular da camada de base.

Na Figura 2.3 apresentam-se os quatro tipos de estruturas típicas de pavimentos semi-rígidos, que são apresentadas para exemplificar a estrutura destes pavimentos.

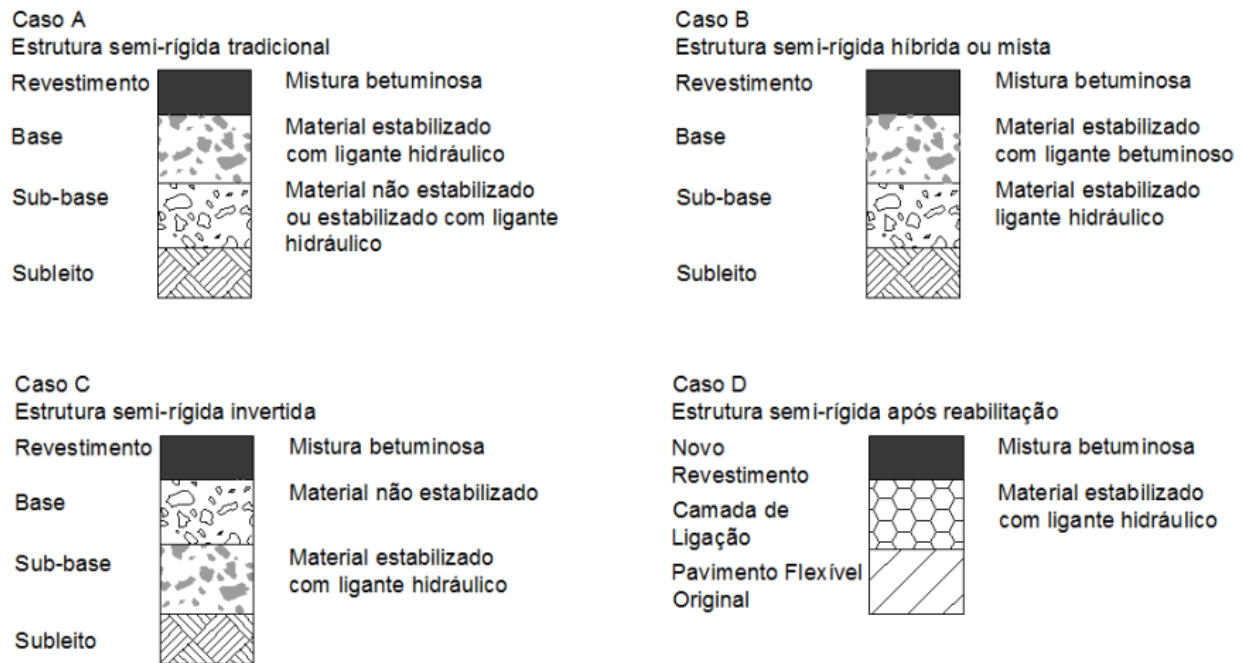
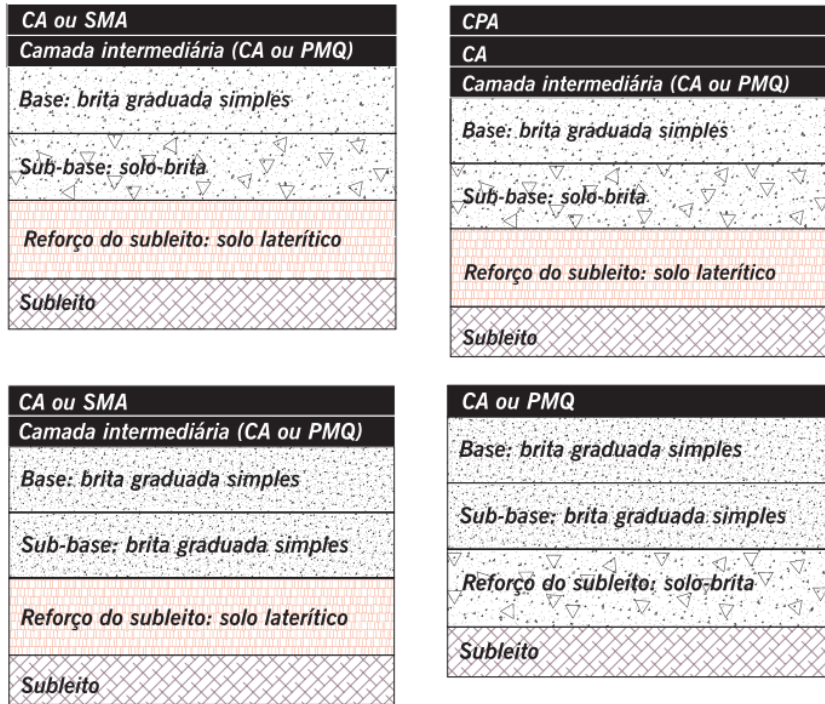


Figura 2.3 - Tipos de pavimento semi-rígido.

Fonte:(Balbo, 2007, p.52)

2.2.3 Pavimentos flexíveis

São pavimentos constituídos de múltiplas camadas que empregam materiais resilientes. As camadas superiores são formadas por misturas asfálticas, enquanto que as camadas subjacentes podem ou não empregar esse tipo de material (BERNUCCI et. al., 2008). A



Legenda:

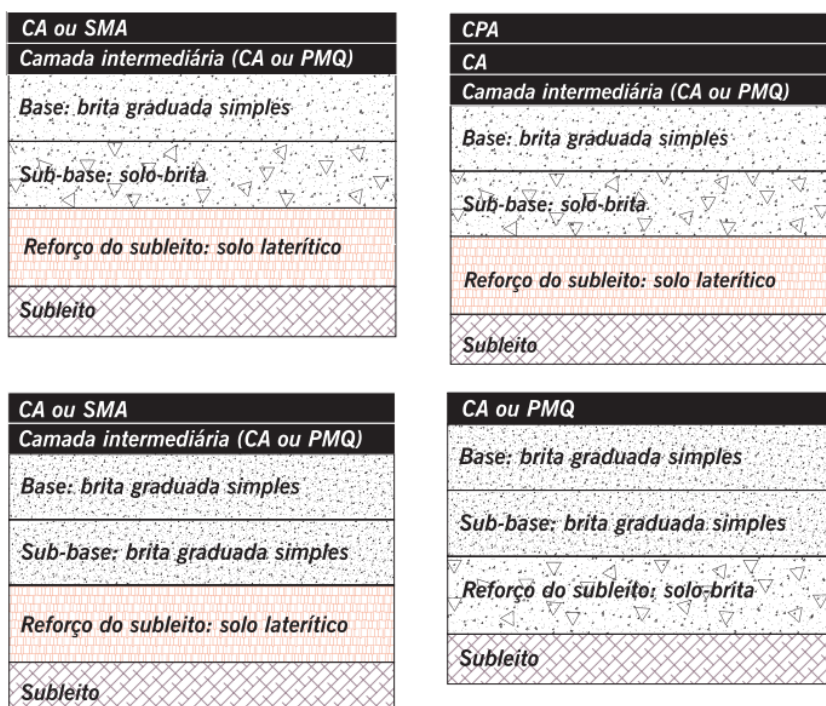
CPA – Camada Porosa de Atrito ou betão betuminoso drenante;

CA – Concreto Asfáltico ou betão betuminoso;

SMA – Stone Matrix Asphalt;

PMQ – mistura metuminosa Pré Misturado a Quente.

Figura 2.4 apresenta estruturas típicas de um pavimento flexível convencional, utilizados no Brasil:



Legenda:

CPA – Camada Porosa de Atrito ou betão betuminoso drenante;

CA – Concreto Asfáltico ou betão betuminoso;

SMA – Stone Matrix Asphalt;

PMQ – mistura metuminosa Pré Misturada a Quente.

Figura 2.4 - Estruturas típicas de pavimentos flexíveis.

Fonte: (BERNUCCI et. al., 2006)

Segundo Balbo (2007) a estrutura do pavimento flexível deve atender as solicitações dos esforços aliviando pressões sobre as demais camadas, geralmente de menor resistência. Para que o pavimento flexível tenha um funcionamento adequado, todas as suas camadas devem trabalhar deformações compatíveis com sua capacidade. As camadas devem proporcionar aos veículos condições adequadas de rolamento e suporte.

Diferente dos pavimentos rígidos, como citado anteriormente, o comportamento dos pavimentos flexíveis pode ser explicado conforme a Figura 2.5, no qual a aplicação de uma carga gera distribuição de tensões mais concentradas.

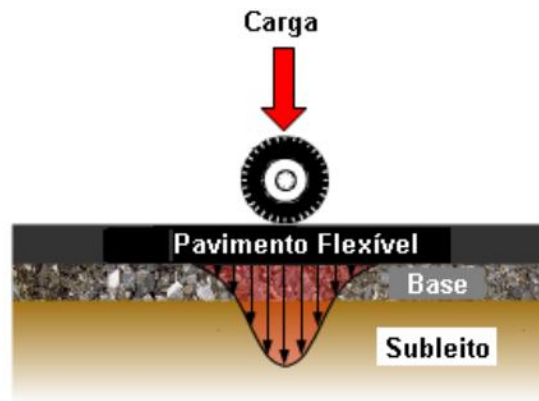


Figura 2.5 - Campo de Tensões de Pavimentos Flexíveis

Fonte: (Departamento de transportes da UFPR, 2009)

2.3 REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

O revestimento asfáltico é responsável pelo acabamento superficial, proteção das camadas inferiores contra intempéries e por suportar diretamente os carregamentos aplicados. Em se tratando de revestimentos asfálticos, trata-se geralmente, da composição de agregados minerais de vários tamanhos com ligantes asfálticos, “Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA), mais de 90% das estradas pavimentadas nacionais são de revestimentos asfálticos. ” (NAKAMURA, 2011, p.1).

Esta camada deve apresentar características como impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, para cada situação ao qual for submetida, sendo assim diversas modificações e novas tecnologias foram desenvolvidas para atender as variações de clima e tráfego, que são duas das mais nocivas formas de esgotamento aplicadas no pavimento (BERNUCCI et al, 2008).

As misturas asfálticas, que constituem o revestimento, podem ser classificadas por seu método de usinagem, à quente ou à frio, ou, ainda, por sua granulometria, densa, aberta ou descontínua:

Betão Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ): é um dos tipos mais empregados no Brasil, também conhecido como Concreto Asfáltico (CA) e tem seu correspondente em Portugal como Mistura Betuminosa a Quente. Esse tipo de revestimento possui graduação densa, ou seja, possui uma estrutura interna formada por agregados finos, intermediários e grossos, que compõe uma construção com poucos vazios, já que os grãos menores selam os espaços deixados pelos maiores, por esta razão o teor de asfalto sobre esse esqueleto de agregados deve ser muito bem dosado, variando de 4,5 a 6,0%, pois quando em excesso causa fechamento da macrotextura superficial e quando em falta gera o enfraquecimento da camada. Essa sensibilidade à dosagem do teor de asfalto pode acarretar patologias e, quando não atendida de maneira adequada, o excesso de ligante pode gerar uma estrutura com problemas de

deformação permanente por fluência ou exsudação, e a carência diminui a resistência à formação de trincas e, por conseguinte reduz a vida útil (BERNUCCI et al, 2008). Uma solução encontrada para diminuir essa sensibilidade ao teor de ligante é a substituição por ligantes modificados com polímeros ou asfalto-borracha, que além de aumentar a resistência e a durabilidade, ainda melhora a aderência pneu-pavimento. Existe também as misturas de Módulo Elevado (Enrobé à Module Eleve - EME), muito utilizado na França e nos Estados Unidos como camadas intermediárias em pavimentos perpétuos (BERNUCCI et al., 2008).

Camada Porosa de Atrito (CPA): é tipicamente usado sobre uma camada de revestimento impermeável, como camada de rolamento, o revestimento asfáltico drenante, ou em Portugal betão betuminoso drenante, tem sua granulometria aberta, ou seja, com menor quantidade de frações miúda e fina, formando uma estrutura permeável. Usualmente empregado em situações onde é essencial o aumento da aderência pneu-pavimento em dias de chuva, já que seus vazios internos permitem a infiltração da água em sua estrutura e a condução da mesma para o sistema de drenagem, fazendo com que haja a redução da espessura da lâmina d'água na superfície de rolamento e, com isso, diminuindo as distâncias de frenagens e o efeito spray, o que melhora a visibilidade e reduz da reflexão de luzes dos faróis noturnos, o conjunto desses benefícios resulta em maior segurança para o usuário (BERNUCCI et al., 2008).

O teor de ligante para esse tipo de estrutura irá depender de todo o conjunto ao qual será aplicado, deve ter baixa suscetibilidade térmica e alta resistência ao envelhecimento, segundo Bernucci et al. (2008, p.166); “A especificação brasileira DNER-ES 386 (DNER, 1999) recomenda para CPA cinco faixas granulométricas e teor de asfalto ente 4,0 e 6,0% [...]. Porém, devido à particularidade granulométrica, a quantidade de ligante é geralmente reduzida, ficando em média em torno de 3,5 a 4,5% [...]”

A manutenção neste revestimento além de tratar patologias comuns, encontradas em outros tipos de revestimento, deve-se atentar à colmatação da superfície, já que a água que infiltra pelos vazios traz consigo impurezas que obstruem a passagem diminuindo com o tempo a permeabilidade do pavimento (BERNUCCI et al, 2008).

Stone Matrix Asphalt (SMA): desenvolvido na Alemanha para resistir à formação das trilhas de rodas e aos danos causados pelos pneus com pinos no inverno, o Splitt mastix asphalt como foi chamado originalmente e Stone Matrix Asphalt (SMA) para os países americanos e europeus, foi difundindo suas características para o mundo e adquirindo aspectos tecnológicos ao longo do tempo (BERNUCCI et al., 2008).

O SMA possui granulometria descontínua, ou seja, possui 70% ou mais de sua composição granulométrica constituída de agregados graúdos, essa estrutura particular do SMA garante um contato entre os grãos que geram uma maior resistência às deformações permanentes. Os vazios formados pela matriz pétre

de agregados graúdos são preenchidos com um mástique asfáltico, que é composto por areia, filer, ligante asfáltico e fibras (SILVA, 2005).

Além disso o mástique requer alto teor de asfalto entre 6,0 e 7,5%, por isso a importância do uso das fibras para controlar o ligante e não deixar que ocorra segregação na mistura (BERNUCCI et al., 2008).

Dada a especificidade de sua granulometria o SMA apresenta macrotextura aberta, responsável pela maior aderência pneu pavimento e, por ser grosseira, forma micro canais na superfície que promovem a drenabilidade mais eficiente de água superficial, esses benefícios foram destacados por Silva (2005, p. 7).

Baseado na avaliação de vários pavimentos em diversos países, concluiu-se que trincamentos por fadiga e desagregações mecânicas devido aos efeitos térmicos, do tráfego e da ação da água, não são relevantes no SMA, isto devido à sua maior flexibilidade e resistência ao desgaste quando comparado às misturas densas convencionais.

Esse tipo de revestimento asfáltico é tipicamente aplicado em rodovias de tráfego elevado e carregamentos pesados devido a sua grande resistência à ação do tráfego resultante do contato grão-grão, porém é importante observar que a resistência mecânica do agregado graúdo deve ser compatível com o nível das tensões aplicadas (SILVA, 2005).

2.4 REGAS BETUMINOSAS

Rega de colagem ou Imprimação de ligante como é definido no Brasil consiste na aplicação de camada de material betuminoso sobre a superfície de uma camada da estrutura do pavimento concluída, antes da execução de um revestimento betuminoso qualquer, objetivando conferir coesão superficial, impermeabilizar e promover a aderência desta superfície com outra camada de revestimento betuminoso subsequente. (DNIT, 2009)

A imprimação asfáltica impermeabilizante ou rega consiste na aplicação de uma fina película de material betuminoso sobre uma superfície granular concluída de uma das camadas do pavimento - como a base ou a sub-base, por exemplo. Seu objetivo é aumentar a coesão da superfície imprimada graças à penetração do material betuminoso utilizado. Como o próprio nome da técnica indica, também tem como objetivo impermeabilizar a camada inferior e aumentar a aderência com a camada superior. A imprimação impermeabilizante deve ser executada com materiais que possuem baixa viscosidade na temperatura de aplicação e cura suficientemente demorada. (DER/SP, 2005)

Os materiais mais utilizados para execução das regas são as emulsões asfálticas ou betume diluído que ao chegar à obra devem apresentar por parte do fabricante ou distribuidor o certificado de resultados de

análise dos ensaios de caracterização exigidos pela especificação, correspondente à data de fabricação, ou ao dia de carregamento para transporte com destino ao canteiro de serviço. (DER/SP, 2005).

Outra premissa muito importante para a execução de qualquer rega na pavimentação é que o ligante betuminoso não deve ser distribuído quando a temperatura ambiente for inferior a 10 °C, ou em dias de chuva, ou quando a superfície a ser imprimada apresentar qualquer sinal de excesso de umidade.

A taxa de aplicação da rega betuminosa é obtida experimentalmente, variando-se a taxa de aplicação entre 0,4 l/m² a 1,5 l/m², em função do tipo e textura da camada a ser imprimada. A taxa determinada deve ser aquela que após 24 horas, produza uma película asfáltica consistente na superfície imprimada, sem excessos ou deficiências. (DER/SP, 2005).



Figura 2.6 – Ilustração da aplicação de uma rega de colagem

Fonte: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br>

2.5 GERENCIAMENTO E CONSERVAÇÃO DE PAVIMENTOS.

Toda estrutura construída, deve ter gerenciamento adequado por meio do qual a estrutura é monitorada e todas as alterações ocorridas são identificadas, para orientação de quais devem ser as intervenções necessárias para a sua conservação de modo a sanar alterações prejudiciais. Em estruturas de pavimentos o gerenciamento é essencial, como foi observado em DNER (1980) e onde se apresentou os critérios para um sistema de gerência de conservação. Dentre os itens abordados estão o envelhecimento dos pavimentos em decorrência da falta de manutenção gerando uma escassez de recursos em novos projetos, em vista progressiva degradação das vias existentes; as restrições impostas pelos financiadores que passaram a estimular o emprego de técnicas racionais; e não esquecendo as condições de conforto e segurança para os usuários, sendo os custos operacionais dos veículos, principalmente no consumo de pneus e combustíveis, e nos custos de manutenção e tempo de viagem (DNIT, 2001).

No caso do gerenciamento de rodovias estaduais sob concessão em São Paulo, uma vez atestada a necessidade de acompanhamento, a Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) publicou um manual, anexo 06 concorrências internacionais nº 05/2016, para serviço correspondente às funções de conservação. Este anexo refere-se aos programas e serviços de conservação a serem realizados pela concessionária, após assinar a transferência e se tornar responsável pela via concedida. Contudo, esses serviços não devem limitar-se apenas a este manual, a ARTESP fundamenta, no anexo 06 concorrências internacional nº 05/2016 (p.4), que:

Para a realização de todas as atividades contempladas do PII [Programa Intensivo Inicial] a concessionária deverá observar as normas, instruções de projetos, portarias e padrões vigentes da ARTESP, DER/SP, DNIT, ABNT (nesta ordem) e na falta destes, observando-se normas internacionais consagradas.

A importância de se ter em atuação o conjunto de norma e procedimento gera uma extensa rede de informações e dados, esse modo de coesão de conhecimento foi utilizado em 1983 para a criação da Norma Rodoviária do DNER – ES 128/83, onde influentes departamentos apresentaram referências para a sua confecção. No decorrer das décadas subsequentes essa norma foi sendo moldada nos novos conhecimentos obtidos por experiências vividas em trechos onde foi aplicada. Em 2011, o DNIT apresenta o manual de gerência de pavimentos, o conceito usado neste manual é a interação mútua entre os dados de projetos com os dados em campo, ou seja, as etapas de planejamento, projeto, construção e manutenção estão ligadas diretamente, devendo sempre um procedimento ser embasado no outro e todos ligados ao banco de dados para oferecer ou utilizar informações. A Figura 2.7, a seguir, extraída do manual, mostra graficamente a ideia explanada, onde também podem ser observados outros fatores externos como recursos orçamentários e as diretrizes políticas.

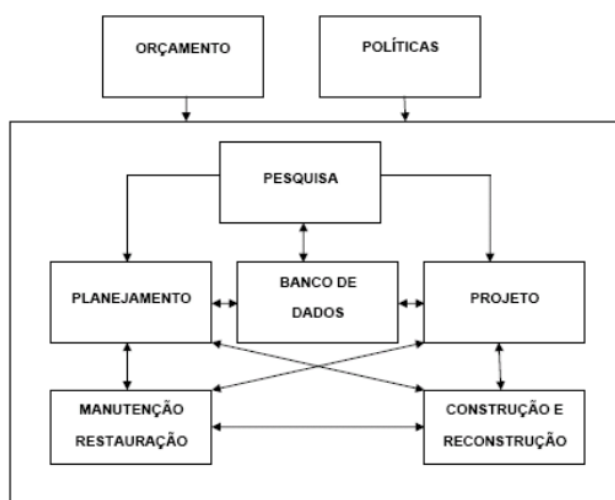


Figura 2.7 - Sistema de gerência de pavimentos.

Fonte:(Adaptado de DNIT, 2011 - Manual de gerenciamento de pavimentos.)

Tanto o anexo da ARTESP (ano) quanto o manual do DNIT (ano) explicitam a importância do monitoramento e conservação das vias, todavia os conteúdos seguem por vertentes diferentes complementando um ao outro. O manual da ARTESP é composto por quatro capítulos relevantes à pavimentação, sendo que cada um trata de uma situação específica de conservação. No primeiro são abordados dois programas, o Programa Intensivo Inicial (PII) e o Programa de Adequação Inicial do Sistema Transferido (PAI) em suma, ambos consistem em identificar e solucionar os problemas encontrados na faixa de domínio, todas as informações obtidas devem ser disponibilizadas para a ARTESP. Para a pavimentação devem ser apresentados em relatórios, o levantamento de índices com seus devidos limites, índices admissíveis, e também uma análise da situação do pavimento. Nos capítulos seguintes são apresentadas medidas tomadas para cada tipo de conservação, sendo no capítulo dois, abordadas questões referentes à conservação de rotina, que compreende os serviços executados, nas rodovias em operação, para manter a qualidade da via próxima à apresentada no início de vida. Para que essa manutenção seja efetuada de maneira eficiente o planejamento das etapas deve ser precisamente estudado, para não haver mão-de-obra, materiais, ou até interrupção desnecessária na faixa de domínio causando não só desconforto para o usuário, mas também custos indevidos.

No capítulo três são retratadas a conservação e manutenção especial que tem a função de reabilitar a via para o uso, ou seja, uma vez que houve o término da vida útil da estrutura; no caso da pavimentação essas medidas são tomadas para conter patologias superficiais e/ou profundas. O capítulo quatro trata da conservação e manutenção de emergência, que como é descrito, segundo ARTESP anexo 06 nº 05/2016 (p.93), “[...] como o serviço ou obra necessário para reparar, repor, reconstruir ou restaurar os trechos ou estruturas da rodovia, que tenham sido seccionadas, obstruídas ou danificadas, [...]”, sabe-se que esses obstáculos podem impossibilitar o tráfego parcial ou total na via, além de expor os usuários a riscos de vida. No caso dos pavimentos uma situação de calamidade seria a abertura de crateras de grande dimensão como ocorreu recentemente na cidade de Fukuoka, no Japão, onde o solo cedeu cerca de 300 metros quadrados, no cruzamento de duas grandes avenidas diante da estação ferroviária de Hakata (MEIRELES, 2016).

A estrutura do manual de gerência de pavimentos do DNIT (2001), tem enfoque no sistema de gerência, ou seja, visa predominantemente a estrutura de coleta de dados e informações. Estruturado em oito capítulos, mas com quatro questões fundamentais que são o sistema de referência, avaliação dos pavimentos, determinação das prioridades e elaboração do programa plurianual de investimentos. O sistema de referência nada mais é do que uma forma de apresentar as rodovias e seus trechos organizadamente com seus respectivos dados, e que possam ser facilmente localizados quando é necessário obter informações sobre aquela devida extensão. A avaliação do pavimento é desenvolvida para ser o ponto de partida da determinação das condições funcionais, estruturais e operacionais, além

desses conhecimentos, ela abrange informações como histórico de implantação, manutenção e melhoramentos; orografia da região; características regionais da rodovia e tráfego, esses dados devem ser mantidos atualizados e disponíveis para consultas.

A determinação das prioridades é o ponto de otimização, onde são alocados os serviços e o devido direcionamento dessas funções. Ou seja, após a avaliação do pavimento é repassado as informações de como se encontra o mesmo e então é definido se há ou não a necessidade de algum serviço, se sim qual – manutenção ou restauração – e de qual proporção. O resultado será a viabilidade econômica para tais procedimentos. O fluxograma abaixo, ilustrado na Figura 2.8, estrutura os procedimentos e suas devidas tomadas de decisão.



Figura 2.8 - Fluxograma de tomada de decisão.

Fonte: (Adaptado do DNIT 2011 - Manual de gerencia de pavimentos.)

A elaboração do programa plurianual de investimentos é embasada no resultado da avaliação econômica empreendida, conjuntamente com as informações de setores técnicos, sendo assim o produto final mais importante de um Sistema Gerencial de Pavimentos (SGP). Os requisitos básicos para este tópico são a coesão das etapas da implantação e o poder aquisitivo existente; a participação de Unidades Regionais, e o controle, avaliação e atualização permanente para que as incoerências encontradas no SGP devido a imperfeições incorporadas ao programa ou de divergências entre a situação projetada e a situação real da pavimentação.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS CONVENCIONAIS

Neste capítulo são apresentados os métodos de dimensionamento mais utilizados no Brasil e em Portugal. Estes métodos de dimensionamento serão utilizados no desenvolvimento desta dissertação, como base teórica para o dimensionamento dos pavimentos que fazem parte do estudo de caso.

3.1 MÉTODO DO DER/SP (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO)

Consiste no dimensionamento de pavimentos flexíveis conforme as instruções do IP-DE-P00/001: Projeto de Pavimentação (DER/SP, 2006).

O método baseia-se fundamentalmente nas características de suporte do solo de fundação e dos materiais que constituem a estrutura do pavimento, bem como nos parâmetros de tráfego. Atende à limitação de deformações permanentes excessivas e de tensões que possam provocar a ruptura por cisalhamento das camadas de base, sub-base e subleito.

A espessura total necessária é determinada em termos de material granular em função das características geotécnicas do subleito e do nível de tráfego solicitante, parâmetro também utilizado para a determinação da espessura mínima de revestimento asfáltico.

As camadas constituintes do pavimento são obtidas pela resolução sucessiva das inequações 1, 2 e 3:

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (1)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (2)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{REF} \geq H_m \quad (3)$$

Onde:

R = espessura do revestimento;

B = espessura da base;

H₂₀ = espessura sobre a sub-base;

h₂₀ = espessura da sub-base;

H_n = espessura sobre o reforço do subleito;

h_n = espessura do reforço do subleito;

H_m = espessura do pavimento;

K_R, K_B, K_S, K_{REF} = coeficientes de equivalência estrutural.

A Tabela 3.1 a seguir apresenta as espessuras mínimas de revestimento asfáltico recomendadas conforme o número N.

Tabela 3.1 - Espessuras mínimas recomendadas para o revestimento asfáltico (IP-DE-P00/001)

N	Tipo e Espessura de Revestimento
$N \leq 10^6$	Tratamento superficial
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimento Betuminoso de 5 cm
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Revestimento Betuminoso de 7,5 cm
$1 \times 10^7 < N \leq 2,5 \times 10^7$	Revestimento Betuminoso de 10,0 cm
$2,5 \times 10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Revestimento Betuminoso de 12,5 cm
$N > 5 \times 10^7$	Revestimento Betuminoso de 15,0 cm

(Fonte: DER/SP, 2006).

As espessuras equivalentes H_m, H_n e H₂₀ são obtidas no ábaco de dimensionamento apresentado nas Figura 3.1 e 3.2, no qual a espessura em termos de material granular é função do número N e dos valores do ISC do subleito, sub-base e/ou do reforço de subleito.

