

Alexandre Henrique Hahn Franco Grillo

**DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO UTILIZANDO A  
TÉCNICA DE PAVIMENTAÇÃO PERPÉTUA PARA UM  
TRECHO DA RODOVIA BR-282/SC**

Trabalho de Conclusão de  
Curso submetido ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina para  
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.  
Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Liseane  
Padilha Thives

Florianópolis  
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Grillo, Alexandre Henrique Hahn Franco

Dimensionamento de um pavimento utilizando a técnica de  
pavimentação perpétua para um trecho da rodovia BR-282/SC /  
Alexandre Henrique Hahn Franco Grillo ; orientadora,  
Liseane Padilha Thives - Florianópolis, SC, 2015.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Pavimentação perpétua. I.  
Thives, Liseane Padilha. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Alexandre Henrique Hahn Franco Grillo

**DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO UTILIZANDO A  
TÉCNICA DE PAVIMENTAÇÃO PERPÉTUA PARA UM  
TRECHO DA RODOVIA BR-282/SC**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil.

Florianópolis, 10 de julho de 2015.

Prof. Luis Alberto Gomez, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

  
Prof.<sup>a</sup> Liseane Padilha Thives, Dr.<sup>a</sup>  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng.<sup>a</sup> Civil Cristine Yohana Ribas  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado a toda minha  
família.



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Margareth e Herculano, por terem me dado todas as oportunidades, condições e incentivos para estudar desde a minha infância. Sem essa atenção não chegaria onde estou hoje.

À minha namorada Mariana, que sempre me apoiou e incentivou muito, mesmo durante os finais de semana que deixamos de estar juntos para que o trabalho fosse concluído, e também por todo o carinho e amor para que mais uma etapa fosse vencida.

À minha avó Alice, por ter depositado toda a sua confiança na minha capacidade de chegar ao fim do curso.

Aos meus chefes (antigos e atuais) e companheiros dos estágios que tive durante o período de graduação, agradeço a todas pelas experiências profissionais que dividiram comigo e todos os ensinamentos e orientações que me passaram.

À professora Liseane por ter me orientado de forma brilhante para que fosse possível a produção deste trabalho de conclusão do curso.

Aos meus amigos por todas as ótimas histórias que foram construídas, afinal nem tudo são estudos na vida! Espero que ao lerem meu trabalho me perdoem o afastamento dos últimos meses.

Aos colegas de graduação que estão trilhando esse mesmo caminho e que futuramente serão companheiros de profissão.

E também agradecer a todas as pessoas com quem tive contato e que de alguma forma ajudaram na execução deste trabalho.



## RESUMO

A necessidade de uma abordagem ambiental no século XXI da construção civil tem fomentado o campo de pesquisas para encontrar métodos inovadores e duradouros para a construção. Neste cenário, a pavimentação perpétua vem suprir esta carência. No Brasil, os pavimentos são dimensionados para uma vida útil de projeto de 10 anos. No entanto, é comum o aparecimento precoce de patologias e de degradações, de modo que a vida útil não é alcançada. Os pavimentos perpétuos são dimensionados para durarem 50 anos, minimizando os intervalos de restauração. Este trabalho apresenta uma comparação da estrutura de um pavimento dimensionado com uma vida útil de 10 anos frente a um pavimento perpétuo, cuja vida útil é de 50 anos. Foi adotado, para o dimensionamento da estrutura do pavimento perpétuo, o controle de dois critérios de desempenho, a deformação permanente e também o surgimento de fenda com origem na superfície. Com o auxílio do *software* PerRoad, versão 3.5, foi realizado o dimensionamento da estrutura do pavimento perpétuo. Ainda, foram utilizadas curvas de fadiga para misturas asfálticas com elevada resistência à deformação permanente e fadiga, com aplicação da análise empírico-mecanicista de dimensionamento. Com a estrutura do pavimento perpétuo obtida do *software* foi possível observar o aumento no uso do cimento asfáltico de petróleo na etapa de construção do pavimento comparado ao uso deste material para o pavimento tradicional brasileiro. O estudo comparativo entre as estruturas e, utilizando um horizonte de 50 anos, mostrou que houve uma economia em volume de todos os materiais que irão compor a estrutura do pavimento perpétuo.

**Palavras-chave:** Pavimentos flexíveis. Pavimento perpétuo. Comparação de estruturas.



## ABSTRACT

The need for an environmental approach in the construction field through the XXI century has fostered the research for innovative and lasting techniques. In the road paving area the perpetual pavement has come to supply that need. In Brazil the pavements are designed to last 10 years. However the early appearance of road pathologies and degradation make the lifetime of the road last less than expected. The perpetual pavements are designed to last 50 years, minimizing the restauration intervals. This work presents a comparison between pavements structures designed to last 10 years with a perpetual pavement, whose lifetime will be designed to last 50 years. It was adopted for the perpetual pavement design two performances criteria, wheel track rutting and top-down fatigue. With the assistance of the software PerRoad, version 3.5, the perpetual pavement structure was designed. It was used the fatigue curves with elevated resistance for rutting and fatigue, applying the mechanistic-empirical design method. With the perpetual pavement structure obtained from the software, was possible to notice the increase of asphalt binder usage during the construction stage compared with the Brazilian traditional pavement. However, comparing these structures using a 50 years project horizon, showed that there is a material volume economy of all the components that will be used to build and maintain the perpetual pavement structure.