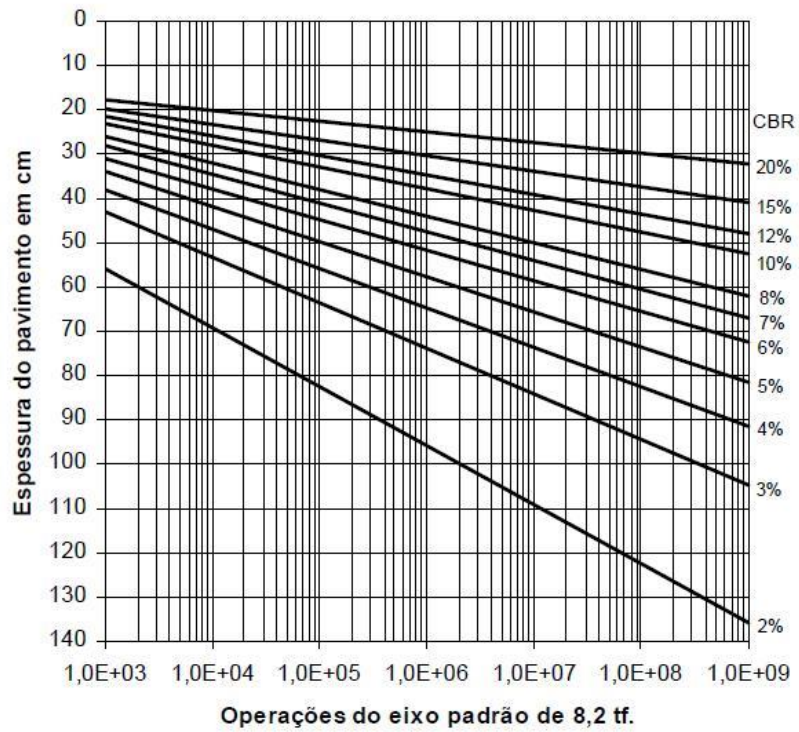


Figura 3.1 - Ábaco de dimensionamento - Manual de Pavimentação

(Fonte: Publicação IPR-719 - DNIT, 2006)

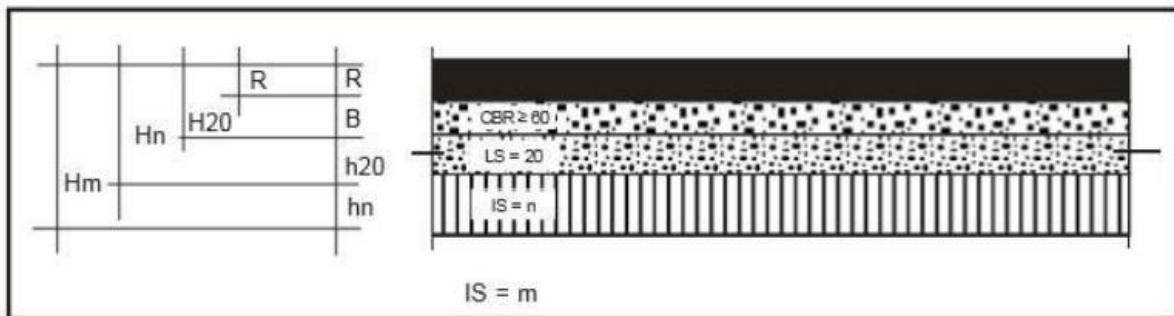


Figura 3.2 - Espessuras do Pavimento

Fonte: (Publicação IPR-719 - DNIT, 2006)

3.2 MÉTODO SHELL (CLAESSEN ET AL., 1997)

Para o dimensionamento por este método é necessário primeiramente obter a temperatura de serviço das camadas, estas temperaturas são obtidas, segundo Shell (Claessen et al., 1997), por meio do ábaco, que está em função das espessuras das camadas e da temperatura média mensal do ar ponderada (T_{mmap}).

Deste modo, é necessário determinar a temperatura de serviço, para isso utiliza-se a temperatura média mensal do ar do local onde será construído do pavimento.

Deste modo as expressões utilizadas para efeito de cálculo devem ser:

- Fator de correção;

$$W = 0,0723 \times e^{0,1296 \times T_{mma}} \quad (4)$$

Onde TMMA é a temperatura média de cada mês para um período mínimo de vinte anos.

- Fator de correção médio;

$$W_{\text{médio}} = \frac{\sum w}{n^{\circ} \text{ meses}} \quad (5)$$

- Temperatura média mensal anual ponderada.

$$T_{mmap} = 7,7068 \times \ln(W_{\text{médio}}) + 20,257 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (6)$$

Na figura 3.3 é apresentado o ábaco utilizado pelo método Shell para a determinação das temperaturas das camadas de misturas betuminosas que compõe a estrutura do pavimento:

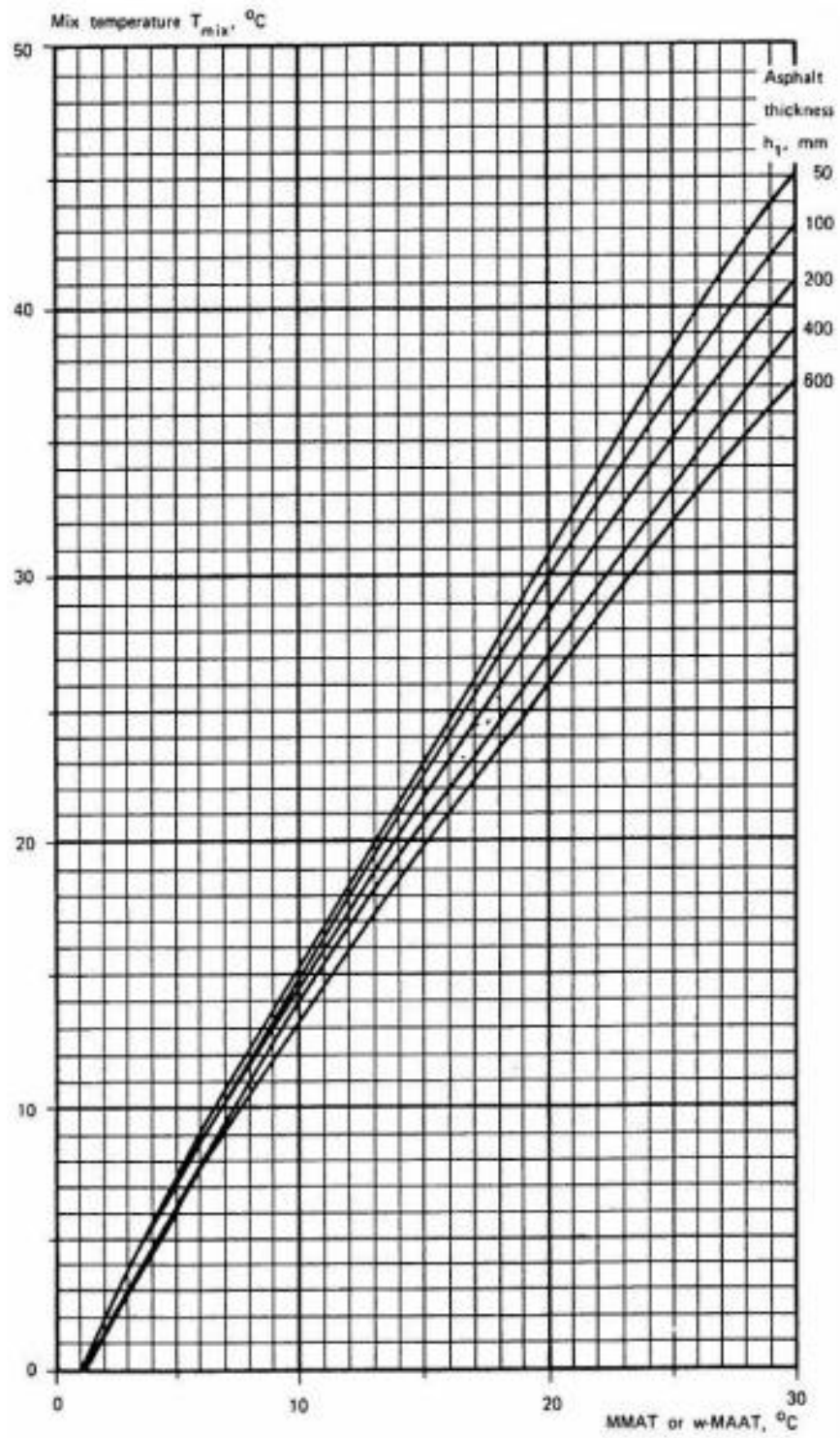


Figura 3.3 - Temperatura de serviço das camadas.

Fonte: (Claessen et al., 1997)

Após determinação das temperaturas de serviço para cada camada do pavimento, é necessário obter os módulos de deformabilidade dessas mesmas camadas e do subleito do pavimento.

O módulo de deformabilidade (ou Young) trata-se de um parâmetro mecânico que permite avaliar o quociente entre a tensão aplicada e extensão. Este parâmetro caracteriza mecanicamente os materiais de todas as camadas do pavimento.

De uma forma sucinta, esta determinação divide-se na seguinte forma:

- Módulo de deformabilidade da fundação (E_f);

$$E_f = 10 \times \text{CBR} \quad (6)$$

- Módulo de deformabilidade da camada de sub-base (E_s);

$$E_s = E_f \times (0,20 \times h_s^{0,45}) \quad (7)$$

Em que:

E_f - Módulo de deformabilidade da fundação (MPa)

H_s – espessura da camada granular (mm)

3.2.1 Módulo de deformabilidade das camadas betuminosas (Emb).

- **Shell (Misturas asfálticas convencionais);**

$$E_m = 10^A \text{ (Pa)} \quad (8)$$

Em que:

A – Parâmetro definido pelas seguintes expressões:

$$T_c = 1/V \quad T_c \text{ (tempo de de solicitação (s)); } V \text{ (Velocidade de projeto);}$$

$$IPEN_r = \frac{1951,55 - 500 \times \log(\text{PEN25r}) - 20 \times \text{TABr}}{50 \times \log(\text{PEN25r}) - \text{TABr} - 120,15} \quad - \quad \text{Índice de penetração} \quad (9)$$

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \times t_c^{-0,368} \times 2,718^{-IPEN_r} \times (\text{TAB}_r - T)^5 \quad - \quad \text{Rigidez do betume (MPa)} \quad (10)$$

$$V_{\text{bet}} = \frac{P_{\text{bet}} \times 2350}{1030} \quad - \quad \text{Volume de betão;}$$

$$Sm_{108} = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \times Va + 2,135 \times 10^{-4} \times Va^2 \quad (11)$$

$$S_{m_{3109}} = 10,82 - \frac{1,342 \times (100 - V_a)}{V_a + V_{bet}} \quad (12)$$

$$S_{68} = 0,6 \times \log \left(\frac{1,37 \times V_{bet}^2 - 1}{1,33 \times V_{bet} - 1} \right) \quad (13)$$

$$S_{89} = 1,12 \times \left(\frac{S_{m_{3109}} - S_{m_{108}}}{\log(30)} \right) \quad (14)$$

$$A = \frac{S_{m_{89}} + S_{m_{68}}}{2} \times [\log(S_b) - 8] + \frac{S_{m_{89}} - S_{m_{68}}}{2} \times |\log(S_b) - 8| + S_{m_{108}} \quad (15)$$

- **Capitão (2003) - (Misturas de alto módulo).**

$$E_{MBAM} = 30231 - 2151,1 \times t_c - 331,9 \times T - 853,5 \times V_{bet} - 16,94 \times \xi_{Tadm} + 6,33 \times S_b \text{ (MPa)} \quad (16)$$

Em que:

$t_c = 1/V$ - Tempo de solicitação (s);

$V_{bet} = \frac{P_{bet} \times 2300}{1040}$ - Volume de betume (%);

$\xi_{Tadm} = 120 \mu\text{m}$ - Extensão de tração admissível;

$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \times t_c^{-0,368} \times 2,718^{-IPENr} \times (TAB_r - T)^5$ - Rigidez do Betume.

3.2.2 Extensões

Após o cálculo dos módulos de deformabilidade das camadas constituintes do pavimento, é necessário verificar as extensões máximas admissíveis.

Esta análise tem como principal objetivo verificar os seguintes critérios:

- Fadiga –fissuração por tração nas camadas (extensão radial ϵ_t);
- Deformação permanente – (extensão vertical de compressão ϵ_v).

Os critérios de ruína adotados pela Shell (1977, apud LOPES, 2009) levam em consideração os esforços de tração nas camadas asfálticas e a deformação permanente no topo do subleito. A Shell (1977, apud LOPES, 2009) relata que as tensões de tração nas camadas são obtidas através das equações:

$$Et = (0,856Vb + 1,08) / Em^{0,36} * N^{0,20} \quad (17)$$

Em que:

- Et = Deformação de tração;
- Vb = Percentagem volumétrica de betume;
- Em = Módulo de deformabilidade da mistura;
- N = Número de repetições do eixo padrão.

A Shell (1977, apud LOPES, 2009) traz a equação abaixo, para que possamos determinar a deformação vertical de compressão no topo do subleito:

$$Ev = Ks * N^{-0,25} \quad (18)$$

Em que:

- Ev = Deformação vertical;
- N = Número de repetições do eixo padrão;
- Ks = Fator que leva em conta a probabilidade de sobrevivência do pavimento, adotado $1,8 \times 10^{-2}$ para chance de sobrevivência de 95%.

CAPÍTULO 4

PAVIMENTO PERPÉTUO

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O termo pavimento perpétuo é basicamente aplicado para estruturas de pavimentação que apresentem longos períodos de vida útil, mais de 30 anos, apenas mantendo reparos em sua camada de rolamento (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

O conceito de pavimento asfáltico de mistura a quente de longa duração surgiu por volta de 1960 quando buscavam soluções para as patologias encontradas nas rodovias, em 2000 a França já era responsável por aproximadamente 216 mil toneladas de asfalto duro produzido e alcançava a posição de liderança de acordo com a Associação Internacional de Congressos Rodoviários (AIPCR) (CORTÉ, 2001). Nos Estados Unidos da América (EUA) por várias décadas foram utilizados dois tipos de pavimento denominados *full-depth*, que se caracteriza por ter todas as camadas acima do subleito constituídas por misturas asfálticas, e *deep-strength*, que possui revestimento e base em misturas asfálticas sobre uma camada de agregados com espessuras mínimas acima do subleito, ambas estruturas descritas foram projetadas com o dobro de vida útil dos pavimentos flexíveis tradicionais e acabaram por atuar além do tempo original estabelecido carecendo apenas de restauração da camada de rolamento com uma sobreposição fina ou fresa e recomposição (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

Segundo Newcomb et al. (2001) os métodos de pavimentação apresentaram vantagens em sua estrutura mais compacta, já que não utilizam camadas espessas de materiais granulares; a diminuição considerável dos efeitos de trincamento por fadiga (trincas tipo couro de jacaré que ocorrem de baixo para cima, causadas por repetição dos carregamentos) e demais patologias causadas por tensões de tração na face inferior da camada asfáltica; além de proporcionar aos usuários das vias menor perturbação com manutenções e reparos.

Assim como o *full-depth* o pavimento perpétuo tem em todas as suas camadas misturas asfálticas não se limitando apenas a camada de revestimento, o projeto para um pavimento duradouro deve englobar questões peculiares de cada região como clima e tráfego local (GRILLO, 2015). Newcomb et al. (2001, p.4, tradução nossa) salienta que, “[...] a menos que se dê a devida atenção à proteção contra o gelo, a

qualidade do passeio pode degenerar de bom para pobre em questão de meses devido ao acúmulo diferencial de gelo no subsolo. ”¹

A abordagem do projeto de pavimentos perpétuos deve considerar para o desempenho da estrutura a interação entre as diversas camadas do pavimento, por meio de suas resistências e módulos (VON QUINTUS, 2001).

Ainda sobre as abordagens de projeto devem também atuar na observação do desempenho do pavimento, utilizar escalas que representem o tráfego, apresentar indicadores de qualidade dos materiais e especificar as espessuras das camadas que, para um determinado nível de qualidade, tende a aumentar com o aumento do tráfego. Todavia, esse aumento de espessura atingirá o ponto de suportar adequadamente as cargas mais pesadas e a adição de pavimento apenas resultará em custos excessivos e gasto de materiais desnecessários (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

4.2 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

O entrosamento entre as diferentes camadas e a reação do pavimento às ações ocorridas são fundamentais para o desempenho do pavimento, já que as cargas dos veículos sobre o passeio geram tensões e essas por suas vezes se propagam à profundidade da estrutura gerando patologias, como a fissuração e o entupimento que em conjunto com essas cargas causam avarias estruturais. A concentração desses danos reflete na superfície e expõem as condições precárias da estrutura e a necessidade de recapeamento, em situações onde apenas a camada de superfície foi afetada, ou nas piores condições reconstrução de toda a estrutura do pavimento. É através desses conceitos que a prevenção da degradação estrutural dos pavimentos, ao longo das décadas, está sendo desenvolvida, embasada em estudo das espessuras de camadas de pavimento e combinações de materiais apropriados (VON QUINTUS, 2001).

O método mecanicista-empírico emprega conceitos da física de ação e reação, sendo que os carregamentos aplicados geram reações verticais, horizontais e tensões no pavimento, dessa maneira é possível identificar os pontos críticos da estrutura dando aos profissionais, informações técnicas adequadas para selecionar os materiais e espessura das camadas para que se tenha a vida útil desejada a estrutura do pavimento. No caso de pavimentos perpétuos o estudo deve abranger a camada superior com rigidez suficiente para minimizar as deformações permanentes e camadas inferiores com espessura e flexibilidade para evitar o fissuramento por fadiga (VILLACORTA, s.d.), ou seja, a camada superior deve ter espessura suficiente, materiais adequados e estudo de tráfego de modo a conter as fissurações, trilhas

¹ [...] unless proper attention is given to frost protection, ride quality may degenerate from good to poor in a matter of months because of differential frost heave in the subgrade. (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001,p.4)

de rodas, fadigas em sua estrutura sem transpassar para as camadas subsequentes; as camadas base e intermediária por sua vez deve apresentar adequada versatilidade para não sofrer fadigas e trincamentos em suas estrutura e comprometer o pavimento . Em síntese, a ideologia apresentada por Newcomb et al. (2010) para pavimentos perpétuos é definir que a maioria das ações (tensões e deslocamentos) ocorridas em campo nas camadas do pavimento sejam consideradas inferiores as que causariam danos estruturais. Para exemplificar tal condição, o fluxograma abaixo apresenta, esquematicamente, a concepção de um pavimento perpétuo adotando o método mecanicista-empírico.



Figura 4.1 – Fluxograma de concepção de pavimentos perpétuos. (Adaptado de Grillo, 2015)

No fluxograma, as premissas para a concepção de um pavimento perpétuo se iguala aos demais pavimentos, onde as características dos materiais são analisadas e optam não só pela qualidade, mas também pela abundância na região; a intensidade do tráfego e suas características também são postas em destaque, pois a estrutura estará exposta as condições impostas pelo escoamento do tráfego e essa solicitação irá variar com a intensidade e velocidade do fluxo na via (NUNN E FERN,2001); a espessura das camadas do pavimento dita a vida útil da estrutura, pois quando em excesso ou em falta aceleram a susceptibilidade do pavimento às patologias superficiais ou profundas (VON QUINTUS, 2001). Após a análise destas três fundamentais vertentes gera-se o modelo analítico que será testado quanto a sua resposta às tensões e deformações impostas, se a tensão e deformação aplicada e suportada pelo modelo for acima do limite aceitável podemos seguir adiante com a elaboração do projeto, se não deve-se voltar

ao topo e analisar novamente as características fundamentais e desenvolver um novo modelo analítico que suporte das cargas impostas. As patologias que ocorrem nos pavimentos podem ser limitadas ao revestimento ou, nos piores casos, se estenderem as outras camadas internas e ao subleito, Nunn e Fern (2001, p.34, tradução nossa) ressaltaram que,

“A deformação dentro das camadas superiores de betão betuminoso não tem um efeito sério sobre a integridade estrutural do pavimento. Por outro lado, uma deformação estrutural excessiva é um sintoma de que a capacidade de espalhar carga das camadas asfálticas e granulares é insuficiente para proteger o subleito e, se não for controlada, levará eventualmente a deterioração da estrutura do pavimento.”²

A formação de trincamentos por fadiga ou outras patologias de caráter estrutural geralmente inicia-se com a repetição de tensões no fundo de uma mesma camada, segundo Newcomb et al. (2010, p.11, tradução nossa) “A formação de fadigas/fissuração estruturais ocorre quando a resistência total da estrutura do pavimento é tal que uma deformação permanente de grande dimensão pode ocorrer tanto na base granular como no subleito sob o tráfego imposto”³, essas trincas irão possibilitar o acesso da água à estrutura do pavimento, e o efeito dessa água sobre os componentes da estrutura altera o desempenho das camadas, resultado em uma deterioração acelerada do pavimento.

Sabe-se que ao reduzir as deformações máximas na parte inferior do revestimento as fissurações se estabelecem na superfície, essa redução pode ser feita aumentando a espessura da camada asfáltica. Uma vez que, na camada de superfície, as tensões serão concentradas conjuntamente com o desgaste causado pelo tráfego e a vulnerabilidade será inevitável, há a necessidade de acompanhamento para a manutenção funcional da via.

² Deformation within the upper asphalt layers does not have a serious effect on the structural integrity of the pavement. On the other hand, excessive structural deformation is a symptom that the load- spreading ability of the asphalt and granular layers is insufficient to protect the subgrade and, if unchecked, will lead eventually to a breakup of the pavement structure. (NUNN, FERN, 2001, p.34)

³ Structural rutting occurs when the overall strength of the pavement structure is such that large permanent deformation can take place either in the granular base or subgrade under the imposed traffic. (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010, p.11).

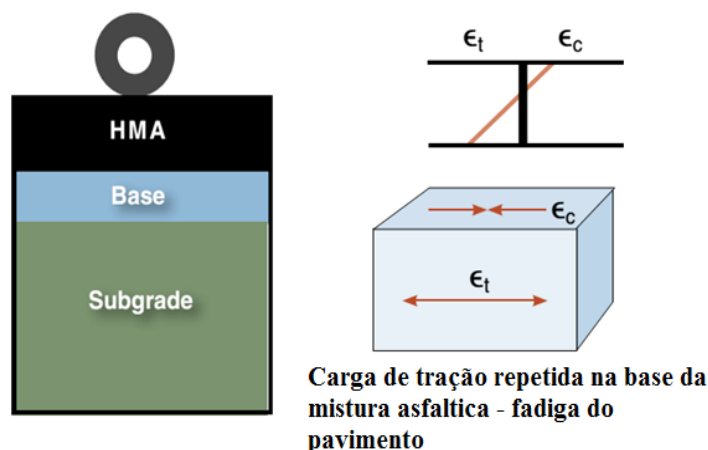


Figura 4.2 - Esquema de trincamento por fadiga causado por tensões de tração na fibra inferior do revestimento.

Fonte: Adaptado de Newcomb et al., 2010, p.13

Já as trilhas de rodas são descritas por Nunn e Fern (2001, p.34, tradução nossa) como:

“Trilhas de rodas (deformação permanente) resultam de deformação em uma ou mais camadas do pavimento. Em um extremo, é restrito à camada ou camadas de misturas asfálticas mais acima, denominadas deformações permanentes de superfície. No outro extremo, o componente principal de deformação surge nos subleitos, e isso é denominada deformação estrutural.”⁴

Para alguns estudiosos esses afundamentos, tanto no subleito quanto nas camadas superiores, podem ser inibidos com uma espessa camada de rolamento ou aumentando a rigidez de uma ou mais camadas, acreditam hipoteticamente que impondo um valor limite para a compressão vertical aplicado pelos carregamentos não ocorreriam deformações plásticas nas camadas inferiores desde que a deformação compressiva no subleito se mantivesse dentro do limite estabelecido.

Utilizando o mesmo princípio de estabelecer valores limites, pesquisadores da Universidade de Illinois, desenvolveram o conceito de *Subgrade Stress Ratio* (SSR), que consiste basicamente na razão entre a tensão do subleito e a resistência à compressão não confinada do solo, como apresenta Newcomb et al. (2010, p. 12, tradução nossa):

“Eles observaram que, para os solos argilosos em seu estudo, a transição de uma condição estável para uma condição instável ocorreu quando a SSR estava na faixa de 0,50 a 0,60. Para fins de projeto, eles recomendam usar um SSR de 0,42, embora reconheçam que esse critério de afundamentos não está bem estabelecido.”⁵

⁴ Rutting is the result of deformation in one or more of the pavement layers. At one extreme it is restricted to the uppermost asphalt layer or layers, termed *surface rutting*. At the other extreme, the main component of deformation arises in the subgrades, and this is termed *structural deformation*. (NUNN, FERN, 2001, p.34)

⁵ They used the ratio of the subgrade stress to the unconfined compressive strength of the soil, known as the subgrade stress Ratio (SSR). they noted that for clay soils in their study, the transition from a stable to an unstable condition

Na figura 4.3 a seguir são estabelecidos os critérios de dimensionamento para as camadas do pavimento perpétuo de acordo com a APA – Asphalt Pavement Alliance.

4.1 CAMADAS DO PAVIMENTO PERPÉTUO

Para ser um pavimento perpétuo a estrutura deve ser constituída de uma camada superficial resistente às deformações permanentes, uma camada intermediária com alto módulo de resiliência, e uma camada de base que deve ser flexível e resistente à fadiga, para que todas as tensões sejam concentradas na camada de superfície onde o reparo será efetuado com mais facilidade (GRILLO, 2015).



Figura 4.3 - Estrutura de um pavimento perpétuo. (Adaptado de Grillo, 2015)

Camada de base: deve ter resistência às fissuras por fadiga causadas pela passagem de tráfego e a repetição de deformação, a proteção desta camada pode ser feita através do aumento do teor de asfalto que age como uma capa inibindo a formação e a crescimento de fissuras (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010). Para garantir uma estrutura sólida e durável a combinação de fatores como a espessura total adequada para a região, o uso de uma granulometria mais fina conjuntamente com o aumento do teor de asfalto e a compactação resulta no aumento da sua densidade (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON,2001).

A probabilidade de esta camada sofrer com a umidade deve ser considerada nos testes, por apresentar a possibilidade de ficar em contado prolongado com a água, por isso misturas com agregados graúdos são

occurred when the SSR was in the range of 0.50 to 0.60. For design purposes, they recommend using an ssR of 0.42, although they acknowledge that this rutting criterion is not well established. (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010, p.12)

descartadas para esse tipo de pavimento, pois sua permeabilidade é grande, e essa susceptibilidade deve ser contida para não reduzir a capacidade de carga da estrutura (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

Outro ponto a ser considerado é a abertura desta camada durante a construção para o tráfego, para isso devem ser tomadas algumas providências como minimizar ou mitigar as tensões de fadiga no fundo da camada para que não haja acúmulos de tensões, alcançado esse objetivo pode-se padronizar para a camada intermediária a mesma estrutura da base (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

Na pesquisa de Newcomb et al. (2010) diversos ensaios e testes foram executados até se concluir que usar um asfalto mais rígido aumenta significativamente a resistência a fadiga, Newcomb et al. (2010, p.25, tradução nossa) apresentam um breve relato sobre o estudo de profissionais que embasados nesta definição fizeram análises e constataram os resultados positivos às suas especulações.

Molenaar et al. (2009) sugeriram que a utilização de um material de base rígido poderia reduzir a espessura de mistura asfáltica em até 40 por cento. Sua abordagem era usar um cimento asfáltico modificado com 6,0 a 7,5 por cento de polímero. Xiang et al. (2009) avaliaram misturas com três teores de asfalto e descobriram que o mais duro dos três [...] apresentou melhor desempenho como aglutinante nas camadas inferiores do pavimento. [...] Harvey et al. (2004) descobriram que a melhor maneira de melhorar a vida de fadiga era usar um asfalto mais duro, não modificado com um teor mais alto para conseguir vazios muito baixos no campo. ⁶

Camada Intermediária: ou camada de regularização como é apresentada por Newcomb et al. (2001), deve ser durável e estável. A estabilidade depende do atrito entre os agregados que compõe a camada e o ligante asfáltico de alta temperatura. Os agregados utilizados na camada ligante podem ser de diâmetro máximo nominal (37,5mm), pois assim reduziria o custo devido ao menor teor de asfalto, desde que se atente aos vazios internos que serão formados por onde pode ocorrer a passagem de água, tal condição pode ser minimizada com a correta compactação em campo (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

Outra abordagem utilizada para a estabilidade de contato por atrito poderia ser a utilização de agregados menores como o cascalho e pedra britada com um tipo de agregado maior para formar um suporte da

⁶ Molenaar et al. (2009) suggested that using a stiff base material could reduce the asphalt thickness by up to 40 percent. Their approach was to use a heavily modified asphalt binder with 6.0 to 7.5 percents Bs polymer. Xiang et al. (2009) evaluated mixtures with three grades of asphalt and found that the hardest of the three [...] performed best a subinder in the lower pavement layers. [...] Harvey et al. (2004) found that the best way to improve fatigue life was to use a harder, unmodified asphalt at a higher asphalt content to achieve very low voids in the field. (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010, p.25).

camada. Este dimensionamento é essencial para esta camada onde as tensões serão aplicadas diretamente e podem causar fissurações através da falha por cisalhamento (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

Camada de superfície (rolamento): apresenta alguns parâmetros para a escolha adequada do de quais características deve apresentar, as condições de tráfego devem ser analisadas para que a superfície suporte o carregamento aplicado sem ruir e não gere gastos excessivos com o material aplicado; o ambiente no qual será construída deve ser estudado em todas as suas estações para abordar as fases críticas que esse pavimento terá de suportar em sua vida útil; a economia também deve ser um fator coeso aos demais, mas não preponderante de modo que o custo não afete a funcionalidade da estrutura (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

Já no quesito desempenho, a resistência ao afundamento (trilha de roda) e fissuração da superfície, atrito e aderência adequados, minimização do ruído pneu-pavimento e diminuição do efeito *spray*, devem orientar o tipo de material compatível para a situação (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

Dentre as camadas de superfícies aplicadas em pavimentos perpétuos para cargas de tráfego intenso estão o *Stone Matrix Asphalt (SMA)* e *Open Graded Friction course (OGFC)*(NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010). O SMA aparece em situações que é necessária alta resistência à deformação permanente, durabilidade, impermeabilidade e resistência ao desgaste, essas características são concedidas a este tipo de mistura asfáltica devido às suas características granulométricas conjuntamente com a combinação do mástique asfáltico (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

Em outros casos o uso de mistura asfáltica do tipo OGFC, camada porosa de atrito como é conhecido no Brasil, é utilizado quando é necessário que a camada apresente volume de vazio tal que proporciona maior drenabilidade da água da superfície da via, segundo Newcomb et al. (2010, p.28, apud HUBER, 2000) “As misturas devem ser concebidas de forma a terem cerca de 18 a 22% de vazios para proporcionar um bom desempenho a longo prazo”⁷. Pode ser adicionada fibra ao asfalto durante a construção para minimizar a intrusão da água, e polímeros que ajudam no desempenho a longo prazo (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

Contudo, de acordo com Newcomb et al. (2010), situações em que não há tráfego intenso, ou em que o tráfego de veículos de grande porte não é significativo, podem ser usadas uma mistura asfáltica comum bem projetada e com testes de verificação feitos durante a concepção da mistura. Em locais de elevadas temperaturas é imprescindível que a estrutura resista ao tráfego pesado e lento; para as baixas temperaturas deve resistir à fissuração térmica (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

⁷Mixtures should be designed to have about 18 to 22% voids to provide good long-term performance. (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010 *apud* HUBER, 2000, p.28)

Apesar de ter em mente essa base de estrutura, ela pode variar de acordo com as necessidades da região, com o tráfego ao qual será exposta, às condições do subleito, à umidade e outras tantas particularidades que vão sendo encontradas ao longo dos estudos. Na cidade de Montgomery no estado de Alabama nos Estados Unidos, foram construídas pistas de testes para pavimentos perpétuos. Esta pista concebida pela NCAT (National Center for Asphalt Technology) possui 2,7 km de extensão e 46 trechos, sendo dois (N8 e N9) os trechos compostos por pavimentação perpétua e utilizados para estudo.

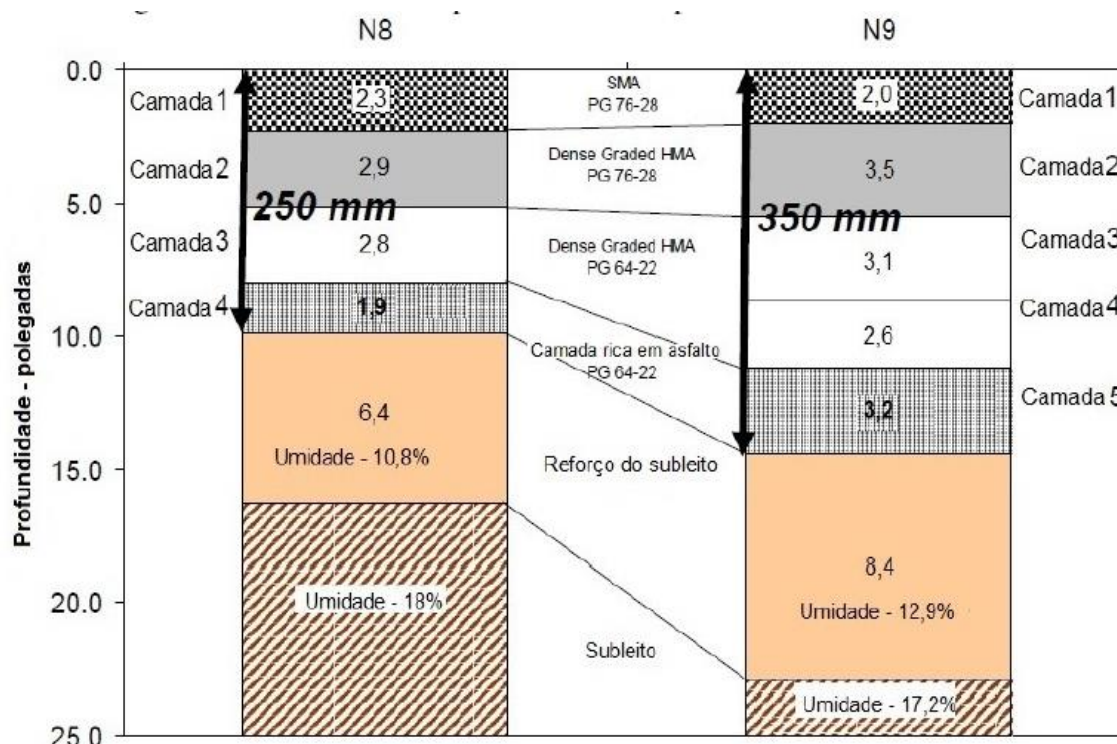


Figura 4.4 - Estruturas dos pavimentos nas pistas de testes N8 e N9

Fonte: Adaptado de TIMM (2010) por GRILLO (2015).

SMA – Stone Matrix Asphalt - Mistura asfáltica de graduação descontínua

Dense Graded Hot Mix Asphalt – Mistura asfáltica de graduação densa

PG – Performance Grade – Intervalo de desempenho (em graus Celsius)

A seleção do material para constituir as camadas do pavimento deve ser estipulada em função do tráfego da região, já que é através da solicitação contínua que as patologias vão ocorrendo. Para o pavimento perpétuo, assim como os flexíveis, existem combinações de agregado que formam a melhor matriz pétreia para atender a demanda local. A graduação densa são os mais utilizados em misturas de asfalto a quente por sua facilidade de produção e baixo custo quando comparado aos demais, sua característica advém da mistura de diferentes seções de agregados (37,5 mm a 4,75 mm) compondo uma malha rígida de atrito entre os componentes e diminuindo a fissuração superficial. Por apresentar alta variação na seção

CAPÍTULO 4

nominal dos agregados é possível ter diferentes tipos de pavimentos, como pavimentos mais permeáveis quando forem compostos por maior volume de vazios.

O SMA é composto pela mistura de agregados graúdos de mástique, essa composição garante uma estrutura resistente a fissurações. A produção deste pavimento requer atenção para os detalhes de dosagem dos materiais, controle do agregado, proporção de aditivo, esse balanceamento é essencial para o desempenho futuro do material. Outra mistura também muito utilizada em pavimentos perpétuos são as chamadas de Open Graded, ou seja, misturas compostas por graduação aberta.

Ao contrário das misturas citadas acima, essa estrutura possui um único tamanho de agregado formando assim uma malha com muitos vazios e alta permeabilidade, essa característica é usada em locais onde a hidroplanagem e o efeito spray são prejudiciais ao tráfego. Conhecendo então as propriedades de cada mistura pode-se estudar o local aonde será inserido a nova estrutura e determinar as melhores composições de camadas.

A Tabela 4.1 a seguir, demonstra os diferentes tipos de composições e a atuação sob o tráfego imposto:

Tabela 4.1 - Composições de camadas utilizadas para pavimentos perpétuos

Camadas do pavimento	Tipos de mistura	Diâmetro dos agregados mm (pol)	Espessura da camada mm (pol)	Volume do tráfego MESAL		
				< 0,3	0.3 - 10	> 10
Base	Densa, fina	37,5 (1-1/2)	110 - 150 (4,5 - 6)	FR	FR	FR
		25 (1)	75 - 100 (3 - 4)	FR	FR	FR
		19 (3/4)	60 - 75 (2,5 - 3)	FR	FR	FR
	Densa, grossa	37,5 (1 - 1/2)	150 - 190 (6 - 7,5)	FR	FR	FR
		25 (1)	100 - 125 (4 - 5)	FR	FR	FR
		19 (3/4)	75 - 100 (3 - 4)			FR
	ATPB	37,5 (1-1/2)	75 - 100 (3 - 4)			FR
		25 (1)	50 - 100 (2 - 4)			FR
		19 (3/4)	40 - 75 (1,5 - 3)			FR
Intermediária	Densa, fina	25 (1)	75 - 100 (3 - 4)	FR	FR	FR
		19 (3/4)	60 - 75 (2,5 - 3)	FR	FR	FR
	Densa, grossa	25 (1)	100 - 125 (4 - 5)	FR	FR	FR
		19 (3/4)	75 - 100 (3 - 4)	FR	FR	FR
Superficial	Densa, fina	19 (3/4)	60 - 75 (2,5 - 3)	FR	FR	R
		12,5 (1/2)	40 - 60 (1,5 - 2,5)	FR	FR	R
		9,5 (3/8)	25 - 40 (1 - 1,5)	FR	FR	R
		4,75 (1/4)	15 - 20 (0,5 - 0,75)	FR	FR	R
	Densa, grosseira	19 (3/4)	75 - 100 (3 - 4)			FR
		12,5 (1/2)	50 - 60 (2 - 2,5)			FR
		9,5 (3/8)	40 - 50 (1,5 - 2)			FR
	SMA	19 (3/4)	50 - 60 (2 - 2,5)		R	FR
		12,5 (1/2)	40 - 50 (1,5 - 2)		R	FR
		9,5 (3/8)	25 - 40 (1 - 1,5)		R	FR
	OGFC	12,5 (1/2)	25 - 40 (1 - 1,5)			FR
		9,5 (3/8)	20 - 25 (0,75 - 1)			FR

Fonte: Adaptado de NEWCOMB, 2006

Notas:

1. MESAL - Millions of Equivalent Single Axle Loads (Milhões de Cargas de Eixo Único Equivalentes)
2. FR – Fortemente Recomendável e R – Recomendável

4.2 CONSTRUÇÃO DO PAVIMENTO PERPÉTUO

Com a diversidade de tipos de pavimentação existentes, desde misturas a quente, misturas à frio, betão e emulsões, para escolher uma em um projeto, é de suma importância que atenda a todas as necessidades do tráfego e que um estudo prévio sobre a região ao qual será inserido tenha sido elaborado. Já que um mesmo componente pode apresentar características distintas com a variação de clima, sendo assim conhecer o material com que será executado a estrutura e o clima ao qual ela será submetida é significativo para a vida útil do pavimento (GRILLO,2015).

A seguir na Tabela 4.2 apresenta-se um exemplo da variação das características dos materiais que compõem a estrutura do pavimento de acordo com o clima ou melhor definindo, varia de acordo com a temperatura. Os materiais descritos na tabela a seguir foram aplicados em uma rodovia (Rota Estadual 219) fica localizada na cidade de Bradford, no estado da Pensilvânia, Estados Unidos da América, para a construção de um pavimento perpétuo. (ROSENBERGER et. al., 2006 apud GRILLO, 2015).

Tabela 4.2 - Módulo de deformabilidade durante as estações do ano.

Material	Módulo de Deformabilidade (MPa)*			
Material	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Betão betuminoso	4.100	7.550	11.000	6.750
Agregado	135	175	275	70
Material Granular (2A)	100	100	165	50
Material Granular 2A - composto por uma mistura de brita de espessura máxima de 5 centímetros e pó de pedra.				

(Adaptado de GRILLO,2015, p.44)

A comparação entre as estruturas de pavimentos existentes ocorre pela busca de melhoria constante e para suprir as necessidades peculiares de cada local. Newcomb et al.(2010) relata uma seção de pavimento perpétuo encontrada em uma rua na cidade de Eugene, Oregon, onde a estrutura de 10 polegadas (aproximadamente 25,4 cm) de pavimento asfáltico tinha durado 55 anos e ainda estava em condições de uso necessitando apenas de reparo em sua superfície. A economia com a construção de pavimentos perpétuos é visível e muito atraente para as empresas, principalmente em lugares com alto fluxo ou tráfego pesado, em 2002, pesquisadores compararam várias seções de pavimentos de estradas interestaduais na cidade de Kansas, eles puderam concluir que, em média, ao longo de um período de 40 anos as estruturas compostas por asfalto eram mais econômicas do que pavimentos constituídos de concreto (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

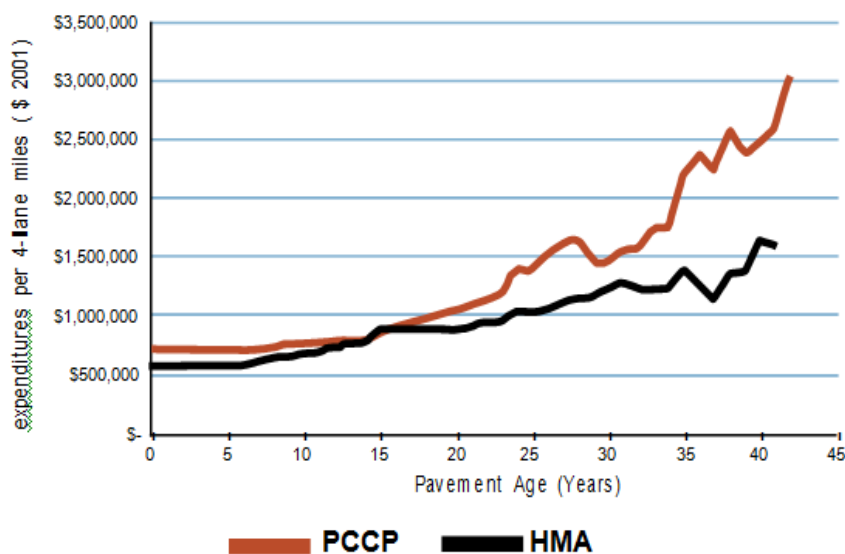


Figura 4.5 - Comparação dos custos médios no Kansas - EUA (2002)

Fonte: NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010,p.34.

PCCP – Pavimento de Betão de cimento Portland

HMA – Hot Mix Asphalt (Mistura de betuminosa à quente)

Os estudos realizados por El-hakim et al.(2009), na cidade de Ontario, comparou o projeto e o desempenho de um trecho em pavimento betuminoso flexível, estruturado em 11 polegadas de asfalto e 13 polegadas de agregado (aproximadamente 27,94 cm e 33,02 cm respectivamente) e outro em pavimento perpétuo, estruturado em 13,5 polegadas de asfalto e 4,5 polegadas de camada intermediária (aproximadamente 34,29 cm e 11,43 cm respectivamente), analisando somente a estrutura final já tem-se uma significativa variação na espessura das camadas, além disso o desempenho do pavimento perpétuo superou o pavimento flexível nos testes e foi 6,6% mais barato no custo de vida ao longo do período de 50 anos. Outros estudiosos, em 2004 na cidade de Washington, após um levantamento descobriram que o pavimento perpétuo em estradas de baixo volume economizou aproximadamente 160 mil dólares por milhas em um período de 50 anos (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

O bom desempenho das estruturas de pavimento está ligada a todas as etapas desde a concepção por meio dos estudos prévios até a manutenção periódica, sendo assim a fase de construção tem papel fundamental para o futuro de um pavimento duradouro e com bom funcionamento. Para atender todas as especificações de projeto para o pavimento perpétuo, um controle cuidadoso tanto dos componentes da mistura como da compactação deve ser acompanhado, assim como ensaios devem ser realizados para

apresentar os dados contínuos sobre a qualidade dos materiais e a construção, o que não difere das exigências solicitadas para pavimentos convencionais (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001). O solo sobre o qual será apoiado o pavimento pode apresentar diversas características geológicas próprias ou causadas por intempéries, como solos expansivos, sendo assim utilizar dados disponíveis sobre o clima da região é de suma importância para a vida útil do pavimento, pois através destes pode-se descobrir o enfraquecimento dos solos em determinadas estações do ano tornando necessárias drenagens ou até uma camada intermediária para assegurar a estabilidade da fundação. Além disso, podem ainda necessitar de reforço com materiais como areia, cascalhos, grãos finos estabilizados, etc., produzindo a resistência suficiente para que as etapas de construção sejam executadas, resultando em uma camada compacta, lisa e com capacidade de suporte adequada (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

O desempenho da estrutura depende não só do projeto estrutural e da seleção dos materiais, mas do conjunto de ambos com as boas práticas da construção, essas são regidas pelo acompanhamento, monitoramento e teste periódicos feitos em todas as etapas para evitar situações prejudiciais como a falta de densidade, a permeabilidade, a falta de coesão entre as camadas e segregação (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

A compactação ineficiente nas camadas pode ocorrer por vários fatores e em diversos estágios, no solo da fundação o excesso de poeira sobre o solo levantada pela circulação do maquinário ou quando o pó paliativo usado para dar estabilidade for molhado antes da compactação; e nas camadas que contém mistura asfáltica a rigidez em exagero dificulta a trabalhabilidade assim como ligantes oxidados por aquecimento excessivo, pode ser ainda intensificado se a mistura conter polímeros (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

Essa situação acaba por influenciar diretamente na densidade das camadas, pois inibe o atrito entre o material a camada de base fazendo com que a mistura quando pressionada pelo rolo compressor tenda a sair pelas laterais de modo a impedir que a força vertical aplicada consolide a mistura. A falta de densidade diminui a resistência à fadiga e com isso reduz a vida útil do pavimento comprometendo a capacidade portante da estrutura (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

A segregação é outra situação que exige máxima atenção para não ocorrer, principalmente se a mistura for composta por agregados grosseiros, já que formam vazios na estrutura deixando-a suscetível a infiltração de água. A segregação da mistura pode acontecer durante a produção, transporte e colocação, o excesso de temperatura, o manuseio e o deslocamento inadequado resulta na separação dos agregados finos e grosseiros (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

Outra situação prejudicial estrutura do pavimento são as juntas longitudinais, são desenvolvidas nas bordas onde a densidade tende a ser menor, com isso gera uma faixa suscetível à infiltração danificando a estrutura e reduzindo a capacidade portante da mesma (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010). Existem

maneiras inibir as juntas usando técnicas como juntas de cunha, aquecedores de juntas e selantes. Newcomb et al. (2010) cita que, “Uma das formas mais práticas de proteger as juntas longitudinais em camadas inferiores do pavimento é usar uma mistura impermeável e fina na superfície do pavimento. Isto tem o efeito de selar a junta além de proporcionar uma superfície lisa e silenciosa.”⁸.

4.3 Monitoramento de Desempenho e Recapeamento

A estrutura de pavimentos perpétuos busca em todas as suas etapas unir funcionalidade com economia, ou seja, o conjunto de projetar contra defeitos estruturais, selecionar materiais de boa qualidade e adequados para a situação, monitorar durante a vida útil, e apresentar baixa manutenção e custo de reabilitação, faz com que esse tipo de pavimentação seja almejado e visado pelos profissionais (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

O monitoramento, assim como todas as etapas já descritas, é essencial para garantir o desempenho esperado e a longa vida do pavimento, este deve ser efetuado periodicamente e tem como função encontrar e identificar as patologias que vão, com o tempo, se desenvolvendo na estrutura. Esta abordagem é importante, pois quando detectado no início a reabilitação do pavimento é efetuada com mais rapidez e menos custos, já que estarão concentradas nos poucos centímetros superiores (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

É importante determinar alguns parâmetros para atender o pavimento de modo que as patologias não progridam na estrutura deixando-a comprometida, para realizar as avaliações são sugeridos por autores o uso de núcleos ou radar de penetração no solo, verificando a espessura e também a suscetibilidade à umidade, além de testes de deflexão. Uma vez identificado o problema pode-se encaminhar o adequado procedimento de reabilitação que pode ser desde recompor a camada de desgaste até adicionar uma ligeira espessura (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

Para o recapeamento bem-sucedido algumas exigências devem ser atendidas, é de suma importância que exista aderência entre a nova camada e a já existente, esta será garantida através de um revestimento; a nova camada deve possuir as mesmas características da superfície que ali atuava, pode ser desenvolvida mantendo a dosagem dos materiais iguais aos da camada original ou pode ser usado, se existirem, materiais novos desde que seja garantido à estrutura o desempenho necessário. A espessura de recapeamento pode variar entre 2,5 a 10 cm de profundidade, o material retirado será substituído e em

⁸[...] ways to improve longitudinal joint performance by using techniques such as wedge joints, joint theaters, and joint sealants. One of the most practice always of protecting longitudinal joints in lower pavement layers is to use a fine - graded, impermeable mixture on the pavement surface. (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010, p.31)

casos de umidade excessiva, é colocada uma fina camada adicional (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

Após o término da reconstrução e abertura da via para o tráfego, o monitoramento é retomado e deve seguir até findar a vida útil da via. Newcomb et al. (2010, p., tradução nossa, grifo nosso) exhibe um programa criado para premiar vias que utilizaram os procedimentos de pavimentos perpétuos e dentre os critérios está o recapeamento e conseqüentemente o monitoramento,

A aliança do pavimento do asfalto (APA) começou um programa em 2001 para reconhecer os pavimentos perpétuos que estiveram no serviço por 35 anos ou mais. Como parte dos critérios para este prêmio, **não mais do que quatro polegadas de espessura adicional poderiam ter sido adquiridas**, e as sobreposições devem ser construídas com um mínimo de 13 anos de intervalo.⁹

O prêmio da APA para o programa de reconhecimento de pavimentos perpétuos, até 2010, já contemplou mais de 69 seções de pavimento nos EUA, dentre estes pavimentos incluem estradas interestaduais, grandes campos de aviação civis e militares e estradas de baixo e médio volume, a Figura 4.6 a seguir indica a distribuição dos prêmios oferecidos (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

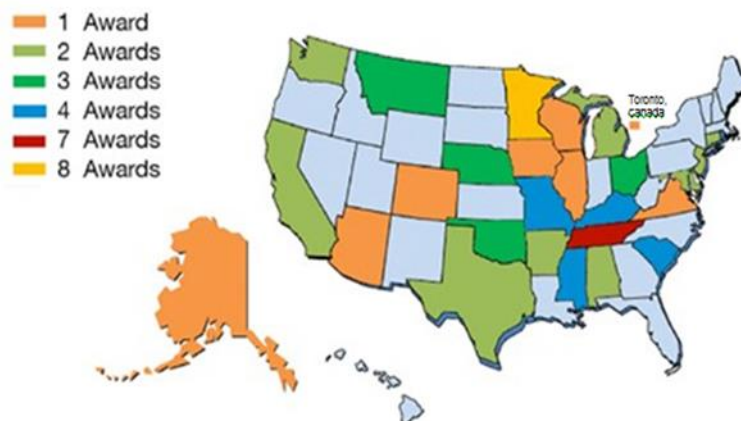


Figura 4.6– Distribuição de prêmios para pavimento perpétuos

Fonte: NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010,p.32.

⁹The Asphalt pavement Alliance began a program in 2001 to recognize perpetual Pavements that have been in service for 35 years or longer. As a part of the criteria for this award, no more than four inches of additional thickness could have been gained, and overlays had to have been constructed a minimum of 13 years apart. (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010, p.32)

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 ENQUADRAMENTO DO ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será apresentado o trecho utilizado como objeto de estudo para o dimensionamento do Pavimento Perpétuo, bem como o projeto hipotético de pavimento semi-rígido, para que se possa conduzir a comparação entre as estruturas de cada pavimento. Por motivos de privacidade e exigência do cliente e projetista, não serão expostas informações diretas sobre o projeto do pavimento semi-rígido.

O pavimento semi-rígido apresentado nesta pesquisa foi originalmente projetado pela empresa VETEC Engenharia em novembro de 2015, para o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP, cujo objetivo foi a elaboração do projeto executivo de duplicação do trecho estudado, bem como o plano de gerenciamento e manutenção desse pavimento. O dimensionamento do pavimento seguiu conforme a instrução de projeto IP-DE-P00/001: Projeto de Pavimentação (DER/SP, 2006), com o auxílio do software ELSYM5 (Elastic Layered System), para as análises de tensões e deformações calculadas e admissíveis. O plano de gerenciamento e manutenção para o pavimento foi elaborado pela Dr^a Andrea Severi, com o auxílio do software HDM 4 – Highway Development and Management System, que determinou quais os tipos de manutenções necessárias e qual a periodicidade destas manutenções, para estender a vida útil do projeto do pavimento semi-rígido.

Para o pavimento perpétuo, foi utilizado o método da Shell para o dimensionamento, juntamente com os parâmetros estudados na bibliografia para garantir o dimensionamento de um pavimento perpétuo. A escolha do método Shell para o dimensionamento está baseado no fato de que os métodos do DER e DNIT não possuem parâmetros que considerem a contribuição estrutural das camadas de módulo elevado da estrutura, o que nos leva ao uso de um método que considere essa contribuição.

O plano de gerenciamento e manutenção seguiu as orientações e bibliografia preconizadas pela APA para o reconhecimento de um projeto de pavimentação como uma estrutura de pavimento perpétuo. (NEWCOMB et. al. 2010).

Com a determinação de ambos os dimensionamentos, será realizada uma comparação entre as estruturas resultantes dos dimensionamentos. Além da comparação estrutural, será composto os custos financeiros para implantação e manutenção de ambos os pavimentos.

5.2 APRESENTAÇÃO DOS DADOS PARA ESTUDO.

Para concepção de todo o estudo de comparação das estruturas finais de ambos os métodos, foram utilizados os dados do projeto fornecido pela VETEC Engenharia. Por uma solicitação do Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP, não serão apresentadas informações que ilustrem a localização do projeto.