**Keywords:** Flexible pavements. Perpetual pavement. Structural comparison.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da metodologia do trabalho .....	24
Figura 2 - Seção transversal de um pavimento asfáltico flexível .....	28
Figura 3 - Trinca longitudinal causada por fadiga do pavimento .....	35
Figura 4 - Trinca interligada - couro de jacaré .....	35
Figura 5 - Trilha de rodas .....	36
Figura 6 - Fluxograma utilizando o conceito empírico-mecanicista para dimensionamento de pavimentos perpétuos .....	40
Figura 7 - Estrutura de um pavimento perpétuo .....	42
Figura 8 – Resultado final do dimensionamento .....	45
Figura 9 - Estruturas dos pavimentos nas pistas de testes N8 e N9 .....	46
Figura 10 - A relação entre o número N e o limite de resistência a fadiga .....	47
Figura 11 - Impacto ambiental gerado por 3 diferentes horizontes de projeto .....	49
Figura 12 - Fluxograma da estrutura do trabalho .....	50
Figura 13 - Trecho analisado (destacado em azul) .....	51
Figura 14 – Informações estruturais e sazonais .....	56
Figura 15 - Representação dos critérios de rupturas adotados .....	57
Figura 16 – Critérios de rupturas .....	57
Figura 17 – Dados do carregamento .....	58
Figura 18 - Distribuição por tipo de veículo .....	59
Figura 19 - Resultados .....	60
Figura 20 - Dano a estrutura do pavimento em função dos critérios de ruptura .....	61
Figura 21 – Distribuição dos resultados encontrados no cenário 1 .....	65
Figura 22 - Distribuição dos resultados encontrados no cenário 2 .....	67
Figura 23 – Distribuição dos resultados encontrados no cenário 3 .....	69
Figura 24 - Estrutura final do pavimento perpétuo e os critérios adotados para controle de patologias .....	70



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferentes terminologias para o revestimento de um pavimento.....	29
Tabela 2 – Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP).....	31
Tabela 3 - Especificação brasileira para cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo <i>terminal blending</i> .....	33
Tabela 4 - Módulo de resistência durante as estações (em psi).....	44
Tabela 5 - Constituição atual do pavimento .....	52
Tabela 6 - Volume Médio Diário Anual de 2009.....	53
Tabela 7 - Projeção de tráfego nos 50 anos de serviço.....	53
Tabela 8 - Características dos materiais utilizados.....	62
Tabela 9 - Estrutura do primeiro cenário.....	64
Tabela 10 - Resultados do 1º cenário .....	64
Tabela 11 – Estrutura do segundo cenário .....	65
Tabela 12 – Resultados do segundo cenário.....	66
Tabela 13 – Estrutura do terceiro cenário.....	67
Tabela 14 – Resultados do terceiro cenário.....	68
Tabela 15 - Comparação entre as estruturas.....	71
Tabela 16 - Material utilizado (m <sup>3</sup> ) .....	71
Tabela 17 - Volume de CAP utilizado (m <sup>3</sup> ) .....	72
Tabela 18 - Volume utilizado de material no horizonte de 50 anos (m <sup>3</sup> ) .....	72



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas  
NBR – Norma Brasileira  
OGFC – *Open Graded Friction Course*  
NCAT – *National Center for Asphalt Technology*  
SMA – *Stone Matrix Asphalt*  
PG – *Performance Grade*  
LCA – *Life Cycle Assessment*  
CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente  
USACE – *United States Army Corps of Engineers*  
VMDA – Volume Médio Diário Anual  
CBCbP – Mistura Caltrans com Betume português Penetração 35/50 e borracha portuguesa  
Caltrans – *California Department of Transportation*  
BBB – Mistura convencional com betume CAP 50/70 e granulometria DNIT faixa “C”  
IBB15 – Mistura *Asphalt Institute* com betume tipo *terminal blend* com 20% de borracha



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1. OBJETIVOS.....	23
<b>1.1.1. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>23</b>
1.2. MÉTODO .....	23
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
2.1. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS .....	26
2.2. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	26
2.3. PAVIMENTOS RÍGIDOS .....	27
2.4. PAVIMENTOS COMPOSTOS.....	27
2.5. CAMADAS DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	27
2.6. BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO .....	28
2.7. REVESTIMENTO .....	28
2.8. MISTURAS ASFÁLTICAS .....	30
2.9. CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP).....	30
2.10. AGREGADOS .....	32
2.11. ASFALTO BORRACHA .....	33
2.12. PATOLOGIAS DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	34
2.13. TRINCAS POR FADIGA.....	34
2.14. DEFORMAÇÕES PERMANENTES.....	36
2.15. PAVIMENTO PERPÉTUO.....	37
2.16. CAMADAS DE UM PAVIMENTO PERPÉTUO.....	41
2.17. CAMADA DE REVESTIMENTO .....	42
2.18. BASE.....	42
2.19. SUB-BASE.....	43
2.20. APLICAÇÕES DO PAVIMENTO PERPÉTUO.....	43
2.21. LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA.....	46
2.22. QUESTÕES AMBIENTAIS PARA PAVIMENTOS PERPÉTUOS .....	48
2.23. INCENTIVO À APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PAVIMENTOS PERPÉTUOS.....	49
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>