Os documentos utilizados para o estudo estão relacionados na Quadro 5.1 a seguir:

Quadro 5.1 - Lista de documentos fornecidos para estudo

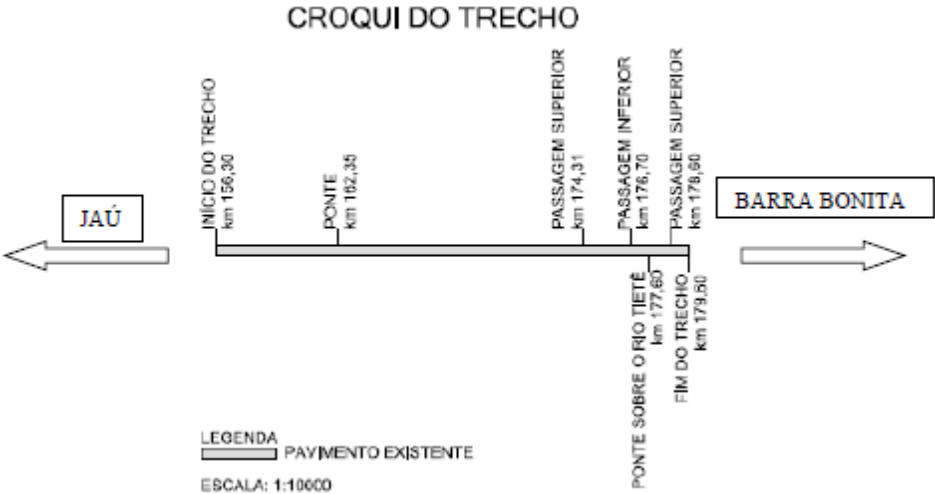
Código do documento	Descrição
DE-SP0000255-156.180-000-P02-001 a 018_A.dwg	Projeto executivo de pavimentação - plantas de distribuição de pavimentos
DE-SP0000255-156.180-000-P05-001 a 002_A.dwg	Projeto executivo de pavimentação – Seção Tipo pista duplicada
DE-SP0000255-156.180-000-P07-001 a 002_A.dwg	Projeto executivo de pavimentação - seção transversal tipo
DE-SP0000255-156.180-000-P09-001 A 002_A.dwg	Projeto executivo de pavimentação – Diagrama linear da pavimentação - DLP
MC-SP0000255-156.180-000-P09-002_A.pdf	Memória de cálculo do dimensionamento do pavimento
MC-SP0000255-156.180-000-P09-003_A.pdf	Estudo técnico e econômico de alternativas

Fonte: VETEC Engenharia 2015

A Figura 5.1 – Traçado do projeto em estudo – Cidades de Jáu e Barra Bonita. Figura 5.1a seguir ilustra o traçado e um croqui do projeto, uma vez que não foram autorizadas a exibição da localização do projeto, a imagem ilustrativa do traçado e contextualiza a dimensão do projeto, a figura foi retirada da ferramenta Google Earth, e os dados de identificação do trecho foram ocultados.



a) Ilustração do traçado. (Google Earth,2017)



b) Croqui do trecho em estudo. (Vetec, 2015)

Figura 5.1 – Traçado do projeto em estudo – Cidades de Jáu e Barra Bonita.

A Figura 5.2 e a Figura 5.3 a seguir ilustram um corte transversal tipo, bem como a estrutura final do dimensionamento do pavimento existente.

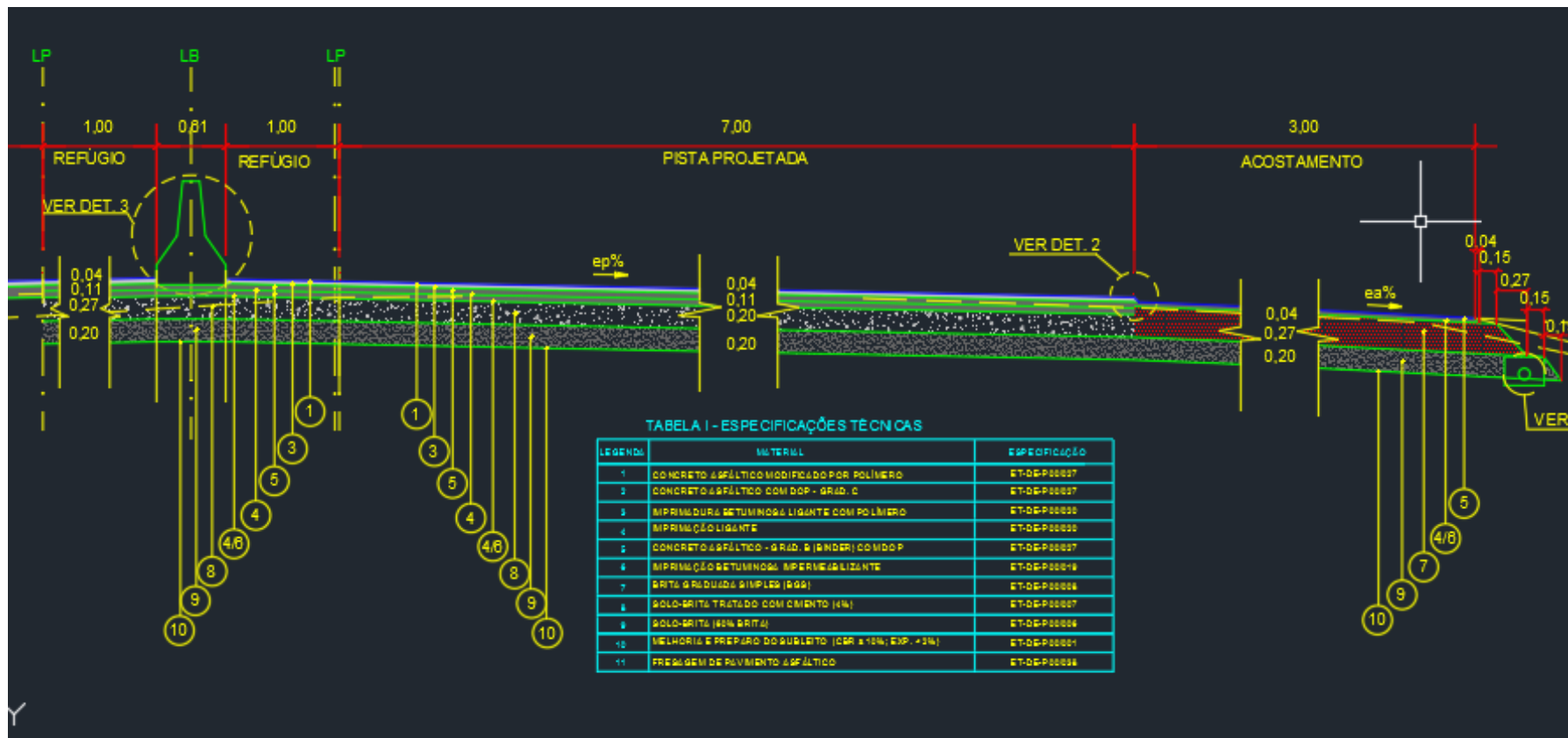


Figura 5.2 – Corte transversal tipo – Estrutura pavimento semi-rígido.

Fonte: VETEC, 2015.

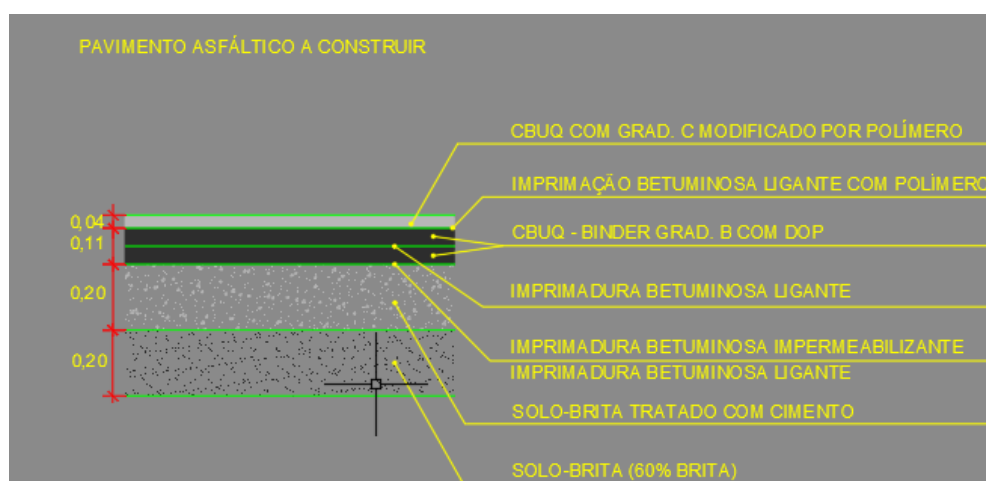


Figura 5.3 – Estrutura final pavimento existente

Fonte: VETEC, 2015

As composições dos materiais utilizados para a composição da estrutura demonstrada na Figura 5.3, estão descritas nos manuais técnicos do DER-SP, que são apresentadas na Tabela 5.1 a seguir. Nos capítulos seguintes teremos a apresentação dos dados que foram utilizados para o dimensionamento do pavimento perpétuo, bem como a exibição dos resultados do projeto do pavimento existente.

Tabela 5.1 - Especificações Técnicas DER/SP

Designação	Especificação DER/SP
Melhoria e Preparo do Subleito (CBR \geq 10%; Exp. < 2% - E.N.)	ET-DE-P00/001
Brita Graduada Simples (BGS)	ET-DE-P00/008
Solo-brita (60% brita)	ET-DE-P00/006
Solo-brita tratado com cimento	ET-DE-P00/007
Imprimação Betuminosa Impermeabilizante	ET-DE-P00/019
Imprimação Betuminosa Ligante	ET-DE-P00/020
Concreto Asfáltico Us. Quente – Binder - Grad. B C/Dop	ET-DE-P00/027
Concreto Asfáltico com Polímero	ET-DE-P00/027

Fonte: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas>

5.3 LOCALIZAÇÃO, CLIMA E TRÁFEGO ATUANTES NA REGIÃO.

O trecho em estudo fica localizado na região central do Estado de São Paulo entre as cidades de Jaú e Barra-bonita. A Figura 5.4 a seguir apresenta o mapa com a localização da região do estudo de caso. O seguimento possui duas vias e um acostamento, e o objetivo do projeto original foi a duplicação do segmento.

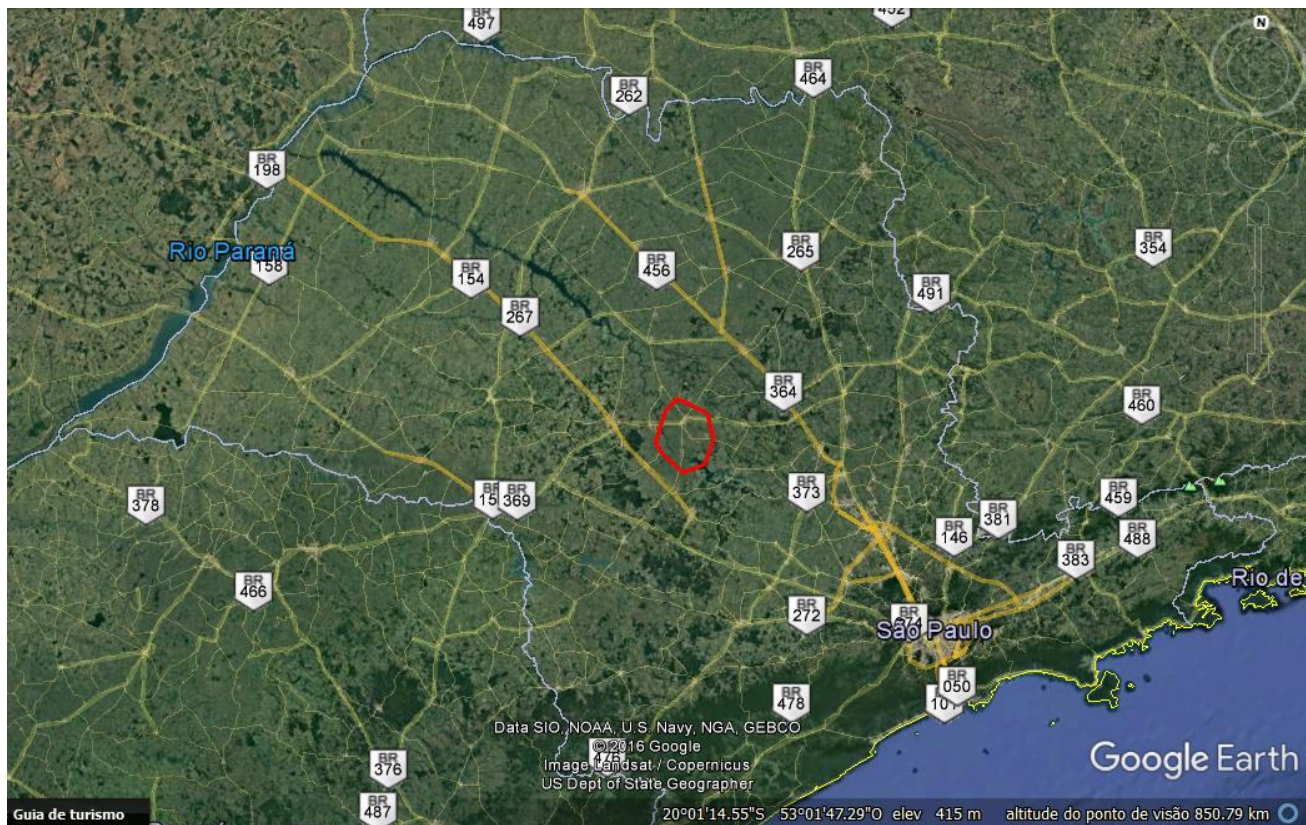


Figura 5.4 - Mapa do Estado de São Paulo.

Fonte:(Google Earth, 2017)

O trecho em estudo fica localizado próximo à estação meteorológica de São Carlos, que teve o início de suas operações em 24 de setembro de 1939. O período analisado para a determinação das temperaturas do ar nessa região, foi de janeiro de 1997 a janeiro de 2017, totalizando 20 anos de análise de dados para a determinação das temperaturas. Os resultados são apresentados pela Tabela 5.2 e Gráfico 5.1 a seguir:

Tabela 5.2 - Análise dos dados de temperatura do ar na região de estudo.

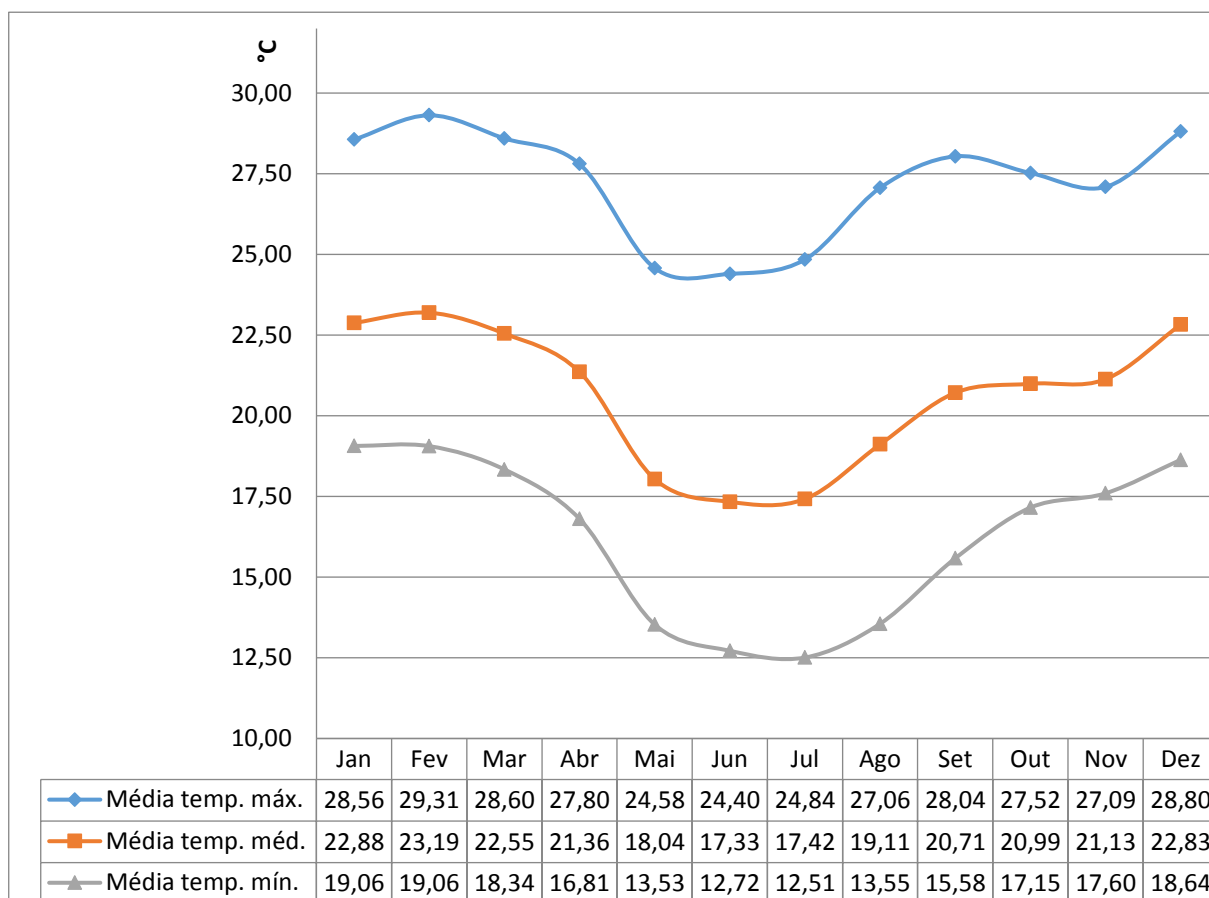
Mês	Média temp. máx. (°C)	Média temp. méd. (°C)	Média temp. mín. (°C)
Janeiro	28,56	22,88	19,06
Fevereiro	29,31	23,19	19,06
Março	28,60	22,55	18,34
Abril	27,80	21,36	16,81
Mai	24,58	18,04	13,53
Junho	24,40	17,33	12,72
Julho	24,84	17,42	12,51
Agosto	27,06	19,11	13,55
Setembro	28,04	20,71	15,58
Outubro	27,52	20,99	17,15
Novembro	27,09	21,13	17,60
Dezembro	28,80	22,83	18,64

(Fonte: Adaptado de INMET, 2017)

De acordo com a classificação climática proposta por KÖPPEN (1931) o clima da região dos municípios de Jaú e Barra-bonita são do tipo Cwa. A classificação Cwa corresponde ao clima temperado chuvoso (mesotérmico) com inverno seco e verão chuvoso; e subtropical, com inverno seco e temperatura do mês mais quente superior a 24°C.

A temperatura média anual do ar correspondeu a 20,9°C, variando entre um mínimo de 12,51°C, em julho (inverno) e um máximo de 29,31°C, em fevereiro (verão). O Gráfico 5.1 a seguir ilustra as informações apresentadas.

Gráfico 5.1- Temperatura do Ar (Média dos últimos 20 anos)



Para a determinação do número N, número de operações do eixo simples padrão de 8,2 tf, se processou com base nos VDMs (Volume diário médio) resultantes e a partir dos Fatores de Carga e Tipos de Eixo, e posteriormente pelos Fatores de Veículos.

Para a determinação do VDM – Volume Diário Médio, que representa uma média de tráfego durante o ano, foi realizada a expansão dos volumes obtidos em campo aplicando-se os fatores de expansão semanal e mensal. Estes fatores provêm dos estudos de estatística de trânsito realizados pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP para o ano de 2012.

Em função do posto de pesquisa, que se localiza no segmento do estudo de caso, se identificou que os fatores de expansão semanal ($F_{semanal}$) se referem à curva de nº 3 para veículos de passeio e de nº 3 para veículos comerciais, entre as curvas de fatores de flutuação semanal. Sendo assim os fatores aplicados para veículos de passeio e comerciais foram respectivamente 44,7% e 51,9%.

O cálculo do Fator de Veículo (FV) dos vários tipos de veículos comerciais foi definido pelos Fatores de Equivalência de Operações (FEO) do eixo simples padrão de 8,2tf. Considerou-se para os veículos

carregados, os valores de cargas máximas para cada tipo de eixo, conforme regulamenta o Código de Trânsito Brasileiro e para os veículos vazios, o valor médio correspondente ao peso de “tara” do veículo transmitido ao eixo. A Tabela 5.3 - Cargas por Tipo de Eixo – Norma do CONTRAN (conselho...) Tabela 5.3 abaixo apresenta as cargas utilizadas por tipo de eixo.

Tabela 5.3 - Cargas por Tipo de Eixo – Norma do CONTRAN (conselho...)

Tipo de Eixo	Carga (tf)	
	Carregado	Vazio
Simple de roda simples	6	3
Simple de roda dupla	10	5
Tandem Duplo	17	6
Tandem Triplo	25,5	9

Fonte: Adaptado de <http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/qfv%20pdf.pdf>

Entre os parâmetros considerados no cálculo estão:

- 70% dos veículos comerciais trafegarão com carga máxima legal;
- 10% dos veículos comerciais trafegarão com excesso de carga;
- 20% trafegarão vazios (sem carga);
- Taxa de Crescimento Anual do tráfego de 3%;
- 14% de excesso de carga por eixo.

As tabelas a seguir apresentam o cálculo do fator de veículo da frota para os dois sentidos do estudo de caso:

Tabela 5.4 - Cálculo do Fator de Veículo da Frota (Sentido Crescente)

Sentido Crescente									
Tipo de Veículo	Fatores de Veículos						%	FV (AASHTO)	FV (USACE)
	AASHTO			USACE					
	Carregado	Excesso de Carga	Vazio	Carregado	Excesso de Carga	Vazio			
Ônibus 2C	2,72	6,55	0,14	3,57	12,36	0,15	2,36	0,25	0,37
Ônibus 3C	0,96	2,26	0,03	2,69	7,99	0,06	0,23	0,01	0,03
Caminhão – 2C	2,72	6,55	0,14	3,57	12,36	0,15	4,27	0,46	0,67
Caminhão – 3C	1,97	4,60	0,04	8,83	26,70	0,10	8,15	0,62	2,99
Carreta – 2S2	4,36	10,36	0,16	12,12	38,44	0,23	0,44	0,08	0,23
Carreta – 2I2	7,51	18,08	0,38	10,15	35,83	0,42	0,06	0,02	0,03
Carreta – 2S3	4,28	10,23	0,16	12,87	41,28	0,16	0,97	0,16	0,53
Carreta – 3S2	3,61	8,41	0,06	17,38	52,78	0,18	0,29	0,04	0,21
Carreta – 3I2	6,76	16,13	0,28	15,41	50,17	0,36	0,12	0,03	0,08
Carreta – 3S3	3,53	8,28	0,06	18,13	55,62	0,11	2,36	0,32	1,78
Carreta – 3I3	9,15	21,89	0,40	18,70	61,91	0,50	0,56	0,20	0,45
Carreta – 3C3	6,01	14,17	0,18	20,66	64,51	0,31	0,04	0,01	0,03
Romeu e Julieta – 3D4	5,25	12,22	0,08	25,92	78,85	0,26	1,62	0,33	1,75
Treminhão – 3Q4	11,55	27,65	0,52	21,98	73,64	0,63	0,06	0,03	0,05
Rodotrem – 3T6	6,9	16,03	0,10	34,47	104,93	0,34	2,55	0,68	3,66
Caminhão – 3M6	5,09	11,96	0,08	27,43	84,54	0,12	0,08	0,02	0,09
TOTAL							100	3,26	12,95

Fonte: VETEC Engenharia 2015

Tabela 5.5 - Cálculo do Fator de Veículo da Frota (Sentido Decrescente)

Sentido Decrescente									
Tipo de Veículo	Fatores de Veículos						%	FV (AASHTO)	FV (USACE)
	AASHTO			USACE					
	Carregado	Excesso de Carga	Vazio	Carregado	Excesso de Carga	Vazio			
Ônibus 2C	2,72	6,55	0,14	3,57	12,36	0,15	3,71	0,42	1,12
Ônibus 3C	0,96	2,26	0,03	2,69	7,99	0,06	0,13	0,01	2,10
Caminhão – 2C	2,72	6,55	0,14	3,57	12,36	0,15	6,74	0,77	0,19
Caminhão – 3C	1,97	4,60	0,04	8,83	26,70	0,10	5,37	0,44	0,02
Carreta – 2S2	4,36	10,36	0,16	12,12	38,44	0,23	0,35	0,06	0,53
Carreta – 2I2	7,51	18,08	0,38	10,15	35,83	0,42	0,05	0,02	0,21
Carreta – 2S3	4,28	10,23	0,16	12,87	41,28	0,16	0,92	0,16	0,08
Carreta – 3S2	3,61	8,41	0,06	17,38	52,78	0,18	0,27	0,04	1,34
Carreta – 3I2	6,76	16,13	0,28	15,41	50,17	0,36	0,12	0,03	0,33
Carreta – 3S3	3,53	8,28	0,06	18,13	55,62	0,11	1,66	0,24	0,03
Carreta – 3I3	9,15	21,89	0,40	18,70	61,91	0,50	0,38	0,15	1,90
Carreta – 3C3	6,01	14,17	0,18	20,66	64,51	0,31	0,03	0,01	0,05
Romeu e Julieta – 3D4	5,25	12,22	0,08	25,92	78,85	0,26	1,65	0,36	1,81
Treminhão – 3Q4	11,55	27,65	0,52	21,98	73,64	0,63	0,05	0,02	0,04
Rodotrem – 3T6	6,9	16,03	0,10	34,47	104,93	0,34	1,18	0,34	0,62
Caminhão – 3M6	5,09	11,96	0,08	27,43	84,54	0,12	0,03	0,01	0,02
TOTAL							100	3,08	10,39

Fonte: VETEC Engenharia 2015

5.4 CALCULO DO NÚMERO N

A partir da obtenção dos fatores de veículos foram adotadas duas metodologias para o cálculo do número N sendo:

- a) O dimensionamento do DNER, com base no Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), em que os fatores de equivalência de carga foram desenvolvidos considerando a deformação máxima de compressão admissível no subleito como o fator de comparação para efeito destrutivo dos eixos reais em relação ao padrão;
- b) O dimensionamento da AASHTO, onde os fatores de equivalência de carga são baseados na redução da serventia do pavimento, que é um conceito associado ao conforto ao rolamento e defeitos superficiais, medido pelo índice de serventia PSI.

Estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 a seguir a projeção de tráfego de veículos comerciais e o cálculo do número N ao longo do período de projeto de 40 anos, respectivamente para o sentido crescente e decrescente do estudo de caso.