3.1.	MATERIAIS.....	50
3.1.1.	TRECHO ANALISADO .....	50
3.1.2.	CONSTITUIÇÃO ATUAL DO TRECHO ANALISADO.....	51
3.1.3.	NÚMERO N .....	52
3.2.	MÉTODO .....	54
3.2.1.	DIMENSIONAMENTO DE UM TRECHO DE UMA RODOVIA COM CONCEITOS DE UM PAVIMENTO PERPÉTUO.....	55
3.2.2.	PROGRAMA PERROAD 3.5 PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO PERPÉTUO.....	55
3.2.3.	COMPARAÇÃO ENTRE MODOS DE DIMENSIONAMENTO .....	61
3.2.4.	MATERIAIS QUE IRÃO COMPOR O PAVIMENTO PERPÉTUO .....	61
4.	RESULTADOS .....	63
4.1.	DIMENSIONAMENTO .....	63
4.2.	CENÁRIO 1.....	63
4.3.	CENÁRIO 2.....	65
4.4.	CENÁRIO 3.....	67
4.5.	COMPARAÇÃO DAS ESTRUTURAS .....	70
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
5.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	74
	REFERÊNCIAS .....	75



## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da conscientização com o meio ambiente, métodos de construção de pavimentos que gerem menos danos se tornaram uma necessidade. Com a ideia de reduzir o uso de materiais na pavimentação, prolongar a vida útil dos pavimentos e, elevar o tempo entre reabilitações, foi desenvolvido o pavimento perpétuo.

O pavimento perpétuo é uma técnica de pavimentação que visa à durabilidade da estrutura do pavimento utilizando-se camadas de sub-base, de base e de revestimento em misturas asfálticas. A camada de revestimento é utilizada como camada de desgaste, que sofrerá manutenções periódicas durante o período estabelecido pelo projeto. Por outro lado, as demais camadas irão conferir resistência e durabilidade à estrutura do pavimento.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos perpétuos diferem dos métodos tradicionais que dimensionam a estrutura do pavimento com vida útil de 10 anos. Os pavimentos perpétuos são dimensionados para durar até 50 anos e dependendo dos métodos de manutenção aplicados, a sua estrutura pode vir a durar mais tempo.

Além do apelo ambiental, a técnica é importante uma vez que necessita apenas de manutenções periódicas, fazendo com que o tempo em que o trecho pavimentado fique intransitável seja diminuído. No modelo tradicional de pavimentação a manutenção e a reconstrução completa de sua estrutura necessitam de um tempo maior para serem executadas gerando maiores custos aos usuários e também para o órgão responsável da via.

Por ser uma técnica que vem sendo utilizada recentemente no exterior, é vital que o Brasil desenvolva pesquisas e estudos sobre o assunto para avaliar a possível aplicação e viabilidade em território nacional.

Este trabalho trata da realização um dimensionamento de um pavimento perpétuo e da escolha dos materiais das camadas desta estrutura para assim realizar uma comparação com a estrutura existente em uma rodovia de alto volume de tráfego.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.2. Objetivo Geral

Dimensionar um pavimento perpétuo para uma rodovia de tráfego elevado e comparar a estrutura resultante com a estrutura de uma rodovia existente.

### 1.3. Objetivos Específicos

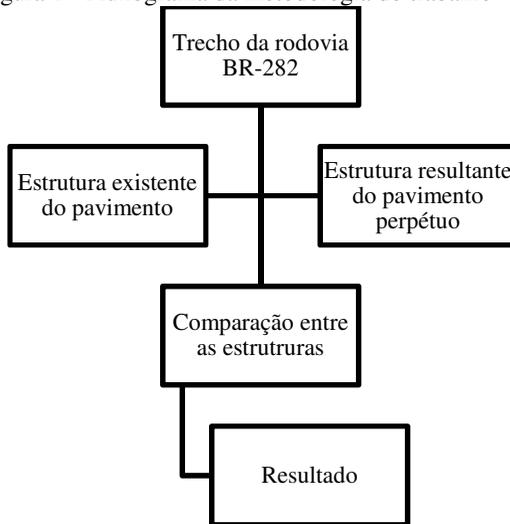
Para se chegar ao objetivo geral do trabalho foram adotados alguns objetivos específicos, são eles:

- a) Estudar os parâmetros necessários para a obtenção de um pavimento perpétuo;
- b) Selecionar um trecho de rodovia para a realização da comparação dos métodos de dimensionamento;
- c) Selecionar materiais mais adequados para a composição do pavimento a fim de evitar ao máximo o surgimento de patologias;
- d) Simular no software PerRoad 3.5 as possíveis combinações de espessuras das camadas do pavimento para que se possa obter um tempo de vida útil de 50 anos e assim se chegar ao pavimento perpétuo;
- e) Comparar a quantidade de cimento asfáltico de petróleo a ser utilizado no pavimento perpétuo com o utilizado no pavimento existente;
- f) Comparar em volume a quantidade de material utilizado para a formação de toda a estrutura para ambos os dimensionamentos utilizando como horizonte o período de 50 anos.

### 1.4. MÉTODO

A Figura 1 apresenta o fluxograma do método aplicado a este trabalho para concretização dos objetivos propostos. Primeiramente foi definido um trecho de uma rodovia existente com pavimento asfáltico dimensionado para uma vida útil de 10 anos. Posteriormente, este trecho foi dimensionado com os conceitos de pavimentação perpétua.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia do trabalho



Fonte: Autoria própria.

Com os resultados obtidos dos dois dimensionamentos foi possível realizar uma comparação das duas estruturas e também de todo o material utilizado nas suas construções, manutenções e reconstruções (etapa de reconstrução para o caso do pavimento de vida útil de 10 anos).

## 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, como segue:

### Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo do trabalho será realizada a introdução do assunto a ser tratado nos demais capítulos, também constará uma sucinta explicação do objetivo geral e dos objetivos específicos além dos resultados esperados. Por último será demonstrado como será o método para alcançar os resultados.

### Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

No segundo capítulo será percorrido o tema do trabalho utilizando-se de artigos, livros, normas para dar apoio ao tema central do trabalho, o pavimento perpétuo e também serão introduzidos conceitos de suma importância para maior entendimento do assunto.

### Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Serão abordados neste capítulo os métodos utilizados para se chegar aos objetivos propostos e também os materiais utilizados para dimensionar o pavimento perpétuo.

### Capítulo 4 – Resultados

No quarto capítulo do trabalho serão expostos os resultados obtidos no dimensionamento do pavimento perpétuo através da utilização da metodologia proposta.

Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros

Na conclusão será discorrido sobre a análise dos resultados encontrados e também serão recomendados temas para trabalhos futuros na área de pavimentação perpétua.

Finalmente são apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

O pavimento de uma rodovia é um conjunto de camadas de dimensões finitas, sobrepostas a um semi-espaço considerado infinito denominado subleito (Brasil, 2006). O pavimento pode ser definido como uma estrutura composta de diferentes camadas de materiais que possuem diferentes resistências e deformabilidade.

O pavimento é uma estrutura que tem a função técnica e econômica de resistir a esforços verticais advindos de solicitações do tráfego, garantir conforto e segurança através da melhora na condição de rolamento e além disso resistir aos esforços horizontais que causam o desgaste da camada superficial do pavimento (SENÇO, 1997).

As estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto. Os principais danos considerados são a deformação permanente e a fadiga. Para se dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, deve-se conhecer bem as propriedades dos materiais que a compõem, sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, frente à repetição de carga e ao efeito do clima. (BERNUCCI et al., 2006, p.339).

Por ser uma estrutura composta de diversas camadas os pavimentos recebem classificações diferenciadas, podendo ser classificado em flexível, rígido e composto, variando entre si os materiais e a rigidez desses materiais que o compõe (SENÇO, 1997).

### 2.2. PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

É o tipo de pavimento em que todas as camadas que o compõe sofrem deformação elástica quando sujeitas a um carregamento, sendo que os esforços resultantes desse carregamento se distribuem em parcelas quase equivalentes entre as camadas do pavimento (BRASIL, 2006).

De acordo com Senço (1997) os pavimentos flexíveis toleram certa deformação sem sofrer ruptura, sendo assim normalmente dimensionados a suportar compressão e a tração na flexão.

### 2.3. PAVIMENTOS RÍGIDOS

Conforme Brasil (2006) os pavimentos rígidos são aqueles em que a camada de revestimento possui uma elevada rigidez comparada as camadas inferiores do pavimento, e por possuir essa elevada rigidez absorve quase que por completo as tensões provocadas por um carregamento. De acordo com Senço (1997) os pavimentos rígidos sofrem rompimento por tração na flexão ao se deformarem.

### 2.4. PAVIMENTOS COMPOSTOS

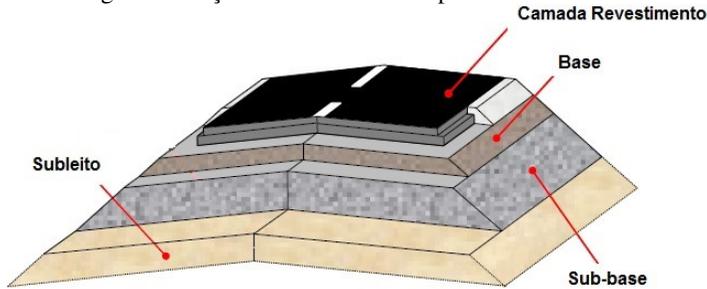
De acordo com Brasil (2006), os pavimentos compostos são aqueles pavimentos em que há a existência de uma base cimentada com um aglutinante de propriedade cimentícia coberta por um revestimento asfáltico.

### 2.5. CAMADAS DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL

Os pavimentos flexíveis são compostos, em geral, por uma camada de revestimento seguido pelas camadas de base, sub-base e reforço do subleito assentes sobre o solo de fundação, denominado de subleito.

A Figura 2 ilustra a seção transversal de um pavimento flexível e suas camadas, no desenvolvimento do trabalho será dado enfoque no pavimento flexível asfáltico devido à composição de um pavimento perpétuo.

Figura 2 - Seção transversal de um pavimento asfáltico



Fonte: Adaptado de: *European Asphalt Pavement Association* (2007).

## 2.6. BASE, SUB-BASE E REFORÇO DO SUBLEITO

Os esforços verticais transmitidos ao subleito pelo pavimento devem ser compatíveis com sua resistência, e para que isso aconteça o pavimento possui a camada de base e sub-base aliviando assim a pressão sobre as camadas de solos inferiores (BALBO, 2007).

Para solos com baixa resistência poderá ser construída acima da camada do subleito uma camada de reforço com material que possua características superiores ao do material constituinte do subleito (SENÇO, 1997).

Sobre o subleito, ou do reforço do subleito, esta a camada de sub-base, constituída de um material superior ao do subleito, mas inferior à camada da base (SENÇO, 1997). De acordo com Bernucci et al. (2006) a camada de sub-base poderá ser constituída de material granular, solos ou misturas solo, sem o uso de agentes cimentantes.

A base, camada que antecede o revestimento de um pavimento possui de acordo com Balbo (2007) a função de distribuir os esforços gerados no pavimento para as camadas inferiores (sub-base, reforço do subleito e subleito). A sua composição poderá ser dos mesmos tipos de materiais adequados à sub-base (BERNUCCI et al. 2006), mas deverá possuir melhores características frente ao material a ser escolhido para compor a sub-base (SENÇO, 1997).