Tabela 5.6 - Cálculo Numero N

Pista Crescente																							
Ano	VDM																VDM Comercial	FV		N		N acumulado	
	Ônibus		am. médios e pesad		Caminhões c/semi-reboque (carretas) e reboque								Treminhão					AASHTO	USACE	AASHTO	USACE	AASHTO	USACE
	2C	3CB	2C	3C	2S2	2I2	2S3	3S2	3I2	3S3	3I3	3C3	3D4	3Q4	3T6	3M6							
	122	12	221	422	23	3	50	15	6	122	29	2	84	3	132	4	1.250	3,26	12,95				
1	126	12	228	435	24	3	52	15	6	126	30	2	87	3	136	4	1.289	3,26	12,95	1,53E+06	6,09E+06	1,53E+06	6,09E+06
2	130	12	235	448	25	3	54	15	6	130	31	2	90	3	140	4	1.328	3,26	12,95	1,58E+06	6,28E+06	3,11E+06	1,24E+07
3	134	12	242	461	26	3	56	15	6	134	32	2	93	3	144	4	1.367	3,26	12,95	1,63E+06	6,46E+06	4,74E+06	1,88E+07
4	138	12	249	475	27	3	58	15	6	138	33	2	96	3	148	4	1.407	3,26	12,95	1,67E+06	6,65E+06	6,41E+06	2,55E+07
5	142	12	256	489	28	3	60	15	6	142	34	2	99	3	152	4	1.447	3,26	12,95	1,72E+06	6,84E+06	8,14E+06	3,23E+07
6	146	12	264	504	29	3	62	15	6	146	35	2	102	3	157	4	1.490	3,26	12,95	1,77E+06	7,04E+06	9,91E+06	3,94E+07
7	150	12	272	519	30	3	64	15	6	150	36	2	105	3	162	4	1.533	3,26	12,95	1,82E+06	7,25E+06	1,17E+07	4,66E+07
8	155	12	280	535	31	3	66	15	6	155	37	2	108	3	167	4	1.579	3,26	12,95	1,88E+06	7,46E+06	1,36E+07	5,41E+07
9	160	12	288	551	32	3	68	15	6	160	38	2	111	3	172	4	1.625	3,26	12,95	1,93E+06	7,68E+06	1,55E+07	6,18E+07
10	165	12	297	568	33	3	70	15	6	165	39	2	114	3	177	4	1.673	3,26	12,95	1,99E+06	7,91E+06	1,75E+07	6,97E+07
11	170	12	306	585	34	3	72	15	6	170	40	2	117	3	182	4	1.721	3,26	12,95	2,05E+06	8,13E+06	1,96E+07	7,78E+07
12	175	12	315	603	35	3	74	15	6	175	41	2	121	3	187	4	1.771	3,26	12,95	2,11E+06	8,37E+06	2,17E+07	8,62E+07
13	180	12	324	621	36	3	76	15	6	180	42	2	125	3	193	4	1.822	3,26	12,95	2,17E+06	8,61E+06	2,39E+07	9,48E+07
14	185	12	334	640	37	3	78	15	6	185	43	2	129	3	199	4	1.875	3,26	12,95	2,23E+06	8,86E+06	2,61E+07	1,04E+08
15	191	12	344	659	38	3	80	15	6	191	44	2	133	3	205	4	1.930	3,26	12,95	2,30E+06	9,12E+06	2,84E+07	1,13E+08
16	197	12	354	679	39	3	82	15	6	197	45	2	137	3	211	4	1.986	3,26	12,95	2,36E+06	9,39E+06	3,08E+07	1,22E+08
17	203	12	365	699	40	3	84	15	6	203	46	2	141	3	217	4	2.043	3,26	12,95	2,43E+06	9,66E+06	3,32E+07	1,32E+08
18	209	12	376	720	41	3	87	15	6	209	47	2	145	3	224	4	2.103	3,26	12,95	2,50E+06	9,94E+06	3,57E+07	1,42E+08
19	215	12	387	742	42	3	90	15	6	215	48	2	149	3	231	4	2.164	3,26	12,95	2,57E+06	1,02E+07	3,83E+07	1,52E+08
20	221	12	399	764	43	3	93	15	6	221	49	2	153	3	238	4	2.226	3,26	12,95	2,65E+06	1,05E+07	4,09E+07	1,63E+08
21	228	12	411	787	44	3	96	15	6	228	50	2	158	3	245	4	2.292	3,26	12,95	2,73E+06	1,08E+07	4,36E+07	1,73E+08
22	235	12	423	811	45	3	99	15	6	235	52	2	163	3	252	4	2.360	3,26	12,95	2,81E+06	1,12E+07	4,64E+07	1,84E+08
23	242	12	436	835	46	3	102	15	6	242	54	2	168	3	260	4	2.430	3,26	12,95	2,89E+06	1,15E+07	4,93E+07	1,96E+08
24	249	12	449	860	47	3	105	15	6	249	56	2	173	3	268	4	2.501	3,26	12,95	2,98E+06	1,18E+07	5,23E+07	2,08E+08
25	256	12	462	886	48	3	108	15	6	256	58	2	178	3	276	4	2.573	3,26	12,95	3,06E+06	1,22E+07	5,54E+07	2,20E+08
26	264	12	476	913	49	3	111	15	6	264	60	2	183	3	284	4	2.649	3,26	12,95	3,15E+06	1,25E+07	5,85E+07	2,32E+08
27	272	12	490	940	50	3	114	15	6	272	62	2	188	3	293	4	2.726	3,26	12,95	3,24E+06	1,29E+07	6,18E+07	2,45E+08
28	280	12	505	968	52	3	117	15	6	280	64	2	194	3	302	4	2.807	3,26	12,95	3,34E+06	1,33E+07	6,51E+07	2,59E+08
29	288	12	520	997	54	3	121	15	6	288	66	2	200	3	311	4	2.890	3,26	12,95	3,44E+06	1,37E+07	6,85E+07	2,72E+08
30	297	12	536	1.027	56	3	125	15	6	297	68	2	206	3	320	4	2.977	3,26	12,95	3,54E+06	1,41E+07	7,21E+07	2,86E+08
31	306	12	552	1.058	58	3	129	15	6	306	70	2	212	3	330	4	3.066	3,26	12,95	3,65E+06	1,45E+07	7,57E+07	3,01E+08
32	315	12	569	1.090	60	3	133	15	6	315	72	2	218	3	340	4	3.157	3,26	12,95	3,76E+06	1,49E+07	7,95E+07	3,16E+08
33	324	12	586	1.123	62	3	137	15	6	324	74	2	225	3	350	4	3.250	3,26	12,95	3,87E+06	1,54E+07	8,34E+07	3,31E+08
34	334	12	604	1.157	64	3	141	15	6	334	76	2	232	3	361	4	3.348	3,26	12,95	3,98E+06	1,58E+07	8,73E+07	3,47E+08
35	344	12	622	1.192	66	3	145	15	6	344	78	2	239	3	372	4	3.447	3,26	12,95	4,10E+06	1,63E+07	9,14E+07	3,63E+08
36	354	12	641	1.228	68	3	149	15	6	354	80	2	246	3	383	4	3.548	3,26	12,95	4,22E+06	1,68E+07	9,57E+07	3,80E+08
37	365	12	660	1.265	70	3	153	15	6	365	82	2	253	3	394	4	3.652	3,26	12,95	4,35E+06	1,73E+07	1,00E+08	3,97E+08
38	376	12	680	1.303	72	3	158	15	6	376	84	2	261	3	406	4	3.761	3,26	12,95	4,48E+06	1,78E+07	1,04E+08	4,15E+08
39	387	12	700	1.342	74	3	163	15	6	387	87	2	269	3	418	4	3.872	3,26	12,95	4,61E+06	1,83E+07	1,09E+08	4,33E+08
40	399	12	721	1.382	76	3	168	15	6	399	90	2	277	3	431	4	3.988	3,26	12,95	4,75E+06	1,89E+07	1,14E+08	4,52E+08

FATOR DIRECIONAL = 1
 FATOR CLIMÁTICO REGIONAL = 1
 TAXA DE CRESCIMENTO = 3% a. a.

Fonte: Vetec Engenharia, 2015.

Tabela 5.7 - Calculo Número N

Segmento Decrescente																							
Ano	VDM																VDM Comercial	FV		N		N acumulado	
	Ônibus		am. médios e pesados		Caminhões c/semi-reboque (carretas) e reboque								Treminhão					AASHTO	USACE	AASHTO	USACE	AASHTO	USACE
	2C	3CB	2C	3C	2S2	2I2	2S3	3S2	3I2	3S3	3I3	3C3	3D4	3Q4	3T6	3M6							
	223	8	405	323	21	3	55	16	7	100	23	2	99	3	71	2	1.361	3,08	10,39				
1	230	8	417	333	22	3	57	16	7	103	24	2	102	3	73	2	1.402	3,08	10,39	1,58E+06	5,32E+06	1,58E+06	5,32E+06
2	237	8	430	343	23	3	59	16	7	106	25	2	105	3	75	2	1.444	3,08	10,39	1,62E+06	5,48E+06	3,20E+06	1,08E+07
3	244	8	443	353	24	3	61	16	7	109	26	2	108	3	77	2	1.486	3,08	10,39	1,67E+06	5,64E+06	4,87E+06	1,64E+07
4	251	8	456	364	25	3	63	16	7	112	27	2	111	3	79	2	1.529	3,08	10,39	1,72E+06	5,80E+06	6,59E+06	2,22E+07
5	259	8	470	375	26	3	65	16	7	115	28	2	114	3	81	2	1.574	3,08	10,39	1,77E+06	5,97E+06	8,36E+06	2,82E+07
6	267	8	484	386	27	3	67	16	7	118	29	2	117	3	83	2	1.619	3,08	10,39	1,82E+06	6,14E+06	1,02E+07	3,43E+07
7	275	8	499	398	28	3	69	16	7	122	30	2	121	3	85	2	1.668	3,08	10,39	1,88E+06	6,33E+06	1,21E+07	4,07E+07
8	283	8	514	410	29	3	71	16	7	126	31	2	125	3	88	2	1.718	3,08	10,39	1,93E+06	6,52E+06	1,40E+07	4,72E+07
9	291	8	529	422	30	3	73	16	7	130	32	2	129	3	91	2	1.768	3,08	10,39	1,99E+06	6,70E+06	1,60E+07	5,39E+07
10	300	8	545	435	31	3	75	16	7	134	33	2	133	3	94	2	1.821	3,08	10,39	2,05E+06	6,91E+06	1,80E+07	6,08E+07
11	309	8	561	448	32	3	77	16	7	138	34	2	137	3	97	2	1.874	3,08	10,39	2,11E+06	7,11E+06	2,01E+07	6,79E+07
12	318	8	578	461	33	3	79	16	7	142	35	2	141	3	100	2	1.928	3,08	10,39	2,17E+06	7,31E+06	2,23E+07	7,52E+07
13	328	8	595	475	34	3	81	16	7	146	36	2	145	3	103	2	1.984	3,08	10,39	2,23E+06	7,52E+06	2,45E+07	8,27E+07
14	338	8	613	489	35	3	83	16	7	150	37	2	149	3	106	2	2.041	3,08	10,39	2,29E+06	7,74E+06	2,68E+07	9,05E+07
15	348	8	631	504	36	3	85	16	7	155	38	2	153	3	109	2	2.100	3,08	10,39	2,36E+06	7,96E+06	2,92E+07	9,84E+07
16	358	8	650	519	37	3	88	16	7	160	39	2	158	3	112	2	2.162	3,08	10,39	2,43E+06	8,20E+06	3,16E+07	1,07E+08
17	369	8	670	535	38	3	91	16	7	165	40	2	163	3	115	2	2.227	3,08	10,39	2,50E+06	8,45E+06	3,41E+07	1,15E+08
18	380	8	690	551	39	3	94	16	7	170	41	2	168	3	118	2	2.292	3,08	10,39	2,58E+06	8,69E+06	3,67E+07	1,24E+08
19	391	8	711	568	40	3	97	16	7	175	42	2	173	3	122	2	2.360	3,08	10,39	2,65E+06	8,95E+06	3,93E+07	1,33E+08
20	403	8	732	585	41	3	100	16	7	180	43	2	178	3	126	2	2.429	3,08	10,39	2,73E+06	9,21E+06	4,21E+07	1,42E+08
21	415	8	754	603	42	3	103	16	7	185	44	2	183	3	130	2	2.500	3,08	10,39	2,81E+06	9,48E+06	4,49E+07	1,51E+08
22	427	8	777	621	43	3	106	16	7	191	45	2	188	3	134	2	2.573	3,08	10,39	2,89E+06	9,76E+06	4,78E+07	1,61E+08
23	440	8	800	640	44	3	109	16	7	197	46	2	194	3	138	2	2.649	3,08	10,39	2,98E+06	1,00E+07	5,08E+07	1,71E+08
24	453	8	824	659	45	3	112	16	7	203	47	2	200	3	142	2	2.726	3,08	10,39	3,06E+06	1,03E+07	5,38E+07	1,82E+08
25	467	8	849	679	46	3	115	16	7	209	48	2	206	3	146	2	2.806	3,08	10,39	3,15E+06	1,06E+07	5,70E+07	1,92E+08
26	481	8	874	699	47	3	118	16	7	215	49	2	212	3	150	2	2.886	3,08	10,39	3,24E+06	1,09E+07	6,02E+07	2,03E+08
27	495	8	900	720	48	3	122	16	7	221	50	2	218	3	155	2	2.970	3,08	10,39	3,34E+06	1,13E+07	6,36E+07	2,14E+08
28	510	8	927	742	49	3	126	16	7	228	52	2	225	3	160	2	3.060	3,08	10,39	3,44E+06	1,16E+07	6,70E+07	2,26E+08
29	525	8	955	764	50	3	130	16	7	235	54	2	232	3	165	2	3.151	3,08	10,39	3,54E+06	1,19E+07	7,05E+07	2,38E+08
30	541	8	984	787	52	3	134	16	7	242	56	2	239	3	170	2	3.246	3,08	10,39	3,65E+06	1,23E+07	7,42E+07	2,50E+08
31	557	8	1.014	811	54	3	138	16	7	249	58	2	246	3	175	2	3.343	3,08	10,39	3,76E+06	1,27E+07	7,79E+07	2,63E+08
32	574	8	1.044	835	56	3	142	16	7	256	60	2	253	3	180	2	3.441	3,08	10,39	3,87E+06	1,30E+07	8,18E+07	2,76E+08
33	591	8	1.075	860	58	3	146	16	7	264	62	2	261	3	185	2	3.543	3,08	10,39	3,98E+06	1,34E+07	8,58E+07	2,89E+08
34	609	8	1.107	886	60	3	150	16	7	272	64	2	269	3	191	2	3.649	3,08	10,39	4,10E+06	1,38E+07	8,99E+07	3,03E+08
35	627	8	1.140	913	62	3	155	16	7	280	66	2	277	3	197	2	3.758	3,08	10,39	4,22E+06	1,43E+07	9,41E+07	3,18E+08
36	646	8	1.174	940	64	3	160	16	7	288	68	2	285	3	203	2	3.869	3,08	10,39	4,35E+06	1,47E+07	9,85E+07	3,32E+08
37	665	8	1.209	968	66	3	165	16	7	297	70	2	294	3	209	2	3.984	3,08	10,39	4,48E+06	1,51E+07	1,03E+08	3,47E+08
38	685	8	1.245	997	68	3	170	16	7	306	72	2	303	3	215	2	4.102	3,08	10,39	4,61E+06	1,56E+07	1,08E+08	3,63E+08
39	706	8	1.282	1.027	70	3	175	16	7	315	74	2	312	3	221	2	4.223	3,08	10,39	4,75E+06	1,60E+07	1,12E+08	3,79E+08
40	727	8	1.320	1.058	72	3	180	16	7	324	76	2	321	3	228	2	4.347	3,08	10,39	4,89E+06	1,65E+07	1,17E+08	3,95E+08

FATOR DIRECIONAL : 1

FATOR CLIMÁTICO REGIONAL = 1

TAXA DE CRESCIMENTO = 3% a. a.

Fonte: Vetec Engenharia, 2015

Com base nos valores obtidos optou-se por uma questão de segurança adotar os resultados de número N mais altos entre os dois pontos calculados. Desta maneira os valores mais altos obtidos, correspondem ao Sentido Decrescente, assim para o período de projeto de 10 anos utilizado pelo projetista para o dimensionamento do pavimento semi-rígido e o de 40 anos para o dimensionamento do pavimento perpétuo serão os seguintes resultados:

NUSACE10 anos = 6,97 x 107 (Utilizado para o dimensionamento Pavimento Semi-Rígido)

NAASHTO10 anos = 1,75 x 107 (Utilizado para o dimensionamento Pavimento Semi-Rígido)

NUSACE40 anos = 4,52 x 108 (Utilizado para o dimensionamento Pavimento Perpétuo)

NAASHTO40 anos = 1,14 x 108 (Utilizado para o dimensionamento Pavimento Perpétuo)

5.5 ESTUDOS GEOTÉCNICOS

As investigações geotécnicas, realizadas ao longo dos meses de setembro e outubro de 2014, contemplaram o estudo do subleito e a identificação das estruturas dos pavimentos existentes.

O CBR de projeto foi calculado conforme as expressões abaixo:

$$CBR_p = \overline{CBR} - \frac{s \times t_{0,90}}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

Onde:

CBR_p = CBR de projeto (%)

\overline{CBR} = CBR Médio (%)

s = desvio padrão

n = número de amostras

$t_{0,90}$ = coeficiente de *Student*

$$\overline{CBR} = \frac{\sum_i^n CBR}{n} = 17,5\%$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CBR_i - \overline{CBR})^2}{n-1}} = 8,99\%$$

$$CBR_p = \overline{CBR} - \frac{s \times t_{0,90}}{\sqrt{n}} \rightarrow CBR_p = 16,7\%$$

$$CBR_{\min} = \overline{CBR} - \frac{s \times t_{0,90}}{\sqrt{n}} - 0,68 \times s \rightarrow CBR_{\min} = 10,6\%$$

Os valores de CBR cuja expansão foi maior ou igual a 2% foram excluídos dos cálculos. Após a análise dos resultados apresentados anteriormente, adotou-se para fins de dimensionamento do pavimento, CBR maior ou igual a 10,0%.

Portanto com base no CBR de projeto estabelecido para a implantação dos pavimentos, o subleito deverá apresentar CBR maior ou igual a 10% e expansão menor que 2%. Nos segmentos em que o solo do subleito não atende o valor de CBR preconizado, este deverá ser substituído conforme espessuras indicadas no quadro a seguir, por solos com $CBR \geq 10\%$ e expansão $< 2\%$.

Tabela 5.8 - Espessuras mínimas de substituição do solo

Espessuras Mínimas de Substituição de Solos	
Capacidade de Suporte (CBR)	Espessura (cm)
$8\% \leq CBR \leq 9\%$	15,0
CBR = 7%	20,0
CBR = 6%	25,0
CBR = 5%	35,0
CBR = 4%	50,0
CBR = 3%	70,0

Fonte: VETC Engenharia, 2015

Para os locais onde o solo apresenta $CBR < CBR_{\min}$ e/ou expansão $\geq 2\%$ deverá ser feita substituição do solo conforme consta na Tabela 5.9 a seguir.

Tabela 5.9 - Espessuras específicas de substituição do solo

Sondagem		Troca de Solo		Extensão (m)	CBR (%)	Expansão (%)	Troca solo Espessura (cm)
km	Estaca	Est. Inicial	Est. Final				
158,764	7938+4	7933+4	7943+4	200	9	0,78	15
161,865	8093+5	8088+5	8098+5	200	9	0,11	15
163,164	8158+4	8153+4	8163+4	200	9	0,18	15
163,564	8178+4	8173+4	8183+4	200	8	1,09	15
171,662	8583+2	8578+2	8588+2	200	6	1,46	25
172,460	8623+0	8618+0	8628+0	200	5	1,19	35
174,003	8700+3	8695+3	8705+3	200	9	0,91	15
174,380	8719+0	8714+0	8724+0	200	8	0,30	15
175,363	8768+3	8763+3	8773+3	200	9	0,36	15
175,960	8798+0	8793+0	8803+0	200	7	1,14	20
176,062	8803+2	8798+2	8808+2	200	6	1,1	25
176,363	8818+3	8813+3	8823+3	200	8	1,32	15
176,960	8848+0	8843+0	8853+0	200	6	1,10	25
178,423	8921+3	8916+3	8926+3	200	8	1,3	15

Fonte: VETEC 2015

5.6 DIMENSIONAMENTO PAVIMENTO SEMIRÍGIDO – MÉTODO DO DER/SP

O dimensionamento do pavimento semi-rígido foi baseado no tráfego solicitante ($NUSACE = 6,97 \times 10^7$) para um período de projeto de 10 anos, nas condições de suporte do subleito ($CBR \geq 10\%$). Todo memorial de cálculo, apresentados a seguir, estão expostos nos anexo A.

a) Materiais e Coeficientes de Equivalência Estrutural

Para $N = 6,97 \times 10^7$, o método recomenda revestimento tipo betão betuminoso com 15cm de espessura.

CBUQ com polímero (Betão Betuminoso Usinado á quente modificado com polímero): $K_{R1} = 2,0$

Binder: $K_{R3} = 1,7$

Base de SBTC – Solo Britado tratado com cimento: $K_B = 1,2$

Sub-base de Solo-Brita $K_{20} = 1,0$

b) Cálculo das Espessuras das Camadas

CAPÍTULO 5

$$R1 \times K_{R1} + R3 \times K_{R3} + B \times K_B \geq H_{20} \rightarrow H_{20} = 30 \text{ cm}$$

$$4,0 \times 2,0 + 11,0 \times 1,7 + B \times 1,2 \geq 30 \rightarrow B \geq 2,75 \text{ cm} \rightarrow B = 15 \text{ cm (adotado)}$$

$$R \times K_R + R3 \times K_{R3} + B \times K_B + h_{20} \times K_{20} \geq H_n - \text{para } CBR_p = 10\% \rightarrow H_n = 48 \text{ cm}$$

$$4,0 \times 2,0 + 11,0 \times 1,7 + 15 \times 1,2 + h_{20} \times 1,0 \geq 48 \text{ cm} \rightarrow h_{20} \geq 3,3 \text{ cm} \rightarrow h_{20} = 15 \text{ cm (adotado)}$$

c) Verificação do Dimensionamento

Camada	Espessura (cm)	Coef. Estrutural K	Espessura x K
Betão betuminoso com Polímero	4,0	2,0	8,0
CBUQ – Binder Grad.BC/ Dop	11,0	1,7	18,7
Solo-brita tratada com cimento	15,0	1,2	18,0
Solo-Brita (60% brita)	15,0	1,0	15,0
Espessura total em termos de material granular			59,7cm > H _m = 48,0cm

d) Seção Tipo de Pavimento – Pavimento Novo

Camada	Espessura (cm)
Betão Betuminoso com Polímero	4,0
Betão betuminoso Usinado Quente – Binder Grad.B C/ Dop	11,0
Solo-brita tratada com cimento	15,0
Solo-Brita (60% brita)	15,0
Subleito (CBR ≥ 10%, expansão < 2%)	-

5.6.1 Verificação Mecanicista

Para verificação mecanicista utilizou-se o programa ELSYM5 (*Elastic Layered System*), baseado na teoria da elasticidade linear, para avaliar as deflexões, tensões e deformações, em qualquer ponto da estrutura, sob ação de diversas cargas, para uma retro análise.

Admitiu-se carregamento de eixo-padrão de 8,2 tf. O eixo simples com rodas duplas solicita o pavimento com cargas de 2.050 kgf por roda, espaçadas por 28,8 cm e pressão de enchimento dos pneus de 5,6 kgf/cm².

Limitam-se as tensões e deformações em pontos específicos, particularmente na face inferior do revestimento, onde ocorrem tensões e deformações de tração que provocam trincas por fadiga, e no topo do subleito, onde as tensões e deformações verticais de compressão são associadas ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda.

A seguir apresentam-se os modelos de fadiga adotados, conforme IP-DE-P09/001 (DER/SP, 2006), para determinação das tensões e deformações admissíveis considerando cada um dos critérios de ruptura apresentados:

Critério de ruptura por deflexão na superfície: para estimar a vida de fadiga do revestimento asfáltico a partir da deflexão no topo da camada de revestimento, foi adotado o modelo preconizado no procedimento DNER-PRO 269/94:

$$\text{Log } D = 3,148 - 0,188 \log N$$

Onde:

D = Deflexão na superfície (10^{-2} mm);

N = Número de solicitações do eixo padrão de 80kN para o período de projeto.

Critério de ruptura por fadiga na camada de revestimento asfáltico: para estimar a vida de fadiga do revestimento asfáltico, a partir da deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica, utilizou-se do modelo proposto por FHWA (*Federal Highway Administration*, 1976):

$$N = 1,092 \times 10^{-6} \times \xi_t^{-3,512} \quad (20)$$

Onde:

N - número de solicitações do eixo padrão de 80kN para o período de projeto;

ξ_t - deformação específica de tração na fibra inferior da camada de revestimento.

Critério de ruptura na camada cimentada: Para estimar a vida de fadiga na camada cimentada, a partir da deformação de tração na fibra inferior da camada cimentada, utilizou-se do modelo proposto por Balbo (1993):

$$N = \text{FLC} \times 10(17,137 - 19,608 \text{ RT}) \quad (21)$$

Onde:

FLC = fator de laboratório - campo = 0,05

RT = σ_t / σ_r

σ_t = tensão de tração na flexão (MPa)

σ_r = tensão de ruptura (MPa) = 0,9

N = número de solicitações do eixo padrão de 80kN para o período de projeto.

Critério de ruptura no subleito: foi adotado o modelo preconizado por Dormon&Metcalf (1965), para verificação do número admissível de repetições do eixo padrão em função da deformação específica vertical de compressão no topo do subleito.

$$N = 6,07 \times 10^{-10} \times \varepsilon_v^{-4,762} \quad (22)$$

Onde:

N - número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf para o período de projeto;

ε_v - deformação específica vertical de compressão no topo do subleito.

A Tabela 5.10 - Modelo estrutural – Pista de Rolamento Tabela 5.10 a seguir apresenta o modelo estrutural considerado na análise do pavimento da pista de rolamento.

Tabela 5.10 - Modelo estrutural – Pista de Rolamento

Camada	Espessura (cm)	MR (MPa)*	μ^*
Concreto Asfáltico**	15	3.500	0,30
Solo-brita tratado com cimento**	15	6.000	0,20
Solo-brita**	15	250	0,35
Subleito (CBR \geq 10%, expansão < 2%)	-	100	0,40

(Fonte: VETEC, 2015)

Notas: * Valores de Módulo de Resiliência (25°C) e coeficientes de Poisson considerados na análise.

**As camadas constituintes das estruturas de pavimentos deverão ser executadas de acordo com as especificações técnicas do DER/SP – Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo e na sua inexistência, de acordo com as especificações do DNIT – Departamento Nacional de Infraestruturas de transporte e DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S.A., sem as quais estes dimensionamentos não terão validade.

Para a determinação do módulo de resiliência dos solos do subleito, considerou-se a expressão proposta por Heukelon e Foster (1960) apud NOGAMI & VILLIBOR (1995):

$$MR = 100 \times ISC \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad (23)$$

O Anexo A contém os esforços solicitantes obtidos a partir da retro análise e os arquivos de saída do programa Elsym5 para as estruturas que foram analisadas e como resultado da estrutura final do pavimento semi-rígido apresenta-se a Figura 5.5 a seguir.

CAMADA	ESPESSURA	MR (MPa)		
CAPA	15	3500		
BASE	20	6000	"N" de Projeto	
SUB-BASE	20	250	USACE	AASHTO
SUBLEITO	-	100	6,97E+07	1,75E+07

CAMADA DE REVESTIMENTO					
Critério de Ruptura Por Deflexão na Superfície (10^{-2} mm)					
Resultado ELSYM					
Método	k	n	D_{adm}	$D_{solicitante}$	Verificação
DNER PRO 269/94	3,148	0,188	47,149	26,31	ok
DNER PRO 011/79	3,01	0,176	42,62	26,31	ok

CAMADA DE REVESTIMENTO					
Critério de Ruptura por Fadiga (10^{-4} cm/cm)					
Resultado ELSYM					
Método	k	n	ϵ_{tadm}	$\epsilon_{t_solicitante}$	Verificação
FHWA (Federal Highway Administration, 1976)	1,09E-06	3,512	1,738	0,03	ok

CAMADA CIMENTADA					
Critério de Ruptura por Fadiga (10^{-4} cm/cm)					
Resultado ELSYM					
Método	a	b	σ_{adm}	$\sigma_{t_solicitante}$	Verificação
Balbo (93)	17,137	19,6078	3,79	3,48	ok

SUBLEITO					
Critério de Ruptura no Subleito (10^{-4} cm/cm)					
Resultado ELSYM					
Método	k	n	ϵ_{Vadm}	$\epsilon_{V_solicitante}$	Verificação
Dormon & Metcalf (Shell, 1965)	6,069E-10	4,762	2,615	1,201	ok

Figura 5.5 - Resultados da verificação método DER/SP.

Fonte:(VETEC, 2015)

Verifica-se, através dos resultados obtidos com o programa Elsym5, que os valores admissíveis não são ultrapassados. Portanto, a estrutura de pavimento dimensionada é suficiente para atender ao tráfego previsto para o período de projeto de 10 anos, preconizado pelo projetista e cliente.