## 2.7. REVESTIMENTO

Para Balbo (2007) a camada de revestimento tem a função de “receber as cargas, estáticas ou dinâmicas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou,

ainda perda de compactação”. Bernucci et al. (2006) afirma que a camada de revestimento “deve ser tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento em movimento, que são variados conforme a carga e a velocidade dos veículos.

De acordo com Senço (1997) a camada de revestimento é a camada mais nobre de um pavimento, sendo que a espessura adotada para si não pode vir a diminuir a resistência de um pavimento. Como o revestimento é constituído de um material mais apto a garantir eficiência no comportamento do pavimento e pelo fato da camada de revestimento possuir o maior custo unitário de todo o pavimento é necessário um cuidado maior na determinação da sua espessura.

Na maioria dos pavimentos brasileiros [pavimentos flexíveis] usa-se como revestimento uma mistura de agregados minerais, de vários tamanhos, podendo também variar quanto à fonte, com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcionada e processada, garanta ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previsto para o local. (BERNUCCI et al. 2006, p. 157).

A Tabela 1 indica as diferenças entre as possíveis camadas constituintes de um pavimento flexível asfáltico (BALBO, 2007).

Tabela 1 - Diferentes terminologias para o revestimento de um pavimento

Designação do Revestimento	Definição	Associações
Camada de rolamento	É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com as ações ambientais.	Camada de desgaste, capa de rolamento, revestimento.
Camada de ligação	É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento.	Camada de <i>binder</i> ou simplesmente <i>binder</i> .

Camada de nivelamento	Em geral, é a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista, afundamentos localizados, enfim, nivelar o perfil do greide para posterior execução da nova camada de rolamento.	Camada de reperfilagem ou simplesmente reperfilagem.
Camada de Reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas.	"Recape" e recapeamento são termos populares (usa-se também a expressão "pano asfáltico", que muitas vezes parece comprometer menos).

Fonte: Balbo (2007).

## 2.8. MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas Asfálticas são os produtos resultantes da mistura convenientemente proporcionada de agregados e cimento asfáltico de petróleo. As misturas asfálticas podem ser produzidas de duas maneiras, a primeira sendo fabricadas em uma usina específica (a usina pode ser fixa ou móvel) e a outra maneira de produção é na própria pista a ser pavimentada (no caso de tratamentos superficiais). Possuem também duas identificações levando em consideração o tipo de ligante: sendo que a mistura a quente utiliza o CAP (cimento asfáltico de petróleo) enquanto a mistura a frio utiliza emulsões asfálticas. E as misturas também podem ser identificadas quanto à distribuição da granulometria do agregado, podendo ser: densa, aberta, contínua e descontínua (BERNUCCI et al, 2006).

## 2.9. CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

“Os asfaltos ou Cimentos Asfálticos de Petróleo são obtidos a partir de processos de refinamento do petróleo cru, para as finalidades específicas de pavimentação”. Os Cimentos Asfálticos de Petróleo “possuem grande quantidade de betume, por isso mesmo sendo muitas vezes designados também por betumes [...], sendo muito viscosos e agindo como ligantes” (BALBO, 2007).

De acordo com Bernucci et al. (2006), os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos unidos por ligações covalentes, e ainda afirma que “a composição química do CAP tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas”. A Resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005 estabelece as atuais especificações brasileiras para os cimentos asfálticos de petróleo.

Em termos simplificados, o cimento asfáltico de petróleo é composto por hidrocarbonetos alifáticos e hidrocarbonetos aromáticos, além de enxofre e pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio; desempenham grande importância no material as frações de asfaltenos (moléculas que não se dissolvem na presença de heptano ou éter) e de maltenos. Os asfaltenos constituem a parte sólida do produto, que lhe concede rigidez, além da coloração típica; os maltenos constituem a parte oleosa e chamada de veículo, conferindo as propriedades plásticas e de viscosidade do produto (Balbo, 2007, p.111).

O Cimento Asfáltico de Petróleo pode ser classificado de acordo com as suas propriedades, sendo que a classificação normatizada no Brasil é a realizada pela consistência (utilizando-se do ensaio de penetração) (BALBO, 2007 e BRASIL, 2006).

A

Tabela 2 apresenta a especificação brasileira para o cimento asfáltico de petróleo atualmente em vigor, conforme norma DNIT 095/2006.

Tabela 2 – Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt Furol							
a 135°C	S	192	141	110	80	NBR	E 102

a 150°C		90	50	43	36	14950	
a 177°C		40-150	30-150	15-60	15-60		
<b>Viscosidade Brookfield</b>							
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, SP 21, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76-285 (-1,5)	57-285	28-114	28-114		
Índice de susceptibilidade térmica		a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductibilidade a 25°C, mín.	Cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
<b>Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 mín.</b>							
Varição em massa, máx	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Ductibilidade a 25°C, mín	Cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Agência Nacional do Petróleo (2005).

## 2.10. AGREGADOS

Conforme a norma ABNT NBR 9935/2011 agregado é um material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto.

O agregado escolhido para compor uma mistura asfáltica de um pavimento deve apresentar propriedades que possam suportar as tensões provenientes ao pavimento. A escolha do agregado mais adequado é realizada em laboratório através de uma série de ensaios para prever o comportamento deste material quando posto em serviço (BERNUCCI et al. 2006).

## 2.11. ASFALTO BORRACHA

O asfalto borracha é normatizado pela NBR 15529/2007 e conforme Bernucci et al. (2006) é a inserção da borracha de pneus inservíveis ao ligante asfáltico incorporando os benefícios desse polímero à mistura. Há dois métodos para realizar a incorporação da borracha do pneu ao concreto asfáltico, são eles: processo úmido e processo seco. A Tabela 3 apresenta a especificação brasileira para o asfalto borracha, modificado pelo processo via úmida, do tipo *terminal blending*.

Tabela 3 - Especificação brasileira para cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo *terminal blending*

Características	Unidade	Asfalto Borracha	Métodos de Ensaio	
		Tipo AB 8	Tipo AB 22	
Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,1mm	30-70	30-70	DNER ME 003/99
Ponto de amolecimento	°C	55	57	DNER ME 247/94
Viscosidade Brookfield, 175°C, 20rpm, Spindle 3	cP	800-2000	2200-4000	NBR 15529
Ponto de fulgor, min	°C	235	235	DNER ME 148/94
Recuperação Elástica				
Ductilômetro, 25°C, 10 cm, min	%	50	55	NBR 15086:2006
Estabilidade à estocagem, máx	°C	9	9	DNER ME-384/99
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C				
- Variação em massa, máx.	%	1	1	NBR 15235:2006
- Variação do Ponto de Amolecimento, máx	°C	10	10	DNER ME-247/94
- Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	55	55	DNER ME 003/99
- Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25°C 10 cm, mín.	%	100	100	NBR 15086:2006

Fonte: Brasil, 111/2009.

## 2.12. PATOLOGIAS DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL

No Brasil a norma que rege as patologias nos pavimentos flexíveis é denominada “Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos” (DNIT, 005/2003). Existem diversas patologias encontradas em pavimentos asfálticos, no entanto para o melhor entendimento dos danos encontrados em pavimentos perpétuos é necessário tomar conhecimento das trincas por fadiga e da deformação permanente, pois são as duas patologias controladas no dimensionamento de pavimentos flexíveis na análise empírica-mecanicista.

## 2.13. TRINCAS POR FADIGA

Através do esforço repetitivo de cargas e de condições ambientais os pavimentos que possuem revestimento asfáltico tendem a romper em algum período de sua vida (BRASIL, 2006). Essa ruptura é ocasionada pela ação repetida de esforços (tensões repetidas ou oscilantes no tempo) e é chamada de fadiga, sendo que as tensões repetidas atuantes são menores do que a resistência do material asfáltico do pavimento (SILVA, 2008).

De acordo com Brasil (2006), nas últimas décadas foram realizadas pesquisas que estabeleceram relações para a ruptura de misturas asfálticas, conforme mostra a Equação 1.

$$N = k. (\varepsilon_c)^n \quad (1)$$

Em que:

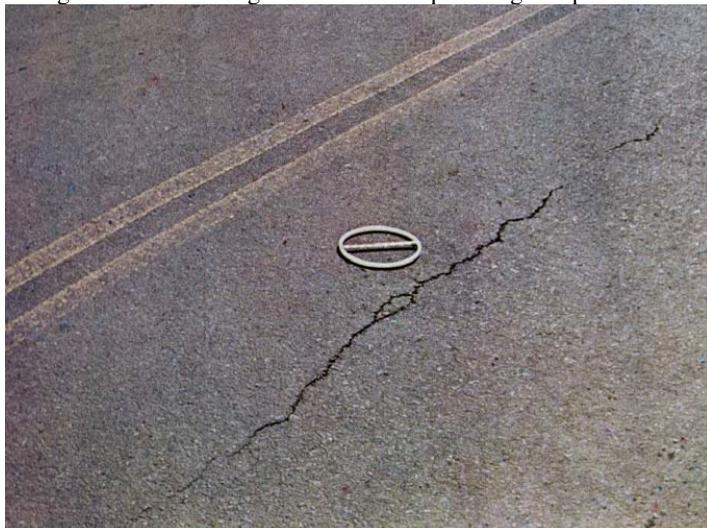
N = o número de repetições devidas ao carregamento até o início do trincamento por fadiga.

$\varepsilon_c$  = deformação específica máxima de tração ocorrente na mistura asfáltica sob a ação do carregamento.

k, n = constantes que dependem da rigidez e do teor de asfalto na mistura asfáltica, obtidas experimentalmente.

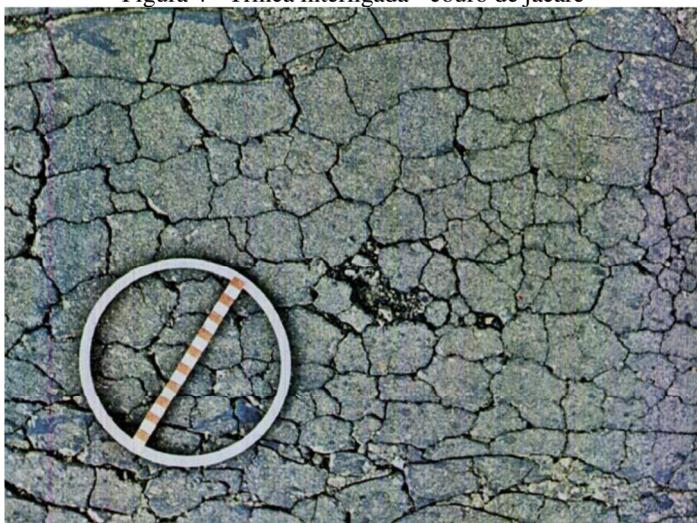
As rupturas causadas pela fadiga podem ser isoladas, no caso de rupturas longitudinais e transversais, ou podem ser interligadas, mais conhecido como couro de jacaré (SILVA, 2008). A Figura 3 apresenta um exemplo de ruptura longitudinal causada por fadiga do pavimento e a Figura 4 apresenta o exemplo de uma trinca interligada (couro de jacaré).