A estrutura do pavimento semi-rígido a ser construído no estudo de caso é apresentada na Tabela 5.11 a seguir:

Tabela 5.11 - Estrutura Final Pavimento Semi-rígido

Camada	Espessura (cm)
Betão Betuminoso com Polímero	4,0
Imprimação Betuminosa Ligante	-
Betão Betuminoso Us. Quente – <i>Binder Grad. B C/Dop</i>	11,0
Imprimação Betuminosa Ligante	-
Imprimação Betuminosa Impermeabilizante	-
Solo-brita tratada com cimento	20,0
Solo-brita (60% brita)	20,0
Melhoria e Preparo do Subleito (CBR \geq 10%, expansão < 2%)	-

Fonte: (VETEC Engenharia, 2015)

5.7 DIMENSIONAMENTO PAVIMENTO PERPÉTUO – MÉTODO SHELL

Para a realização do dimensionamento do pavimento perpétuo foi utilizada uma ferramenta computacional para análise da deformação de tração na fibra inferior da camada betuminosa e para obter uma configuração de pavimento com vida útil de 40 anos. Esta estrutura foi dimensionada de modo que as camadas do pavimento não apresentem danos estruturais. Apenas a camada de revestimento (rolamento) deverá sofrer intervenções periódicas. Outra premissa seguida para o dimensionamento do pavimento perpétuo foi a ilustrada na Figura 4.3, que se encontra no subcapítulo 4.1, em que demonstra uma zona de alta compressão nos primeiros 15 cm da estrutura de um pavimento perpétuo e uma zona de alta tração entre a última camada de mistura betuminosa do pavimento perpétuo e o subleito do pavimento. Com está premissa ilustrada na Figura 4.3, permite-se estabelecer que a camada de base do pavimento perpétuo deverá resistir a tensões de tração, enquanto que as camadas intermediária e superficial deverão resistir a alta compressão.

A estrutura do pavimento perpétuo foi dimensionada, durante o desenvolvimento desta pesquisa, de acordo com o método Shell. A escolha dos materiais descritos abaixo, seguiram as orientações e exemplos demonstrados no subcapítulo 4.1, desta dissertação.

Para a camada de desgaste, foi considerada as recomendações da utilização de misturas tipo SMA - *Stone Matrix Asphalt*, utilizada em situações que é necessária alta resistência à deformação permanente, durabilidade, impermeabilidade e resistência ao desgaste, essas características são concedidas a este tipo de mistura asfáltica devido às suas características granulométricas conjuntamente com a combinação do mástique (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001). A mistura considerada é o SMA 0/8S AMP 6,5% SBS, tendo como base a mistura adotada por Silva (2012), que possuía a percentagem de volume de vazios de 4,0%, teor de ligante betuminoso de 7,5%, e ligante com penetração de 55×10^{-1} mm e temperatura de amolecimento de 59°C. Esta mistura foi utilizada em um trecho de estudo para a melhor dosagem de uma mistura betuminosa SMA em um cenário de clima e tráfego brasileiro.

Para a camada intermediária do pavimento foi considerada a recomendação de Newcomb, et al, 2002, que orienta a utilização de uma mistura betuminosa de alto módulo. Com essa premissa seguimos a utilização de uma mistura EME-1, tendo como base a adotada por VILLELA (2012), com percentagem de ligante de 5,8%, o ligante tem penetração de 15×10^{-1} mm e temperatura de amolecimento de 79°C. Esta mistura de alto módulo foi utilizada em um estudo de misturas de alto módulo aplicada em um cenário brasileiro como o clima e o tráfego, este estudo foi realizado por VILLELA (2012), em um trecho experimental na Rodovia Presidente Dutra (BR-116), no estado de São Paulo, Brasil.

Para a última camada, a camada de base, é recomendado uma mistura que tenha alta resistência à fadiga, e para esta dissertação foi utilizada a mistura chamada de IBB15 (Mistura *Asphalt Institute* com ligante betuminoso tipo terminal *blend* com 15% de borracha, tendo como base a adotada por GRILLO (2015), com percentagem de ligante de 7,5%, o ligante tem penetração de 60×10^{-1} mm e temperatura de amolecimento de 46°C. Esta mistura foi utilizada por Grillo (2015), para o dimensionamento de pavimento perpetuo teórico de um trecho da Rodovia BR-282 entre as cidades de Palhoça e Santo Amaro da Imperatriz no estado de Santa Catarina, Brasil.

5.7.1 Temperaturas de serviço

Utilizando as equações (4), (5) e (6) demonstradas no capítulo 3.2 desta dissertação foram calculados os fatores de correção (W) de cada mês. As temperaturas médias mensais do ar obtidas e os fatores de correção (W) calculados para cada mês juntamente com o $W_{\text{médio}}$ e a TMMAP, podem ser observados na

Tabela 5.12 a seguir:

Tabela 5.12 - Temperaturas de Serviço

Mês	Temperatura média mensal (°C)	W	W _{médio}	T _{MMAP} (°C)
Janeiro	22,9	1,4024	1,08	20,9
Fevereiro	23,2	1,4608		
Março	22,5	1,3435		
Abril	21,4	1,1515		
Maiο	18,0	0,7490		
Junho	17,3	0,6835		
Julho	17,4	0,6913		
Agosto	19,1	0,8610		
Setembro	20,7	1,0594		
Outubro	21,0	1,0982		
Novembro	21,1	1,1182		
Dezembro	22,8	1,3932		
Σ		13,0120		

As temperaturas de serviço das camadas asfálticas foram obtidas entrando com a T_{mmap} e as espessuras das camadas no ábaco da Figura 3.3, já apresentada nesta dissertação no subcapítulo 3.2.

Tabela 5.13 - Temperaturas de Serviço

Temperaturas de Serviço _{calc}			
	Espessura (m)	z (m)	T _{mb} (°C)
Camada de desgaste	0,05	0,05	32,0
Camada intermediária	0,10	0,15	30,5
Camada de base	0,10	0,25	29,8

5.7.2 Módulo de deformabilidade

Os módulos de deformabilidade das camadas foram calculados por meio das equações (6), (7) e (8) apresentadas no capítulo 3.2 desta dissertação, com o uso de tabelas em Excel para os cálculos das equações, que se encontram no Anexo B, e considerando um CBR de 10%, calculado no capítulo 5.5. A Tabela 3.1 a seguir traz os módulos de deformabilidade calculados para cada camada.

Tabela 5.14 - Módulo de deformabilidade das camadas

Camada	Módulo de Deformabilidade (MPa)
Desgaste	6350
Intermediária	11000
Base	4900
Subleito	100

5.7.3 Deformações máximas de tração e compressão vertical

A Tabela 5.15, a seguir, traz as deformações máximas admissíveis calculadas por meio das equações (17) e (18), apresentadas no capítulo 3.2 desta dissertação, com o uso de quadros em Excel, apresentados no ANEXO B.

Tabela 5.15 - Deformações Máximas Admissíveis de Tração e Compressão

Camadas	Material	Deformação de Tração Máxima Admissível (μm)	Deformação Vertical Máxima Admissível (μm)
Desgaste	SMA /8s - AMP 6,5% SBS	83,00	-
Intermediária	EME – Assis CAP 20	68,00	-
Base	CBUQ - CAP 50/70 (IBB15)	85,00	-
Subleito	Solo	-	123,00

Com o auxílio do software Alize LCPC, foram simuladas as deformações utilizando os dados de entrada ilustrados na Figura 5.6 e na Figura 5.7 a seguir:

O Alize-LCPC foi criado para implementar o método de concepção mecânica racional para estruturas de pavimentos, conforme desenvolvido pelas organizações francesas LCPC e SETRA. Este método constitui a abordagem regulamentar para a concepção de pavimentos em toda a rede rodoviária nacional francesa

e, além disso, foi adotado por muitas outras agências de desenvolvimento de projetos rodoviários (LCPC,2011).

Basis structure				
	thick. (m)	modulus (MPa)	Nu	material type
bonded	0,05	6350	0,35	other
bonded	0,10	11000	0,35	other
bonded	0,10	4900	0,35	other
	infinite	100	0,45	other

Figura 5.6 - Dados de entrada do Pavimento Perpétuo. (Alize LCPC)

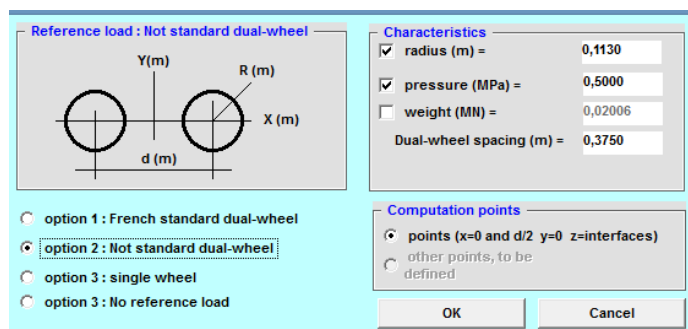


Figura 5.7 - Características de um carregamento com eixo de 80Kn. (Alize LCPC)

Após analisar as simulações das possíveis estruturas para o pavimento perpétuo, chegamos a estrutura mais otimizada e que atende aos parâmetros exigidos no dimensionamento e está demonstrada na Tabela 5.16 a seguir:

Tabela 5.16 - Deformações do Pavimento Dimensionado pelo método Shell

Verifica-se, por meio dos resultados obtidos com o programa ALIZE LCPC, que os valores admissíveis não são ultrapassados. Portanto, a estrutura de pavimento dimensionada é suficiente para atender ao tráfego previsto para o período de projeto de 40 anos, segundo o método da Shell, preconizado por esta dissertação e segundo a bibliografia estudada para o tema central de pavimentação perpétua os materiais e misturas atendem os requisitos e parâmetros estudados na bibliografia para o reconhecimento da estrutura como perpétuo.

CAPÍTULO 6

ESTRUTURAS FINAIS E ESTUDO TÉCNICO E ECONÔMICO

6.1 APRESENTAÇÃO DOS CUSTOS DE CONCEPÇÃO DOS PAVIMENTOS.

Para o estudo de viabilidade técnica e econômica, foram consideradas as estruturas de pavimentos dimensionadas conforme método empírico do DNER apresentado no Manual de Pavimentação – Publicação IPR-719 (DNIT, 2006) e Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 do DER e verificadas através da análise mecanicista, utilizando-se o programa ELSYM5 para a estrutura do pavimento semi-rígido. A estrutura semi-rígida foi dimensionada para o período de projeto de 10 anos, considerando o tráfego solicitante ($NUSACE = 6,97 \times 10^7$) e as condições de suporte do subleito ($ISC \geq 10\%$).

Para o pavimento perpétuo, obteve-se a estrutura dimensionada conforme o método Shell, exposto no capítulo 3.2 desta dissertação, e verificado por meio da análise mecanicista, utilizando o programa ALIZE LCPC. A estrutura perpétua foi dimensionada para um período de projeto de 40 anos, considerando o tráfego solicitante ($NUSACE = 4.52 \times 10^8$) e as condições de suporte do subleito ($ISC \geq 10\%$).

As estruturas resultantes são apresentadas na Tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6.1 - Estruturas finais dimensionadas

Camadas	Pavimento Perpétuo		Pavimento Semi-rígido	
	Material	Espessura (m)	Material	Espessura (m)
Desgaste	SMA /8s AMP 6,5% SBS	0,05	Betão betuminoso com Polímero	0,04
Intermediária	EME 1 – VILLELA (2012)	0,10	Betão betuminoso Usinado Quente – Binder Grad.B C/Dop	0,11
Base	CBUQ - CAP 50/70 (IBB15) GRILLO (2015)	0,10		
Sub-base	-	-	Solo-brita tratada com cimento	0,2
Sub-base 2	-	-	Solo-brita (60% brita)	0,2
Subleito	Melhoria e Preparo do Subleito ($CBR \geq 10\%$, expansão $< 2\%$)	Idêntico Variável	Melhoria e Preparo do Subleito ($CBR \geq 10\%$, expansão $< 2\%$)	Idêntico Variável

Com base nas estruturas finais, foi feito o levantamento dos custos de cada estrutura que serão apresentadas nas tabelas 17 e 18 a seguir:

Tabela 6.2 - Análise Financeira pavimento semi-rígido

Pavimento Flexível						
Material	Código TPU/DER-SP	Unid.	Área	Espessura (m)	Preço Unitário (R\$)	Preço Total por m ² (R\$/m ²)
Betão betuminoso com Polímero	23.08.05.99	m ³	1,00	0,04	877,57	R\$ 35,10
IMPRIM. BET. LIGANTE MODIF. POLIMERO	23.05.04.99	m ³	1,00	-	3,13	R\$ 3,13
Concreto Asfáltico Us. Quente - Binder Grad. B C/Dop	23.08.02.99	m ³	1,00	0,11	788,02	R\$ 86,68
Imprimadura betuminosa ligante	23.08.02.99	m ²	2,00	-	2,39	R\$ 4,78
Imprimadura Impermeabilizante	23.05.01.99	m ²	1,00	-	6,47	R\$ 6,47
Solo-brita tratada com cimento	23.04.02.03.01.99	m ³	1,00	0,2	219,85	R\$ 43,97
Solo-brita (60% brita)	23.04.02.07.02.99	m ³	1,00	0,2	132,69	R\$ 26,54
Melhoria e Preparo do Subleito (CBR ≥ 10%, expansão < 2%)	37.03.09.99	m ²	1,00	-	1,49	R\$ 1,49
PREÇO TOTAL POR M² DE SOLUÇÃO R\$ (Reais)						R\$ 208,16
PREÇO TOTAL POR M² DE SOLUÇÃO € (Euros)						€ 56,26

Conversão realizada em 03/10/2017: <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>

Fonte: <http://www.der.sp.gov.br/Website/Acessos/Documentos/PrecosUnitarios.aspx>

Os custos de cada material para composição dos preços do pavimento semi-rígido foram retirados da Tabela de Preços Unitários do DER/SP, com data de referência de 31/12/2016.

Tabela 6.3 - Análise Financeira pavimento perpétuo

Pavimento Perpétuo						
Material	Código TPU DER-SP	Unid.	Área	Espessura (m)	Valor Unitário m ³	Preço Total por m ² (R\$/m ²)
SMA /8s AMP 6,5% SBS	59300*	m ³	1,00	0,05	1072,38	R\$ 53,62
IMPRIM. BET. LIGANTE MODIF. POLIMERO	23.05.04.99	m ³	1,00	-	3,13	R\$ 3,13
EME - Vilella, (2015) CAP 10-20	-	m ³	1,00	0,10	1489,97	R\$ 149,00
Imprimadura betuminosa ligante	23.08.02.99	m ²	2,00	-	2,28	R\$ 4,56
CBUQ - CAP 50/70 (IBB15)	23.08.06.05.99	m ³	1,00	0,10	1056,63	R\$ 105,66
Imprimadura betuminosa ligante	23.08.02.99	m ²	2,00	-	2,28	R\$ 4,56
Imprimadura Impermeabilizante	23.05.01.99	m ²	1,00	-	6,47	R\$ 6,47
Melhoria e Preparo do Subleito (CBR ≥ 10%, expansão < 2%)	37.03.09.99	m ²	1,00	-	1,49	R\$ 1,49
PREÇO TOTAL POR M² DE SOLUÇÃO R\$ (Reais)						R\$ 328,50
PREÇO TOTAL POR M² DE SOLUÇÃO € (Euros)						€ 88,78

Conversão realizada em 03/10/2017: <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>

Fonte: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas_de_custos

Os custos utilizados nesta dissertação para a composição do preço por m² de solução foram determinados por meio de pesquisas na bibliografia e de preços comercialmente praticados no estado de São Paulo.

As composições dos custos para camada de rolamento de SMA/8S AMP 6.5% SBS são baseadas nos valores apresentados na Tabela de Custos de Infraestrutura urbana, da prefeitura de São Paulo com data base de janeiro de 2017 (SÃO PAULO, 2017).

A composição de custo da mistura de CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente, modificado com 15% de borracha, utilizado por GRILLO (2015), está presente na TPU – tabela de preços unitários retirados do DER/SP, com data de referência de 31/12/2016.

Devido as dificuldades de encontrar uma mistura comercialmente utilizada para pavimentos de módulo elevado, na tabela 18 segue a formulação da composição dos custos para misturas EME. Os custos para essa mistura foram baseados na seguinte composição:

Tabela 6.4 - Composição de Custos por m2 de Mistura EME

Mistura EME 1	Código: TPU - Prefeitura São Paulo* / SICRO**	UND	Qtd	Densidade específica (kg/m ³)	Volume de materiais (m ³)	Preço unitário (R\$/m ²)	Valor Unitário m ³ (R\$/m ³)	Preço Total por m ² (R\$/m ²)
Ligante CAP AM-1 Petrobras (2017)	***	kg/m ³	330,88	1040	0,32	2000	636,31	R\$ 63,63
Brita 1	M0191**	kg/m ³	221,6	1384	0,16	65,87	10,55	R\$ 1,05
Pedrisco	M1103 **	kg/m ³	564,06	1375	0,41	75	30,75	R\$ 3,07
Pó de pedra	M1200**	kg/m ³	1228,86	1500	0,82	50	41,00	R\$ 4,10
Usina misturadora	E9689**	Und	1	-	-	-	687,25	R\$ 68,73
Servente (sgsp)	2099*	H	0,8333	-	-	14,83	12,36	R\$ 1,24
Rasteleiro (sgsp)	2225*	H	0,2777	-	-	21,85	6,07	R\$ 0,65
Caminhão irrigadeira - 6000 l	94014*	H	0,1388	-	-	98,92	13,73	R\$ 1,40
Compressor portátil - 295 pcm (com diesel e operador)	94019*	H	0,0694	-	-	40,5	2,81	R\$ 0,30
Rolo compactador vibratório de um cilindro 7 ton.	94049*	H	0,1388	-	-	93,33	12,95	R\$ 1,30
Rolo compactador de pneus -27 ton	94275*	H	0,1388	-	-	133,57	18,54	R\$ 1,90
Vibroacabadora de asfalto sobre esteira cap. 300 ton/h	94293*	H	0,1388	-	-	127,14	17,65	R\$ 1,80
Preço total por m ² de mistura							1489,97	R\$ 149,00
* TPU - Prefeitura de São Paulo http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas_de_custos/index.php?p=224096 ; **SICRO - SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - São Paulo - data base: janeiro 2017; *** Preço fornecido pela PETROBRAS - Valor comercial da mistura asfáltica de alto módulo;								

Como as informações são insuficientes para identificação do custo da mistura utilizada por VILLELA (2015), pois trata-se de uma mistura para fins de pesquisa, o ligante utilizado para composição foi o CAP AM-1, produzido pela Petrobrás que disponibilizou seu custo de fabricação. O custo do ligante betuminoso AM-1 para a mistura de EME estão ilustrados na figura a seguir, enviado pela PETROBRAS:



Thiago Mendonça <thiago.sap4@gmail.com>

Informações Técnicas de Produtos

elaine@br-petrobras.com.br <elaine@br-petrobras.com.br>
Para: thiago.sap4@gmail.com
Cc: thiago.santos@laer.com.br

16 de maio de 2017 09:11

Thiago, boa tarde!

Segue a ficha técnica do CAP , com relação ao preço segue o preço praticado na nossa política comercial.

Preço para venda vigente nesta data - R\$ 2.500,00 /ton. O preço de custo produção não temos para informar, recebemos os preços para venda a cliente a formação do mesmo é feita por outra Gerência que fica na sede da CIA.

(See attached file: LCPBR - TABELA CAP`S - FOLDER_rev5.pdf)

Elaine

Gerência de Comercialização de Asfaltos - GCASF1
Petrobras Distribuidora S/A
Tel.:(19) 3735 6762

—

Pense antes de imprimir!

Lembre-se do seu compromisso com o ambiente e com o futuro!

O emitente desta mensagem é responsável por seu conteúdo e endereçamento. Cabe ao destinatário cuidar quanto ao tratamento adequado. Sem a devida autorização, a divulgação, a reprodução, a distribuição ou qualquer outra ação em desconformidade com as normas internas do Sistema Petrobras são proibidas e passíveis de sanção disciplinar, cível e criminal.

—

Pense antes de imprimir!

Lembre-se do seu compromisso com o ambiente e com o futuro!

O emitente desta mensagem é responsável por seu conteúdo e endereçamento. Cabe ao destinatário cuidar quanto ao tratamento adequado. Sem a devida autorização, a divulgação, a reprodução, a distribuição ou qualquer outra ação em desconformidade com as normas internas do Sistema Petrobras são proibidas e passíveis de sanção disciplinar, cível e criminal.

 LCPBR - TABELA CAP`S - FOLDER_rev5.pdf
18K

Figura 6.1 - Custo comercial CAP AM-1 para mistura betuminosa EME

Fonte: PETROBRAS, 2017

Todos os outros itens da composição são encontrados na TPU – DER/SP e pela Tabela de Custos de Infraestrutura urbana, da prefeitura de São Paulo com data base de janeiro de 2017, pois conforme afirmado por VILLELA (2015), a usinagem e compactação de uma mistura de EME são efetuadas sem dificuldades adicionais, por esse motivo foi utilizado uma base das composições de SMA, para equipamentos e mão de obra para a compactação.

6.2 PROGRAMA DE GERENCIAMENTO, CONTROLE E MANUTENÇÃO

Para avaliação dos custos totais necessários para manutenção de ambas as estruturas utilizou-se um período de 13 anos para avaliação. No projeto do pavimento perpétuo o período reabilitação de 13 anos é necessário pois é o mínimo para que um pavimento perpétuo atinja a idade para a premiação oferecida pela APA – *Asphalt Pavement Alliance*, conforme bibliografia apresentada no subitem 4.3, (NEWCOMB et al.,2010).

Para o projeto de manutenção e conservação do pavimento semi-rígido, foram utilizados os critérios de norma estabelecidos no subcapítulo 2.4 desta dissertação e o auxílio do software HDM 4 (*Highway Development and Management System*), no qual foi gerado um cronograma de manutenção para o pavimento semi-rígido, desenvolvido especificamente para a realização desta dissertação e gentilmente fornecido pela Dra. Andrea Arantes Severi, da empresa Ecoworld Ar (Ecoworld - Consultoria e Administração Ltda. - ME). O plano de gerenciamento e manutenção encontra-se no Anexo C desta dissertação. O programa de manutenções periódicas para o pavimento semi-rígido faz-se necessário para o prolongamento do período de vida útil do projeto de 10 anos para 30 anos, ao final deste programa de manutenção periódica o pavimento semi-rígido estará estruturalmente esgotado e será necessária a reconstrução do pavimento.

O programa HDM-4 foi concebido para a análise econômica de rede rodoviária para investimentos com restrição orçamentária, procurando atingir a maior extensão possível, mirando o maior retorno através do Valor Presente Líquido dos diversos cenários estudados, dentro de um horizonte de projeto, podendo avaliar diversas alternativas de intervenções, indicando a época para a realização dos investimentos, tendo como objetivo a melhor condição da rede no final do período de projeto (DNIT,2011).

Os dados utilizados como entrada para a rodada do HDM-4 são condições atuais dos pavimentos das rodovias, obtidas através de um Banco de Dados para cada célula (extensões, estrutura, volume de tráfego, defeitos, irregularidade, deflectometria, geometria, largura de pista, largura de acostamentos, declividades médias, índice de curvatura, etc., condições climáticas, de topografia, idade do pavimento, idade da última restauração, etc.), dados da frota nacional (tipo de veículos, peso, custos de aquisição e

de manutenção, custo do combustível), as políticas de intervenção (tipo de manutenção ou restauração e custo) e os cenários de investimento (DNIT,2011).

Os resultados do HDM-4 são traduzidos nos tipos de intervenção para cada segmento, custo e época, dentro de um cenário de investimentos. Este programa é de uso obrigatório para obtenção de investimentos do Banco Mundial (DNIT,2011).

Os levantamentos das áreas para a realização das manutenções são baseados nos quantitativos fornecido pela VETEC (2015) e são apresentados na Tabela 6.5 a seguir:

Tabela 6.5 - Levantamento das áreas de pavimentação

Rodovia/Trecho	Segmento Homogêneo	Início (km)	Fim (km)	Extensão (km)	Área (m ²)
Estudo de Caso					
	2	159,20	161,80	2,60	18.200,00
	3	161,80	165,80	4,00	28.000,00
	4	165,80	168,00	2,20	15.400,00
	5	168,00	171,20	3,20	22.400,00
	6	171,20	174,40	3,20	22.400,00
	7	174,40	176,40	2,00	14.000,00
	8	176,40	179,60	3,20	22.400,00

Fonte: VETEC 2015

Os resultados dos planos de manutenção para o pavimento perpétuo e para o pavimento semi-rígido são apresentados resumidamente na tabela 20 a seguir, e poderão ser consultados em detalhes no anexo C desta dissertação.

Tabela 6.6 – Quantificação das áreas para aplicação das soluções de manutenção

Ano	Pavimento Semi-rígido						Pavimento Perpétuo
	F4R4+R3	REC	RL	RP	F4R4	Gap Graded	F5S5
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-
3	12880,00	-	588,70	2128,00	26250,00	123970,00	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-
8			703,50	1407,00	70350,00	70350,00	-
9			112,00	224,00	11200,00	11200,00	-
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	163100,00
Total de Mistura asfáltica (m²)	12880,00	0,00	1404,2	3759,00	107800,00	205520,00	163100,00
Total Geral (m²)	3331363,20						163100,00

Fonte: Adaptado de Severi, 2017

Legendas:

***RL - Reparos Localizados Superficiais**

Composição: 5 cm CBUQ Faixa III

Imprimação Ligante

***RP - Reparos Profundos**

Composição: 5 cm CBUQ Faixa III

Imprimação Ligante

5 cm Binder Faixa II

Imprimação Ligante

Imprimação Impermeabilizante

15 cm BGS

20 cm Bica Corrida ou Solo CBR > 20%

***F4R4: Fresagem de 4 cm + Recomposição com 4 cm de CBUQ**

Composição: 4 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
4 cm fresagem

***F4R4+R3: Fresagem de 4 cm + Recomposição com 4 cm de CBUQ + 3 cm Reforço em CBUQ**

Composição: 3 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
4 cm CBUQ Faixa II (binder)
Imprimação Ligante
4 cm fresagem

***GAP: Gap Graded**

Composição: 2 cm concreto asfalto borracha morno (Betão betuminoso modificado com borracha), com 15% de borracha.

***F5S5: Fresagem de 5cm e recomposição de 5cm SMA 0/8S**

Com a definição das áreas de aplicação e soluções de manutenção adotadas para ambas as estruturas, seguimos para a composição de custos para cada uma das soluções que serão adotadas. Estas composições são apresentadas na Tabela 6.7 a seguir:

Tabela 6.7 - Composição de custos por m² de Solução

PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO						
Solução	Composição	Código TPU DER-SP / TPU – Pref. de São Paulo*	Und.	Área m ²	Valor Unitário	Preço Total por m ² (R\$/m ²)
F4R4+R3: Fresagem de 4cm + recomposição com 4 cm de CBUQ + 3 cm reforço em CBUQ	3 cm CBUQ Faixa III	23.08.05.99	m ³	1,00	877,57	R\$ 26,33
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ³	1,00	2,39	R\$ 2,39
	4 cm CBUQ Faixa II	23.08.05.99	m ³	1,00	877,57	R\$ 35,10
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ²	1,00	2,39	R\$ 2,39
	4 cm fresagem	37.03.18.99	m ²	1,00	173,38	R\$ 6,94
Preço total por m ² de solução						R\$ 73,15
RL - Reparos localizados superficiais	5 cm CBUQ Faixa III	23.08.05.99	m ³	1,00	877,57	R\$ 43,88
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ²	1,00	2,39	R\$ 2,39
	5 cm fresagem	37.03.18.99	m ²	1,00	173,38	R\$ 8,67
Preço total por m ² de solução						R\$ 54,94
RP: Reparos profundos	5 cm CBUQ Faixa III	23.08.05.99	m ³	1,00	877,57	R\$ 43,88
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ²	1,00	2,39	R\$ 2,39
	25 cm fresagem	37.03.18.99	m ²	1,00	43,35	R\$ 43,35
	5 cm Binder Faixa II	23.08.05.99	m ³	1,00	877,57	R\$ 43,88
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ²	1,00	2,39	R\$ 2,39
	Imprimação Impermeabilizante	23.05.01.99	m ²	1,00	6,47	R\$ 6,47
	15 cm BGS	23.04.03.01.99	m ³	1,00	194,76	R\$ 29,21
	20 cm Bica Corrida ou Solo CBR > 20%	23.04.03.03.99	m ³	1,00	166,46	R\$ 33,29
Preço total por m ² de solução						R\$ 204,86
F4R4: Fresagem de 4 cm + Recomposição com 4 cm de CBUQ	4 cm CBUQ Faixa III	23.08.05.99	m ³	1,00	877,57	R\$ 35,10
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ²	1,00	2,39	R\$ 2,39
	4 cm fresagem	37.03.18.99	m ²	1,00	6,94	R\$ 6,94
Preço total por m ² de solução						R\$ 44,43
GAP: Gap Graded	2 cm Betão betuminoso borracha com 15% de borracha.	23.08.06.06.99	m ³	1,00	1.064,18	R\$ 21,28
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ²	1,00	2,39	R\$ 2,39
Preço total por m ² de solução						R\$ 23,67

PAVIMENTO PERPÉTUO						
Solução	Composição	Código TPU DER-SP / TPU – Pref. de São Paulo*	Und.	Área m ²	Valor Unitário	Preço Total por m ² (R\$/m ²)
F5S5 : fresagem 5cm + recomposição 5cm SMA /8s AMP 6,5% SBS SILVA (2005)	5 cm fresagem	37.03.18.99	m ²	1,00	6,94	R\$ 8,67
	5 cm recomposição SMA 08/S	059300*	m ³	1,00	1.072,38	R\$ 53,62
	Imprimação Ligante	23.05.02.99	m ²	1,00	2,39	R\$ 2,39
Preço total por m ² de solução						R\$ 64,68

As composições dos custos de cada solução foram retiradas as TPU – DER/SP com data de referência de dezembro de 2016 (DER/SP, 2016) e da Tabela de custos de obras e serviços da prefeitura de São Paulo de 2017. (SÃO PAULO, 2017)

6.3 ANÁLISE COMPARATIVA

A comparação dos tipos de pavimentos foi feita de modo a apresentar as vantagens e desvantagens de uma estrutura em relação a outra, sendo assim para as estruturas em estudo nesta dissertação, pavimento semi-rígido aplicado em grande escala no Brasil e o pavimento perpétuo que possui aplicação em escala significativa nos EUA e Europa, a comparação foi feita, além de características financeiras para sua execução, também naquelas relacionadas ao projeto, execução e manutenção dos mesmos:

- **Mão de Obra**

Os colaboradores empregados em obras de qualquer tipo têm graus de conhecimento, sendo que, ao nível que o conhecimento evolui a qualidade do serviço evolui na mesma proporção. As vantagens de ter mão de obra especializada é o aumento da produtividade, o menor risco com erros, e principalmente maior qualidade no produto final, em contrapartida essa especialização faz com que tenha o encarecimento na contratação. O SEBRAE (2015) afirma que apesar do baixo custo inicial com a contratação de mão de obra desqualificada o retorno é baixo, sendo assim a necessidade de mais e com isso o custo intermediário e final pode ser igual ou até maior à contratação de pessoas especializadas.

Os pavimentos convencionais em sua execução não solicitam mão de obra qualificada, apenas um projeto bem elaborado por profissionais e um acompanhamento da construção. Já os pavimentos perpétuos necessitam de mão de obra previamente treinada, pois a qualidade aplicada na construção irá afetar diretamente na vida útil da estrutura.

- **Materiais**

Pode-se dizer que a seleção de materiais é uma das etapas mais importantes, pois qualquer erro na dosagem, qualidade ou escolha coloca em risco a estrutura. Na pavimentação cada tipo de pavimento requer uma mistura específica para atender as peculiaridades da região ao qual serão inseridos (BERNUCCI et al. 2008), em geral o clima e o tráfego dita qual é o pavimento mais adequado. Os materiais aplicados em pavimentos perpétuos e pavimentos semi-rígidos devem sempre apresentar boa qualidade e correta dosagem, por vez alguns pavimentos requerem materiais de difícil acesso. Nos pavimentos perpétuos por conta de suas camadas estruturais e de seu desempenho esperado pode ocorrer a dificuldade de encontrar o material mais adequado além de gerar um custo maior.

- **Vida útil**

O pavimento perpétuo é projetado para apresentar uma vida útil de 40 anos ou mais apenas fazendo reparos em sua camada superficial, sendo essa a maior vantagem do pavimento duradouro (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010). Os pavimentos convencionais, em contrapartida, são projetados para uma vida útil de apenas 10 anos a 20 anos (BIANCHI, BRITO, CASTRO, 2008). Se adotarmos esses dados podemos afirmar que em 40 anos uma via asfaltada com pavimento perpétuo terá apenas troca de sua camada de rolamento, mas quando adotamos esse mesmo período para os pavimentos convencionais teremos uma via que sofrerá recomposição de camadas, cerca de quatro vezes o que acarretará em obstrução da via, interrupção de faixas de rolamento, conturbação no trânsito e desconforto para os usuários.

- **Manutenção**

A manutenção e conservação das obras de engenharia civil são partes fundamentais para garantir que as estruturas cumpram o seu período de vida útil sem apresentar ruína. Na pavimentação a conservação e manutenção visa inibir patologias que podem oferecer risco e desconforto para quem trafega, esse serviço pode ser realizado de diversas maneiras. Os pavimentos perpétuos em sua manutenção apenas a camada de rolamento é submetida a esse procedimento, toda a camada superficial é retirada e coloca-se um a nova camada em mistura asfáltica, sendo que a anterior fresada pode ser adicionada para ajudar na estabilidade da estrutura (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010). No pavimento semi-rígido essa manutenção pode ser feita retirando e fresando a camada, ou com PMF – Pré misturado a frio, e em pior situação são aplicados sobre o pavimento já existente deixando a via desnivelada (BERNUCCI et al. 2008). Por ser um pavimento com menor vida útil e mais suscetível a patologias, os pavimentos convencionais, requerem maior manutenção ao longo do tempo, ao contrário do pavimento perpétuo que para ganhar esse título deve apresentar, segundo a APA, no mínimo 13 anos de intervalo para receber a manutenção (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010).

- **Tempo de execução**

O tempo de execução de pavimentos depende muito das características da mistura, para pavimentos flexíveis os de usinagem à frio tem uma aplicação mais rápida quando comparado aos de usinagem à quente (BERNUCCI et al. 2008), assim como quando comparados com os pavimentos duradouros estes são mais demorados. A execução das três camadas do pavimento perpétuo é mais demorada e mais especializada do que de pavimentos convencionais, justamente por causa do número maior de camada e a compactação adequada de cada uma, pode-se dizer que cada trabalho executado no pavimento convencional é repetido três vezes para o perpétuo. (NEWCOMB, WILLIS, TIMM, 2010)

6.4 ANÁLISE FINANCEIRA

Este capítulo exhibe as comparações financeiras para concepção e manutenção das estruturas finais de pavimento semi-rígido e de perpétuo.

Na Tabela 6.7 são apresentados os custos de concepção de ambos os pavimentos e na Tabela 6.8 apresenta-se os preços totais de manutenção para um período de 13 anos:

Tabela 6.8 – Preço Total por m² da Concepção do pavimento

Preço total por m ² de concepção do pavimento			
Estrutura	Preço Total por m ² (R\$/m ²)	Área(m ²)	Preço Total
Pavimento semi-rígido	R\$ 208,16	163.100,00	R\$ 33.950.896,00 € 9.175.917,84
Pavimento perpétuo	R\$ 328,50	163.100,00	R\$ 57.578.350,00 € 14.480.635,14

Conversão realizada em 03/10/2017: <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>

Com os resultados obtidos na análise de concepção dos projetos podemos identificar que o pavimento perpétuo tem um custo de implantação 58% maior que o custo para a implantação de um pavimento semi-rígido. Este custo de implantação superior é justificado pelo fato de que parte dos materiais que compõe o pavimento perpétuo não serem utilizados comercialmente no Brasil, o que encarece sua produção e conseqüentemente diminui sua utilização e desenvolvimento.

A Tabela 6.9, apresenta um comparativo para os custos de manutenção dos pavimentos estudados, para o período de 13 anos avaliados nesta comparação.

Tabela 6.9–Preço Total para manutenção das estruturas

Pavimento Semi-Rígido	Áreas m²	Preço Total por m² (R\$/m²)	Preço Total (R\$)
F4R4+R3	12.880,00	R\$ 73,15	R\$ 942.108,89
REC	0,00	0,00	R\$ -
RL	1.404,20	R\$ 54,94	R\$ 77.143,24
RP	3.759,00	R\$ 204,89	R\$ 770.173,99
F4R4	107.800,00	R\$ 44,43	R\$ 4.789.338,40
Gap Graded	205.520,00	R\$ 23,67	R\$ 4.865.398,27
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO (REAIS)			R\$ 11.444.162,79
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO (EUROS)			£ 3.093.016,97
Pavimento Perpétuo	Áreas m²	Preço Total por m² (R\$/m²)	Preço Total (R\$)
F5S5	163.100,00	R\$ 64,68	R\$ 10.549.144,90
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO (REAIS)			R\$ 10.549.144,90
CUSTO TOTAL DE MANUTENÇÃO (EUROS)			£ 2.851.120,24

Conversão realizada em 03/10/2017: <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>

As composições dos custos de todas as soluções adotadas estão presentes na TPU – Tabela de Preços Unitários, do DER/SP, com data base de dezembro de 2016. O custo para a camada de SMA, foi retirado da Tabela de Custos da secretaria municipal de Serviços e Obras do município de São Paulo, com data base de janeiro de 2017. Todas as referências destas tabelas estão referenciadas nesta dissertação, para posteriores consultas.

Com as informações apresentadas na Tabela 6.9, verifica-se que o custo de manutenção de um pavimento perpétuo é inferior à de um pavimento semi-rígido. Na comparação do custo para ambas estruturas no período analisado de 13 anos apresenta-se uma economia de 8,0% nos custos de manutenção. Se prolongarmos estes custos para o período de vida útil de 30 anos segundo o planejamento de manutenção periódica do pavimento semi-rígido, ao final dos 30 anos apresenta-se uma economia total de R\$ 2.685.053,67 (reais) ou £ 725.690,18 (euros) em manutenções.

Agora se comparados ambos os pavimentos para o período final de 40 anos de projeto, teremos a reconstrução do pavimento semi-rígido que estará estruturalmente esgotado. Com isso os custos finais de Concepção e manutenção de ambos os projetos serão:

Custo total por Estrutura: Período de Projeto 40 anos		
CUSTOS	Pavimento Perpétuo	Pavimento Convencional
concepção	R\$ 57 578 350,00 14 480 635,14 €	R\$ 33 950 896,00 9 175 917,84 €
Manutenção	R\$ 31 647 434,70 8 553 360,72 €	R\$ 34 332 488,37 9 279 050,91 €
Reconstrução	- -	R\$ 33 950 896,00 9 175 917,84 €
TOTAL (T_{projeto}= 40 anos)	R\$ 89 225 784,70 23 033 995,86 €	R\$ 102 234 280,37 27 630 886,59 €

Com os resultados das comparações das estruturas dos projetos para um período de 40 anos, podemos perceber que o pavimento perpétuo possui um custo de concepção e manutenção 15 % menor que um pavimento semi-rígido.

Além dos custos de concepção e manutenção vale destacar que a utilização de pavimentos perpétuos leva também a uma diminuição de custos de usuários, combustível, tempos de viagem, custos de fretes e etc, devido a sua menor demanda de impedimentos das rodovias para manutenção.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi realizado um comparativo entre a estrutura de um pavimento semi-rígido, dimensionado para um período de vida útil de 10 anos, com a estrutura de Pavimento Perpétuo, projetado para um período de vida útil de 40 anos. Para ambos os projetos foi criado um plano de manutenção periódica e gerenciamento.

Esta pesquisa foi realizada com base no projeto de duplicação de uma rodovia localizada na região central do Estado de São Paulo, no qual o DER/SP, portador dos direitos autorais deste projeto, não autorizou a real localização deste projeto

O dimensionamento do pavimento semi-rígido foi realizado utilizando os métodos de dimensionamento do DER/SP, empregado no Estado de São Paulo. Para o dimensionamento do Pavimento Perpétuo foi utilizado o método SHELL, empregado em Portugal. A utilização do método da Shell, se deu a fato dos métodos utilizados no Brasil, tais como o DER/SP ou DNIT, não possuírem parâmetros que considerem a contribuição estrutural das camadas de alto módulo que compõe o pavimento perpétuo. Os materiais utilizados para o dimensionamento têm como base a revisão bibliográfica apresentada nesta dissertação, o que resultou em duas estruturas de pavimento com espessuras e materiais distintos.

Para analisar a fadiga nas camadas betuminosas e a deformação permanente no subleito dos pavimentos foi utilizado o programa de análise estrutural de pavimentos ALIZE-LCPC, para o pavimento perpétuo, e o software ELSYM5 para a análise do pavimento semi-rígido.

Com os resultados obtidos pelos programas foram dimensionadas as estruturas finais para ambos os dimensionamentos. O plano de Manutenção para Pavimento semi-rígido foi determinado com o auxílio do software HDM, para um período de vida útil de 13 anos. O plano de manutenção do pavimento perpétuo foi elaborado com base na bibliografia apresentada nesta dissertação. A definição de um período de análise de 13 anos se deve ao fato da APA – *Asphalt Pavement Alliance*, preconizar que para que uma estrutura de um pavimento seja reconhecida como perpétuo, o mesmo deverá sofrer apenas

manutenções superficiais em um período mínimo de 13 anos. Com essa premissa foi adotado o período de análise destes pavimentos, para que se conseguisse comparar os custos desprendidos para a manutenção de ambos os pavimentos.

De posse dos planos de manutenção de ambas as estruturas de pavimentos estudadas para um período de vida útil de 13 anos, tornou possível uma comparação financeira de execução e manutenção de ambos os pavimentos.

O resultado das comparações dos custos totais desprendidos para a execução do pavimento perpétuo se mostrou 58% superior à de um pavimento semi-rígido. Os custos de manutenção, no entanto, ficaram 8,0% inferiores à de um pavimento semi-rígido. Para a avaliação final de ambas as estruturas para o período de 40 anos chegou-se ao custo total para o pavimento perpétuo considerando execução e manutenção cerca de 20% menor que o pavimento semi-rígido.

Portanto pode-se concluir que a utilização de pavimentos perpétuos para rodovias de tráfego pesado é viável financeiramente no Brasil, apesar de ter um custo de concepção superior ao pavimento semi-rígido, o investimento se justifica quando analisado para o período de projeto proposto.

Cabe ainda destacar que os materiais que compõem o pavimento perpétuo, como por exemplo o EME, ainda não são utilizados com frequência no Brasil, o que encarece muito sua produção.

Se tomarmos como base a mistura SMA que em 2008 seu custo de produção era de R\$870,00 o m³, 45% maior que o custo de um betão betuminoso modificado por polímero, (DER/SP, 2008). Atualmente com a maior utilização dessa mistura, desenvolvimento de novas técnicas de produção e maior aplicabilidade em projetos, a diferença de preço entre essas duas misturas caiu para 22% de diferença entre as misturas. Com isso é possível dizer que, de acordo com o desenvolvimento e utilização de novas misturas, existe uma tendência de diminuição de seus custos de produção o que poderá tornar esse tipo de estrutura mais vantajosa financeiramente.

As vantagens da utilização de pavimentos perpétuos devem ser destacadas, pois sua utilização pode influenciar na diminuição dos tempos de interdição das rodovias, o que diminui os prejuízos gerados pelo maior tempo de viagem como: consumo de combustível, de pneus, graxas e lubrificantes, peças de reposição, tempos de viagens, etc., custos que são subjetivos e não são mensurados para a análise financeira do pavimento.

7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nesta dissertação foram estudadas misturas betuminosas ainda pouco empregadas no Brasil, assim recomenda-se a execução de trechos experimentais para estudo afim de verificar os seus comportamentos em campo.

Um estudo de aplicação em trechos experimentais de pavimentos perpétuos nas marginais Tietê e Pinheiros, afim de avaliar como a diminuição de intervenções nessas vias, poderia se justificar tecnicamente com a maior durabilidade da via além da diminuição nos congestionamentos, além da avaliação dos custos envolvidos tanto na execução quanto os gerados pelos menores tempos de interrupção no tráfego destas vias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE TRANSPORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. 05/2016: **Serviços correspondentes às funções de conservação**. Anexo 6 ed. São Paulo: 2016. 99 p. Disponível em:

<<http://www.artesp.sp.gov.br/legislacao-portarias.html>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo:Oficinade Textos,2007.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira. SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504f. Edição ano 2008.

BIANCHI, Flavia Regina; BRITO, Isis Raquel Tacla; CASTRO, Veronica Amanda Brombley. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. São Paulo: Associação de Ensino Superior Unificado do Centro-leste, 2008. 16 slides, color. Disponível em:
<http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/pav_apresentacoes/ISIS_RAQUEL.pdf>. Acesso em: 01 maio 2017.

CAPITÃO, Silvino Dias. **Caracterização mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade**. 2003. 381 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.

CEPSA PORTUGUESA PETRÓLEOS SA (Espanha). **Manual de Pavimentação**. Barcelona: Cepsa, 2007. 174 p. Disponível em: <www.cepsa.com/stfls/CepsaPt/.../Ficheros.../Manual de Pavimentacao.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2017.

CLAESSEN, A.I.M., Edwards, J. E., Summer, P., Hughes, P. (1977). **Asphalt pavement design. The Shell method**. Fourth International Conference on Strutural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias: Relatório Gerencial**. Brasília: Cnt, Sest, Senat, 2015. 420 p. Disponível em: <http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio Geral/PESQUISA_CNT2015_BAIXA.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2017.

CORTÉ, Jean-françois. **Development and Uses of Hard-Grade Asphalt and of High-Modulus Asphalt Mixes in France**. In: HEJL, Frederick D.; BUTTON, Joe W. Transportation Research Circular: Perpetual Bituminous Pavements. 503. ed. Washington: IIB Material And Construction, 2001. p. 12-31.

Disponível em: <TBR.org>. Acesso em: 18 abr. 2017.

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA UFPR. **Transportes B ; Tipos de pavimento**. 2009.

Disponível em: <<http://www.dtt.ufpr/pavimentacao/notas/mod1introducao.pdf>> Acesso em : 02 abril 2017.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **TPU 2016: Tabela de Preços Unitários**. 2016 ed. São Paulo: Der, 2016. 51 p. Disponível em:

<<http://www.der.sp.gov.br/Website/Acessos/Documentos/PreçosUnitarios.aspx>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **IP-DE-P00/001: Projeto de Pavimentação**. A ed. São Paulo: DER/SP, 2006. 53 p. Disponível em: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-P00-001_A.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2017.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **ET-DE-P00/019: Imprimação betuminosa impermeabilizante** A ed. São Paulo: DER/SP, 2005. 14 p. Disponível em:

<ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-019_A.pdf> Acesso em: 22 out. 2017.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **ET-DE-P00/020: Imprimação betuminosa ligante**. A ed. São Paulo: DER/SP, 2005. 19 p. Disponível em: < ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-020_A.pdf> Acesso em: 22 out. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE. **IPR 714: Manual de Pavimentos Rígidos**. 2ª Edição ed. Rio de Janeiro: Ipr. Publi., 2005. 234 p. Disponível em:

<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/jalmeida/estradas/material-didatico/manual_de_pavimentos_rigidos.pdf/view>. Acesso em: 15 fev. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE. **IPR 745: Manual de gerência de pavimentos**. 1ª edição ed. Rio de Janeiro: Dnit, 2011. 189 p. Disponível em:

<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/745_manual_de_gerencia_de_pavimentos.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003 TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia**. 1 ed. Rio de Janeiro: Dnit, 2003. 12 p.

Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/terminologia-ter/dnit005_2003_ter.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. 165/2013 - **EM: Emulsão asfáltica para a pavimentação - Especificação de Material**. Rio de Janeiro: Dnit, 2013. 5 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dnit165_2013_em.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. – **Pavimentos Flexíveis: Imprimação / Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: Dnit, 2009. 7 p. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/normas/PAV%20Flexiveis%20-%20Imprimacao.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2017.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Manual de Pavimentação. Publicação IPR. 719**. Departamento Nacional de Infraestruturas dos Transportes, Rio de Janeiro, 1996.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR - 719: Manual de Pavimentação**. 3ª Edição ed. Rio de Janeiro: Brasil, 2006. 278 p. Disponível em: <https://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2017.

GARDETE, Dinis Correia. **Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente**. 2006. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Rodoviária, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra - Portugal, 2006. Disponível em: <[https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/140/1/Tese_Mestrado_Dinis_Gardete\[1\].pdf](https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/140/1/Tese_Mestrado_Dinis_Gardete[1].pdf)>. Acesso em: 27 fev. 2017.

GARG, Sanjay. **Perpetual flexible pavements: pavements of future**. 2012. University of Roorkee, Civil Engineering Department, Delhi, India. Disponível em: <https://www.academia.edu/26285714/FLEXIBLE_PAVEMENT_DESIGN_IN_INDIA_PAST_PRESENT_AND_FUTURE>. Acesso em: 25 mar. 2017.

GOOGLE INC. (São Paulo). Google Maps (Org.). Google Maps. 2017. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/place/São+Paulo,+SP,+Brasil/>>. Acesso em: 07 jan. 2017.

InIR - INSTITUTO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIÁRIAS IP. **Directivas para a concepção de pavimentos: critérios de dimensionamento**. 1 ed. Portugal: CAeMD, 2015. 18 p. Disponível em: <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao_Tcnica/DiretivasConstrucaoPavimentosCritériosDimensionamento.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2017.

GRILLO, Alexandre Henrique Hahn Franco. **Dimensionamento de um pavimento utilizando a técnica de pavimentação perpétua para um trecho da rodovia BR-282/SC**. 2015. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/133806/TCC - Alexandre Grillo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

ITECH, Lcpc -. **ALIZE-LCPC Software**. 3. ed. França: Itech, 2011. 86 p.

JACOB, Ângelo Manuel. **Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários**: Porto - Portugal: Isep - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016. 31 slides, color.

JACOB, Ângelo Manuel. **Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários**: Porto - Portugal: Isep - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016. 25 slides, color.

KÖPPEN, W., 1931. Grundriss der Klimakunde. Walter D E Guyter& Co. Berlin. 390p

NEWCOMB, David E. et al (Org.). **Perpetual Asphalt Pavements**. 2010. Disponível em:<http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/Perpetual_Pavement_Synthesis.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2017.

MEIRELES, Nayrana. **Cratera imensa em via no Japão é consertada em uma semana**. Gpi. Piauí, p. 1-1. 16 nov. 2015. Disponível em: <<http://www.gp1.com.br/noticias/cratera-imensa-em-via-no-japao-e-consertada-em-uma-semana-404463.html>>. Acesso em: 14 abr. 2016.

NAKAMURA, Juliana. Pavimentação asfáltica: Os tipos de revestimentos, o maquinário necessário e os cuidados na contratação, projeto e execução. **Infraestrutura Urbana**, São Paulo, v. 1, n. 16, p.1-5, dez. 2011. Semestral. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/artigo260588-1.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

NEVES FILHO, C. D., 2004, **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-Borracha**. 67 f. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NEWCOMB, David E. et al (Org.). **Perpetual Bituminous Pavements**: TRB Committee on General Issues in Asphalt Technology (A2D05). 2001. TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR Number 503 December 2001. Disponível em: <onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/circular_503.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2017.

PAVEMENT INTERACTIVE, "Perpetual Pavements" 16 August 2007.

<http://www.pavementinteractive.org><<http://www.pavementinteractive.org/article/perpetual-pavements/>> 19 November 2016.

NEWCOMB, David E. et al (Org.). PerpetualAsphaltPavements. 2010. Disponível em:<http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/Perpetual_Pavement_Synthesis.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2017.

PEREIRA, Mariana Minitti Leite. **Estudo de mistura asfáltica de módulo elevado para camadas de base de pavimentos**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072013-150454/pt-br.php>>. Acesso em: 25 fev. 2017.

PETROBRAS (Brasil). **Emulsões asfálticas convencionais**. BR. 2014. . Disponível em: <<http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-pavimentacao/emulsoes-asfalticas-convencionais>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

RAMOS, Fábio Rangel Queiroz. **Aplicação de sma (stone matrix asphalt) em pavimentos aeroportuários - estudo de caso: aeroporto de Aracaju-SE**. 2015. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Núcleo de Geotecnia Nugeo, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/fabio-rangel.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2017.

RIBEIRO, Raquel Maria Carvalho de Araujo. **Reutilização de misturas betuminosas fresadas em pavimentos rodoviários**. 2014. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.22/7153>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

SÃO PAULO. Marcos Rodrigues Penido. Secretaria Municipal de Serviços e Obras. **Tabelas de Custos: Infraestrutura Urbana**. 2017. Composições de custos. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas_de_custos/index.php?p=232211#Tabela_de_custos>. Acesso em: 15 maio 2017.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Logística e Transportes (Org.). **Ações de Governo - Ações de Governo: Desenvolvimento econômico e fluidez**. 2016. Disponível em: <<http://saopaulo.sp.gov.br/acoesdegoverno/logistica-e-transportes/#rodoanel>>. Acesso em: 07 jan. 2017.

SEBRAE, 2015, Sp. **A importância de mão de obra qualificada**. Sp: Sebrae Nacional, 2015. 1 p. Disponível em:< <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/a-importancia-da-mao-de-obra-qualificada,3b03438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

SILVA, Emanuel Souza. **Relatório de Estágio Câmara Municipal do Porto - DMOIP: Aperfeiçoamento dos Métodos Utilizados, para a Orçamentação e Planeamento de Obras Rodoviárias.** 2015. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ramos de Infraestruturas, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto - Portugal, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.22/7123>>. Acesso em: 03 fev. 2017.

SILVA, Patrícia Barbosa da. **Estudo em laboratórios e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8s.** 2005. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

TRB COMMITTEE ON GENERAL ISSUES IN ASPHALT TECHNOLOGY (A2D05), 503., 2001, Washington, EUA. **Perpetual Bituminous Pavements: Concepts of Perpetual Pavements.** Washington, Eua: Trb.org, 2001. 117 p. Disponível em:

<[http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB circular onPerpetualPavements_503_974913343_112006174022\(1\).pdf](http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB%20circular%20onPerpetualPavements_503_974913343_112006174022(1).pdf)>. Acesso em: 26 mar. 2017.

VETEC (São Paulo). Departamento de Estradas e Rodagem São Paulo (Org.). **MC-SP0000255-156.180-000-P09/003: Estudo técnico e econômico de alternativas.** São Paulo: Vetec, 2015. 16 p.

VETEC (São Paulo). Departamento de Estradas e Rodagem São Paulo (Org.). **MC-SP0000255-156.180-000-P09/002: Memória de cálculo do dimensionamento do pavimento.** São Paulo: Vetec, 2015. 63 p.

SEVERI, Andréia (São Paulo). **Cronograma Conservação Especial - Trecho Jaú - Igarapu: MEMÓRIA DE CÁLCULO DA MANUTENÇÃO DO PAVIMENTO.** São Paulo:, 2017. 3 p.