Figura 3 - Trinca longitudinal causada por fadiga do pavimento



Fonte: Brasil, 005/2003.

Figura 4 - Trinca interligada - couro de jacaré



Fonte: Brasil, 005/2003.

## 2.14.DEFORMAÇÕES PERMANENTES

De acordo com Brasil (2006), as deformações permanentes em pavimentos (flexíveis e rígidos) são os afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões. Com o surgimento dessas deformações há um acréscimo de irregularidade longitudinal que afeta a dinâmica das cargas, qualidade de rolamento, custo operacional de veículos e risco a segurança das pessoas que utilizam a via (BRASIL, 2006).

Carregamentos gerados pelo tráfego podem causar deformações em três situações de acordo com Brasil (2006). A primeira delas é quando os esforços nos materiais constituintes do pavimento causam cisalhamento, o que acarreta em deslizamentos no interior do pavimento. Outra situação para o surgimento de deformações é através de carregamentos estáticos que causam deformações em materiais viscosos (como as misturas asfálticas). E por fim, a situação em que a deformação pode ocorrer é no caso de haver um grande número de repetições de cargas reduzidas, que acarretam no surgimento de pequenas deformações que através do tempo se acumulam gerando as trilhas de roda. A Figura 5 apresenta um exemplo de uma trilha de rodas em um pavimento asfáltico.

Figura 5 - Trilha de rodas



Fonte: Brasil, 005/2003.

## 2.15.PAVIMENTO PERPÉTUO

Por ser um pavimento com estrutura dimensionada para durar por longos períodos o pavimento perpétuo possui vantagens sobre a pavimentação tradicional, comumente utilizada no Brasil.

A busca de pavimentos duradouros por engenheiros iniciou-se na década de 1960. Na época surgiram duas técnicas de pavimentos que foram denominados *Full-depth* e *Deep-strength*, ambos com o dobro da expectativa de vida dos pavimentos asfálticos tradicionais, em um total de 20 anos (NEWCOMB, BUNCHER E HUDDLESTON, 2001).

Pavimentos *Full-depth* são construídos colocando-se camadas de materiais asfálticos acima do solo (modificado ou não) ou da camada de Sub-base. Pavimentos *Deep-strength* consistem em camadas de materiais asfálticos sobre uma fina camada de base granular. Ambos os tipos de pavimentos permitem que engenheiros apliquem um pavimento que possua uma camada total mais fina do que no caso de pavimentos que utilizem camadas granulares grossas (NEWCOMB; WILLIS; TIMM, 2002).

Esses dois modelos de pavimentos suportaram um grande aumento de tráfego que foi gerado entre os anos de 1970 e 1998, que de acordo com D'Angelo et al. (2004, apud Newcomb; Willis; Timm, 2002) esse aumento foi de 360% na média de toneladas por quilômetro por dia trafegados e tendo ainda continuado a crescer a uma taxa de 2,7% ao ano após o ano de 1998 em rodovias norte-americanas.

O pavimento perpétuo é um pavimento asfáltico dimensionado e construído para durar mais de 50 anos sem requerer grandes reabilitações ou reconstruções estruturais, necessitando apenas de renovação periódica de sua superfície devido a danos causados ao topo do pavimento (*Asphalt Pavement Alliance*, 2000 apud NEWCOMB; WILLIS; TIMM, 2002).

O pavimento perpétuo pode ser considerado a evolução da técnica de pavimentação *Full-Depth*, visto que ambas as técnicas utilizam em sua composição camadas asfálticas para a base e sub-base.

Através de um sistema de três camadas, o pavimento perpétuo é dimensionado para o clima e tráfego local. A camada da sub-base é

composta de um material flexível resistente à fadiga, a camada intermediária, base, apresenta um material de alto módulo de resistência capaz de resistir à deformação permanente e a camada da superfície deve ser capaz de resistir à deformação permanente sem formação de trilhas de rodas. A combinação destas três camadas e de suas características de resistência a desempenho mecânico resulta em um pavimento perpétuo (OHIO, 2001).

No Brasil dimensiona-se, tradicionalmente, um pavimento para um tempo de vida de 10 anos, o que acaba gerando um custo direto (manutenção, reconstrução) e indireto (necessidade de fechar a via para reparos) ao usuário. Com a evolução de métodos empírico-mecanicistas de dimensionamentos além do aumento do conhecimento de que pavimentos com maior tempo de vida geram uma maior economia, houve uma mudança de pensamento dos engenheiros que passaram a ter uma maior atenção a pavimentos que duram por um tempo mais longo (SANTERO, HARVEY e HORVATH, 2010).

Por possuir uma vida esperada de 50 anos os pavimentos perpétuos geram algumas vantagens: baixo custo de ciclo de vida por evitar que sejam realizados reparos ou reconstruções profundas no pavimento, baixo tempo de manutenção visto que só serão necessários recapeamentos que poderão ser executados fora dos horários de pico e ainda, o pavimento perpétuo gera baixo impacto ambiental devido a baixa utilização de materiais (durante seu tempo de vida de 50 anos) e também pela reciclagem do material retirado durante as manutenções (NEWCOMB, WILLIS e TIMM, 2002).

Pavimentação Asfáltica Perpétua é uma alternativa atrativa frente aos pavimentos tradicionais especialmente para rodovias de elevado nível de tráfego, pois é desejável minimizar a reabilitação e os custos de reconstrução além de minimizar o tempo de tráfego fechado (TAREFDER E BATEMAN, 2009).