VILLACORTA, Fabricio Leiva. **Diseno de una estructura de pavimento perpetuo:** caso de estudio de una ruta nacional en Costa Rica. s.d. 15 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, s.d. Disponível em: <<http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/autores/leiva/leiva-05.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2017

VON QUINTUS, Harold L. **Hot-Mix Asphalt Layer Thickness Design for Longer-Life Bituminous Pavements.** In: HEJL, Frederick D.; BUTTON, Joe W. Transportation Research Circular: Perpetual Bituminous pavements. 503. ed. Washington: Iiib Materials And Construction, 2001. p. 66-78. Disponível em: <trb.org>. Acesso em: 18 abr. 2017

ANEXO I - ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA ELSYM5

Pavimento Novo:

Camada	Espessura (cm)
Betão Betumonosos	15
Solo-brita tratado com cimento	15
Solo-brita	15
Subleito (CBR \geq 10%, expansão $<$ 2%)	-

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.300	15.000
2	60000.	.200	15.000
3	2500.	.350	15.000
4	1000.	.400	SEMI-INFINITO

FOUR CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
 PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
 RAO DE CONTATO..... 10.79 CM

	CARGA	DISPOSICAO	
		X (CM)	Y (CM)
, 1		.000	.000
2		28.800	.000
3	176.100	.000	
4	204.900	.000	

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF. (S) - (CM)
 Z= .01 14.99 29.99 45.01
 PONTO(S) X-Y - (CM)
 X= .00 14.40
 Y= .00 .00

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

Z= .01 CAMADA NO. 1
 X= .00 14.40

ANEXO

```

Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX -5.92 -.75
SYY -6.62 -3.50
SZZ -5.62 -.09
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .5255E-03 .3331E-06
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -5.62 -.09
PS 2 -5.92 -.75
PS 3 -6.62 -3.50
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .4991E+00 .1703E+01
PSS2 .1490E+00 .3315E+00
PSS3 .3500E+00 .1372E+01
DESLOCAMENTOS
UX .1473E-02 .8190E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2876E-01 .2809E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.6421E-04 .9218E-05
EYY -.9021E-04 -.9270E-04
EZZ -.5314E-04 .3384E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .3903E-07 .2474E-10
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 -.5314E-04 .3384E-04
PE 2 -.6421E-04 .9218E-05
PE 3 -.9021E-04 -.9270E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .3707E-04 .1265E-03
PSE2 .1107E-04 .2462E-04
PSE3 .2600E-04 .1019E-03

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

Z= 14.99 CAMADA NO. 1
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX -1.01 -1.11
SYY -1.02 -.82
SZZ -2.50 -1.53
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .4676E+00 .6279E-02
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.87 -.82
PS 2 -1.02 -1.11
PS 3 -2.64 -1.53
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .8828E+00 .3563E+00
PSS2 .7529E-01 .1421E+00
PSS3 .8075E+00 .2142E+00
DESLOCAMENTOS
UX .2401E-03 .1645E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2755E-01 .2812E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .1474E-05 -.1141E-04
EYY .8593E-06 -.8524E-06
EZZ -.5415E-04 -.2732E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .3474E-04 .4664E-06

```

EYZ .0000E+00 .0000E+00
 DEF.ESP.PRINCIPAIS
 PE 1 .6452E-05 -.8524E-06
 PE 2 .8593E-06 -.1141E-04
 PE 3 -.5913E-04 -.2732E-04
 DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
 PSE1 .6558E-04 .2647E-04
 PSE2 .5593E-05 .1056E-04
 PSE3 .5999E-04 .1591E-04

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

Z= 29.99 CAMADA NO. 2
 X= .00 14.40
 Y= .00 .00
 TENSOES NORMAIS
 SXX 3.01 3.19
 SYX 4.17 4.49
 SZZ -.28 -.29
 TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY .0000E+00 .0000E+00
 SXZ .6281E-01 .8316E-02
 SYZ .0000E+00 .0000E+00
 TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1 4.17 4.49
 PS 2 3.01 3.19
 PS 3 -.28 -.29
 TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
 PSS1 .2221E+01 .2391E+01
 PSS2 .5762E+00 .6537E+00
 PSS3 .1645E+01 .1738E+01
 DESLOCAMENTOS
 UX -.1060E-02 -.4903E-03
 UY .0000E+00 .0000E+00
 UZ .2714E-01 .2777E-01
 DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
 EXX .3723E-04 .3908E-04
 EYY .6030E-04 .6523E-04
 EZZ -.2852E-04 -.3042E-04
 DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
 EXY .0000E+00 .0000E+00
 EXZ .2512E-05 .3326E-06
 EYZ .0000E+00 .0000E+00
 DEF.ESP.PRINCIPAIS
 PE 1 .6030E-04 .6523E-04
 PE 2 .3726E-04 .3908E-04
 PE 3 -.2854E-04 -.3042E-04
 DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
 PSE1 .8885E-04 .9565E-04
 PSE2 .2305E-04 .2615E-04
 PSE3 .6580E-04 .6950E-04

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

Z= 45.01 CAMADA NO. 4
 X= .00 14.40
 Y= .00 .00
 TENSOES NORMAIS
 SXX -.03 -.03
 SYX -.01 -.01
 SZZ -.17 -.18
 TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY .0000E+00 .0000E+00
 SXZ .2868E-01 .9258E-02
 SYZ .0000E+00 .0000E+00

ANEXO

TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.01 -.01
PS 2 -.03 -.03
PS 3 -.18 -.18
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .8121E-01 .8458E-01
PSS2 .5884E-02 .8194E-02
PSS3 .7532E-01 .7638E-01
DESLOCAMENTOS
UX -.1683E-02 -.1001E-02
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2555E-01 .2606E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .4229E-04 .4794E-04
EYY .6670E-04 .7167E-04
EZZ -.1527E-03 **-.1644E-03**
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .8029E-04 .2592E-04
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .6670E-04 .7167E-04
PE 2 .5023E-04 .4873E-04
PE 3 -.1607E-03 -.1651E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2274E-03 .2368E-03
PSE2 .1647E-04 .2294E-04
PSE3 .2109E-03 .2139E-03

Pavimento Novo:

Camada	Espessura (cm)
Betão Betuminoso	15
Solo-brita tratado com cimento	15
Solo-brita	30
Subleito (CBR \geq 10%, expansão < 2%)	-

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.300	15.000
2	60000.	.200	15.000
3	2500.	.350	30.000
4	1000.	.400	SEMI-INFINITO

FOUR CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
 PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
 RAO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO
 , CARGA X (CM) Y (CM)
 1 .000 .000
 2 28.800 .000
 3 176.100 .000
 4 204.900 .000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
 Z= .01 14.99 29.99 60.01
 PONTO(S) X-Y - (CM)
 X= .00 14.40
 Y= .00 .00

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

Z= .01 CAMADA NO. 1
 X= .00 14.40
 Y= .00 .00
 TENSOES NORMAIS
 SXX -5.81 -.63
 SYX -6.49 -3.34
 SZZ -5.62 -.09
 TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY .0000E+00 .0000E+00
 SXZ .5103E-03 .1631E-05
 SYZ .0000E+00 .0000E+00
 TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1 -5.62 -.09
 PS 2 -5.81 -.63

ANEXO

```

PS 3      -6.49      -3.34
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .4317E+00 .1625E+01
PSS2 .9562E-01 .2672E+00
PSS3 .3360E+00 .1357E+01
DESLOCAMENTOS
UX      .1419E-02 .7956E-03
UY      .0000E+00 .0000E+00
UZ      .2777E-01 .2710E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX     -.6232E-04 .1154E-04
EYY     -.8728E-04 -.8930E-04
EZZ     -.5521E-04 .3139E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY     .0000E+00 .0000E+00
EXZ     .3791E-07 .1212E-09
EYZ     .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1    -.5521E-04 .3139E-04
PE 2    -.6232E-04 .1154E-04
PE 3    -.8728E-04 -.8930E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1    .3207E-04 .1207E-03
PSE2    .7103E-05 .1985E-04
PSE3    .2496E-04 .1008E-03

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

Z= 14.99 CAMADA NO. 1
X=      .00      14.40
Y=      .00      .00
TENSOES NORMAIS
SXX     -1.01     -1.11
SYY     -1.03     -.83
SZZ     -2.52     -1.56
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY     .0000E+00 .0000E+00
SXZ     .4564E+00 .7729E-02
SYZ     .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1    -.88      -.83
PS 2    -1.03     -1.11
PS 3    -2.65     -1.56
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1    .8828E+00 .3649E+00
PSS2    .7227E-01 .1415E+00
PSS3    .8105E+00 .2233E+00
DESLOCAMENTOS
UX      .2564E-03 .1820E-03
UY      .0000E+00 .0000E+00
UZ      .2654E-01 .2710E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX     .1548E-05 -.1127E-04
EYY     .8997E-06 -.7549E-06
EZZ     -.5459E-04 -.2785E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY     .0000E+00 .0000E+00
EXZ     .3390E-04 .5742E-06
EYZ     .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1    .6269E-05 -.7549E-06
PE 2    .8997E-06 -.1127E-04
PE 3    -.5931E-04 -.2786E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1    .6558E-04 .2710E-04
PSE2    .5369E-05 .1051E-04
PSE3    .6021E-04 .1659E-04

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

Z= 29.99 CAMADA NO. 2
X=      .00      14.40
Y=      .00      .00
TENSOES NORMAIS
SXX      2.83      2.97
SYY      3.92      4.22
SZZ      -.31      -.33
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY      .0000E+00 .0000E+00
SXZ      .6771E-01 .1071E-01
SYZ      .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      3.92      4.22
PS 2      2.83      2.97
PS 3      -.32      -.33
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1     .2118E+01 .2276E+01
PSS2     .5454E+00 .6218E+00
PSS3     .1573E+01 .1654E+01
DESLOCAMENTOS
UX      -.9670E-03 -.4317E-03
UY      .0000E+00 .0000E+00
UZ      .2613E-01 .2676E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX     .3512E-04 .3663E-04
EYY     .5696E-04 .6150E-04
EZZ     -.2774E-04 -.2953E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY     .0000E+00 .0000E+00
EXZ     .2709E-05 .4285E-06
EYZ     .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1     .5696E-04 .6150E-04
PE 2     .3515E-04 .3663E-04
PE 3     -.2777E-04 -.2953E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1     .8473E-04 .9104E-04
PSE2     .2181E-04 .2487E-04
PSE3     .6292E-04 .6616E-04

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

Z= 60.01 CAMADA NO. 4
X=      .00      14.40
Y=      .00      .00
TENSOES NORMAIS
SXX      -.02      -.02
SYY      -.01      -.01
SZZ      -.14      -.14
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY      .0000E+00 .0000E+00
SXZ      .2394E-01 .1070E-01
SYZ      .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1      -.01      -.01
PS 2      -.02      -.02
PS 3      -.14      -.14
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1     .6645E-01 .6817E-01
PSS2     .5107E-02 .6923E-02
PSS3     .6134E-01 .6125E-01
DESLOCAMENTOS
UX      -.1845E-02 -.1287E-02
UY      .0000E+00 .0000E+00
UZ      .2330E-01 .2372E-01

```

ANEXO

```
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
  EXX .3440E-04 .3801E-04
  EYY .5551E-04 .5872E-04
EZZ -.1237E-03 -.1309E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
  EXY .0000E+00 .0000E+00
  EXZ .6702E-04 .2996E-04
  EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
  PE 1 .5551E-04 .5872E-04
  PE 2 .4121E-04 .3933E-04
  PE 3 -.1305E-03 -.1322E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
  PSE1 .1861E-03 .1909E-03
  PSE2 .1430E-04 .1938E-04
  PSE3 .1718E-03 .1715E-03
```

Pavimento Novo:

Camada	Espessura (cm)
Betão Betuminoso	15
Solo-brita tratado com cimento	20
Solo-brita	20
Subleito (CBR \geq 10%, expansão < 2%)	-

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.300	15.000
2	60000.	.200	20.000
3	2500.	.350	20.000
4	1000.	.400	SEMI-INFINITO

FOUR CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
 PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
 RAO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO
 , CARGA X (CM) Y (CM)
 1 .000 .000
 2 28.800 .000
 3 176.100 .000
 4 204.900 .000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF.(S) - (CM)
 Z= .01 14.99 34.99 55.01
 PONTO(S) X-Y - (CM)
 X= .00 14.40
 Y= .00 .00

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

Z= .01 CAMADA NO. 1
 X= .00 14.40
 Y= .00 .00
 TENSOES NORMAIS
 SXX -5.44 -.18
 SYX -6.03 -2.82
 SZZ -5.62 -.09
 TENSOES DE CISALHAMENTO
 SXY .0000E+00 .0000E+00
 SXZ .3945E-03 .7497E-05
 SYZ .0000E+00 .0000E+00
 TENSOES PRINCIPAIS
 PS 1 -5.44 -.09
 PS 2 -5.62 -.18

ANEXO

```

PS 3      -6.03      -2.82
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .2951E+00 .1366E+01
PSS2 .9298E-01 .4438E-01
PSS3 .2022E+00 .1322E+01
DESLOCAMENTOS
UX      .1368E-02 .8522E-03
UY      .0000E+00 .0000E+00
UZ      .2631E-01 .2546E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX     -.5547E-04 .1984E-04
EYY     -.7740E-04 -.7834E-04
EZZ     -.6238E-04 .2314E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY     .0000E+00 .0000E+00
EXZ     .2931E-07 .5569E-09
EYZ     .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1    -.5547E-04 .2314E-04
PE 2    -.6238E-04 .1984E-04
PE 3    -.7740E-04 -.7834E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1    .2192E-04 .1015E-03
PSE2    .6907E-05 .3297E-05
PSE3    .1502E-04 .9818E-04

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

Z= 14.99 CAMADA NO. 1
X=      .00      14.40
Y=      .00      .00
TENSOES NORMAIS
SXX     -1.16     -1.28
SYY     -1.20     -1.01
SZZ     -2.68     -1.72
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY     .0000E+00 .0000E+00
SXZ     .3955E+00 .1325E-01
SYZ     .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1    -1.07     -1.01
PS 2    -1.20     -1.28
PS 3    -2.78     -1.72
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1    .8546E+00 .3578E+00
PSS2    .6559E-01 .1391E+00
PSS3    .7890E+00 .2187E+00
DESLOCAMENTOS
UX      .3592E-03 .2559E-03
UY      .0000E+00 .0000E+00
UZ      .2502E-01 .2540E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX     -.2939E-07 -.1333E-04
EYY     -.1298E-05 -.2981E-05
EZZ     -.5630E-04 -.2954E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY     .0000E+00 .0000E+00
EXZ     .2938E-04 .9842E-06
EYZ     .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1    .3574E-05 -.2981E-05
PE 2    -.1298E-05 -.1331E-04
PE 3    -.5991E-04 -.2956E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1    .6348E-04 .2658E-04
PSE2    .4873E-05 .1033E-04
PSE3    .5861E-04 .1624E-04

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

Z= 34.99 CAMADA NO. 2
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX 2.32 2.53
SYY 3.22 3.48
SZZ -.22 -.23
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .5187E-01 .9904E-02
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 3.22 3.48
PS 2 2.32 2.53
PS 3 -.22 -.23
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .1724E+01 .1855E+01
PSS2 .4519E+00 .4736E+00
PSS3 .1272E+01 .1381E+01
DESLOCAMENTOS
UX -.9947E-03 -.5409E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2454E-01 .2499E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .2866E-04 .3134E-04
EYY .4675E-04 .5028E-04
EZZ -.2217E-04 -.2391E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .2075E-05 .3962E-06
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .4675E-04 .5028E-04
PE 2 .2868E-04 .3134E-04
PE 3 -.2219E-04 -.2391E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .6894E-04 .7419E-04
PSE2 .1808E-04 .1894E-04
PSE3 .5087E-04 .5525E-04

```

* * * SISTEMA ELASTICO 1 -

```

Z= 55.01 CAMADA NO. 4
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.03 -.02
SYY -.01 -.01
SZZ -.13 -.13
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .2222E-01 .9833E-02
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.01 -.01
PS 2 -.02 -.02
PS 3 -.13 -.13
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .6091E-01 .6216E-01
PSS2 .4546E-02 .6206E-02
PSS3 .5636E-01 .5595E-01
DESLOCAMENTOS
UX -.1622E-02 -.1119E-02
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2293E-01 .2327E-01

```

ANEXO

DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .3084E-04 .3411E-04
EYY .4996E-04 .5270E-04
EZZ -.1142E-03 -.1201E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .6223E-04 .2753E-04
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .4996E-04 .5270E-04
PE 2 .3723E-04 .3533E-04
PE 3 -.1206E-03 -.1213E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .1705E-03 .1740E-03
PSE2 .1273E-04 .1738E-04
PSE3 .1578E-03 .1567E-03

ANEXO II - MEMORIAL DE CÁLCULO PAVIMENTO PERPÉTUO

Dados de entrada dos Betumes utilizados para as misturas das camadas dos pavimentos:

Camadas misturas asfálticas			
Dados de misturas betuminosas	Camada de desgaste	Camada de Intermediária	Camada de base
Designação	SMA /8s AMP 6,5% SBS	EME - Assis CAP 20	IBB15 - Grillo, 2015 CAP 50/70
PEN ₂₅	55	15	60
TAB	59 °C	79 °C	90 °C
PEN _{25r}	35,75	9,750	39,000
TAB _r	58 °C	73 °C	57 °C
IPEN _r	-0,108	-0,03	-0,122
P _{bet}	7,50%	5,8%	7,50%
V _v	4,00%	3,60%	5,00%
V	60 Km/h		

Módulos de deformabilidade de alto módulo

Alto Módulo	Camada de desgaste	Camada Intermediária	Camada de base
	SMA /8s AMP 6,5% SBS	EME - Assis	IBB15 GRILLO,2015
t_c	0,017	0,017	0,017
T	32,0 °C	30,5 °C	29,5 °C
Em	6350 MPa	11000 MPa	4900 MPa

Dados para as extensões	
N80	Ks
4,65E+08	1,80E-02

Determinação das extensões			
	Camada de desgaste	Camada de regularização	Camada de base
$\epsilon_{t(N80)adm}$	83,49E-06 μm	68,50E-06 μm	85,98E-06 μm
$\epsilon_{v(N80)adm}$	122,59E-06 μm		

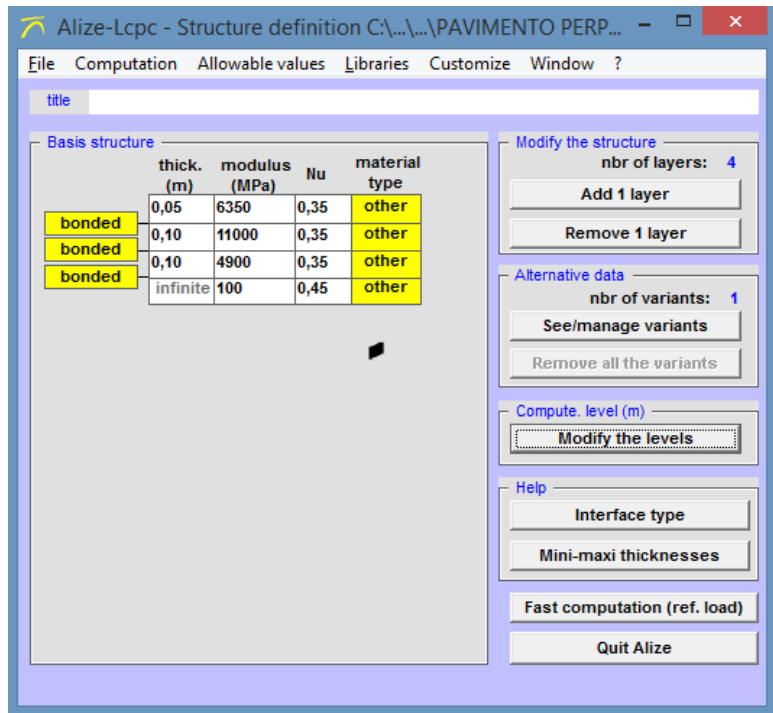


Figura I: Dados de entrada ALIZE: Estrutura Pavimento Perpétuo

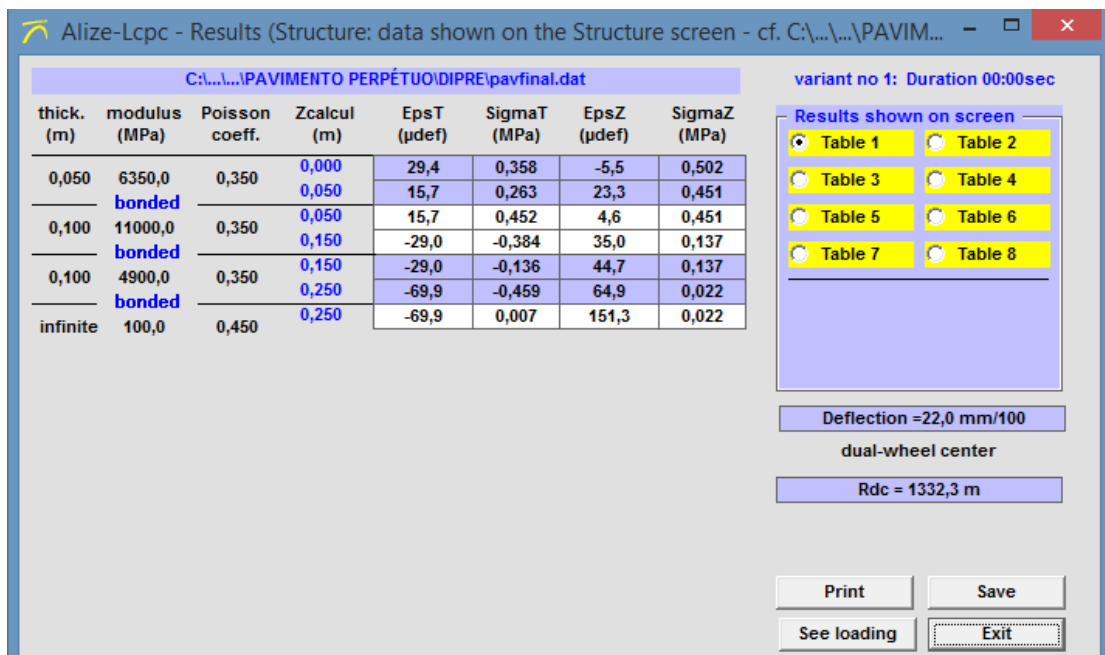


Figura II: Dados de saída do software ALIZE: Extensões calculadas

ANEXO III - MEMORIAL DE CÁLCULO RESTAURAÇÃO DOS PAVIMENTOS

SOLUÇÕES ADOTADAS**Pistas Principais e Faixas Adicionais**

- * RL
Composição RP: 5 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
- * RP
Composição RP: 5 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
5 cm Binder Faixa II
Imprimação Ligante
Imprimação Impermeabilizante
15 cm BGS
20 cm Bica Corrida ou Solo CBR > 20%
- * F4R4: Fresagem de 4 cm + Recomposição com 4 cm de CBUQ
Composição F4R4: 4 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
4 cm fresagem
- * F4R4+R3: Fresagem de 4 cm + Recomposição com 4 cm de CBUQ + 3 cm Reforço em CBUQ
Composição F4R4: 3 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
4 cm CBUQ Faixa II (binder)
Imprimação Ligante
4 cm fresagem
- * GAP: Gap Graded 2cm
- * REC: Reciclagem total (base+capa) com adição de cimento
Composição: 5 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
5 cm Binder Faixa II
Imprimação Ligante
Imprimação Impermeabilizante
20 cm Camada Reciclada
- * REC: Reconstrução (alternativa à reciclagem)
Composição: 5 cm CBUQ Faixa III
Imprimação Ligante
5 cm Binder Faixa II
Imprimação Ligante
Imprimação Impermeabilizante
15 cm BGS
20 cm Bica Corrida ou Solo CBR > 20%

LEGENDA

RL	Reparos Localizados Superficiais
RP	Reparos Profundos
F4R4	Fresagem de 4 cm e Recomposição de 4 cm
F4R4	Fresagem de 4 cm + Recomposição com 4 cm de CBUQ + 3 cm Reforço em CBUQ
GAP	Gap Graded
MICRO	Microrrevestimento asfáltico a frio com polímeros (1,5)
REC	Reciclagem total (base +capa) com adição de cimento ou reconstrução total
PMQ3	Pré Misturado a Quente 3 cm

ÍNDICES DE QUALIDADE (EDITAL)

		Até 10o Ano		A partir 11o Ano
IRI	≤ 2,69	QI	≤ 35	≤ 2,49
IGG	≤ 30			QI
Panelas	0%			≤ 32
FC-3	≤ 2%			≤ 30
FC-3	≤ 15%			0%
F	≤ 7 mm			≤ 2%
Desnivel Pista/Acostamento	≤ 12 mm			≤ 15%
Ruído	75 dBA			≤ 7 mm
Dc	≤ Dadm*			≤ 12 mm

* tráfego projetado sempre para o próximo ciclo

OBSERVAÇÕES

Os Reparos Profundos e Reparos Localizados receberão uma camada de GAP após sua conclusão, portanto a área dos mesmos se sobrepõe.

Acostamentos

- * PMQ3: Pré Misturado a Quente 3 cm
Composição: 3 cm PMQ
Imprimação Ligante

- * PMQ5: Pré Misturado a Quente 5 cm
Composição: 5 cm PMQ
Imprimação Ligante

- * REC: Reciclagem total (base+capa) com adição de cimento
Composição: 3 cm PMQ
Imprimação Ligante
Imprimação Impermeabilizante
20 cm Camada Reciclada

- * REC: Reconstrução (alternativa à reciclagem)
Composição: 3 cm PMQ
Imprimação Ligante
Imprimação Impermeabilizante
20 cm Bica Corrida ou Solo CBR > 20%

- * MICRO: Microrrevestimento asfáltico a frio com polímeros (1,5)

Cronograma de manutenção do pavimento flexível - período de vida útil de 40 anos

Rodovia/Trecho	Segmento Homogêneo	Início (km)	Fim (km)	Extensão (km)	Ano											
					1	2	3			4	5	6	7	8		9
Estudo de caso	1	156,30	159,20	2,90			RL + RP + F4R4						RL + RP + F4R4 + GAP			
	2	159,20	161,80	2,60			RL + RP + F4R4						RL + RP + F4R4 + GAP			
	3	161,80	165,80	4,00			RL + RP + F4R4 + R3						RL + RP + F4R4 + GAP			
	4	165,80	168,00	2,20			RL + RP + F4R4						RL + RP + F4R4 + GAP			
	5	168,00	171,20	3,20			RL + RP + F4R4 + R3						RL + RP + F4R4 + GAP			
	6	171,20	174,40	3,20			RL + RP + F4R4						RL + RP + F4R4 + GAP			
	7	174,40	176,40	2,00			RL + RP + F4R4 + R3						RL + RP + F4R4 + GAP			
	8	176,40	179,60	3,20			RL + RP + F4R4								RL + RP + F4R4 + GAP	

Rodovia/Trecho	Segmento Homogêneo	Início (km)	Fim (km)	Extensão (km)	Ano														
					11	12	13	14			15			16	17	18	19	20	
Estudo de caso	1	156,30	159,20	2,90				RL + RP + F4R4 + GAP										RL + RP + F4R4 + GAP	
	2	159,20	161,80	2,60				RL + RP + F4R4 + GAP										RL + RP + F4R4 + GAP	
	3	161,80	165,80	4,00				RL + RP + F4R4 + GAP										RL + RP + F4R4 + GAP	
	4	165,80	168,00	2,20				RL + RP + F4R4 + GAP										RL + RP + F4R4 + GAP	
	5	168,00	171,20	3,20				RL + RP + F4R4 + GAP										RL + RP + F4R4 + GAP	
	6	171,20	174,40	3,20				RL + RP + F4R4 + GAP										RL + RP + F4R4 + GAP	
	7	174,40	176,40	2,00				RL + RP + F4R4 + GAP										RL + RP + F4R4 + GAP	
	8	176,40	179,60	3,20							RL + RP + F4R4 + GAP								

ANEXO

Rodovia/Trecho	Segmento Homogêneo	Início (km)	Fim (km)	Extensão (km)	Ano										
					21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Estudo de caso	1	156,30	159,20	2,90							RL + RP + F4R4 + GAP				
	2	159,20	161,80	2,60							RL + RP + F4R4 + GAP				
	3	161,80	165,80	4,00							RL + RP + F4R4 + GAP				
	4	165,80	168,00	2,20							RL + RP + F4R4 + GAP				
	5	168,00	171,20	3,20							RL + RP + F4R4 + GAP				
	6	171,20	174,40	3,20							RL + RP + F4R4 + GAP				
	7	174,40	176,40	2,00							RL + RP + F4R4 + GAP				
	8	176,40	179,60	3,20	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		

Rodovia/Trecho	Segmento Homogêneo	Início (km)	Fim (km)	Extensão (km)											
					31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Estudo de caso	1	156,30	159,20	2,90	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		
	2	159,20	161,80	2,60	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		
	3	161,80	165,80	4,00	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		
	4	165,80	168,00	2,20	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		
	5	168,00	171,20	3,20	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		
	6	171,20	174,40	3,20	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		
	7	174,40	176,40	2,00	RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP		
	8	176,40	179,60	3,20		RL + RP + F4R4 + GAP								RL + RP + F4R4 + GAP	