Se um pavimento pode ser dimensionado a ponto de que a vasta maioria dos carregamentos esperados no seu tempo de vida venha a produzir valores de tensões, deformações e deslocamentos menores que os valores que causariam danos estruturais ao pavimento, esse pavimento pode ser considerado um pavimento perpétuo (NEWCOMB, WILLIS e TIMM, 2002).

A espessura de um pavimento aumenta conforme o aumento do carregamento. Entretanto, existe uma espessura em que o pavimento será mais do que adequado para suportar os mais elevados carregamentos (deformações) ocasionados e havendo qualquer aumento nas espessuras das camadas do pavimento resultará em uma seção muito conservativa e um desnecessário aumento de custo. Além de exagerada de um ponto de vista financeiro, tal uso excessivo de materiais e recursos vai de encontro aos conceitos de sustentabilidade e aos preceitos do método de dimensionamento de pavimentos perpétuos conforme apontaram Newcomb, Willis e Timm (2002).

O método utilizado no dimensionamento de pavimentos perpétuos é o empírico-mecanicista. Esse método utiliza uma análise racional das reações no pavimento em termos de tensões, deformações e deslocamentos. Para pavimentos perpétuos há um limite no qual as tensões abaixo de um limite pré-estabelecido não causam danos a estrutura do pavimento, mantando-se esses danos contidos na camada de desgaste. Enquanto deve-se reconhecer a importância de um correto dimensionamento para Pavimentos Perpétuos é necessário entender que o tempo de vida de um pavimento é função das características dos materiais utilizados, técnicas construtivas, espessura do pavimento, manutenções e critérios de ruptura (NEWCOMB; WILLIS; TIMM, 2002);

No método empírico-mecanicista de dimensionamento as leis da física são utilizadas para que se possam ser conhecidas as reações que serão encontradas no pavimento de acordo com a carga sendo aplicada (NEWCOMB; BUNCHER; HUDDLESTON, 2001). Conforme Newcomb, Buncher e Huddleston (2001) “sabendo os pontos críticos da estrutura de um pavimento, é possível dimensioná-lo contra tipo de danos ou falhas ao escolher os materiais corretos e a espessura do pavimento”. No caso do pavimento perpétuo, esse conceito leva a dedução na utilização de uma camada superior rígida o suficiente para impedir a deformação permanente, e uma espessura total suficiente junto com uma maior flexibilidade da camada mais próxima do subleito a fim de evitar a fadiga do material na parte inferior do pavimento (NEWCOMB; BUNCHER; HUDDLESTON, 2001).

De acordo com Nunn e Fern (2001) uma deformação encontrada nas camadas asfálticas superiores de um pavimento perpétuo não gera grandes modificações estruturais, no entanto uma deformação excessiva pode ser indício de que a capacidade de distribuir esforços do

asfalto e de suas camadas granulares é insuficiente para proteger o subleito, podendo causar ruptura da sua estrutura.

A Figura 6 apresenta um fluxograma simplificado das etapas de um dimensionamento com os conceitos do método empírico-mecanicista (NEWCOMB; WILLIS; TIMM, 2002).

Figura 6 - Fluxograma utilizando o conceito empírico-mecanicista para dimensionamento de pavimentos perpétuos



Fonte: Adaptado de: Newcomb, Willis e Timm (2002).

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association* (2007) a ruptura por fadiga é um dos principais problemas a ser considerado em um pavimento flexível e geralmente é causado por excessivas tensões de deformação geradas por cargas repetitivas. Pelo fato de já existirem defeitos microscópicos, o carregamento acaba gerando um aumento e união desses defeitos o que acabará causando a ruptura do pavimento.

No caso da deformação permanente Newcomb, Willis e Timm (2002) definem que ocorre devido a um esforço excessivo na estrutura do pavimento, causando assim uma deformação permanente (também conhecida como trilha de rodas). A deformação permanente se apresenta sob dois tipos: a deformação permanente que ocorre nas camadas da estrutura do pavimento (base ou sub-base) e a deformação permanente superficial que ocorre nos primeiros centímetros da camada de revestimento, e que pode ser recuperada realizando a troca da camada superficial do pavimento.

Deformação permanente [trilha de rodas] é o resultado de uma deformação de uma ou mais camadas de um pavimento. Em um extremo ela estará restrita a camada(s) asfáltica(s) mais superior, denominado de Deformação Permanente Superficial. No outro extremo o maior constituinte dessa deformação encontra-se na sub-base, e essa deformação é denominada de Deformação Permanente Estrutural (NUNN E FERNE, 2001, p.33).

No momento em que a tensão de deformação nas fibras inferiores de uma camada asfáltica é diminuída, a localização da linha crítica para a tensão de deformação se move do fundo para a superfície dessa camada, fazendo assim que sua ruptura ocorra de cima para baixo (MAHONEY, 2001 apud NEWCOMB, WILLIS e TIMM 2002). Com a mudança no sentido da ruptura temos que todos os problemas de um pavimento estarão concentrados na camada de desgaste, evitando dessa maneira que haja algum dano na sua estrutura (FERNE, 2006 apud NEWCOMB, WILLIS e TIMM, 2002). Mahoney (2001) complementa que para minimizar as rupturas superficiais basta substituir a camada superficial do pavimento e assim prolongar a vida do pavimento.

## 2.16. CAMADAS DE UM PAVIMENTO PERPÉTUO

A Figura 7 ilustra a divisão das camadas de um pavimento perpétuo, sendo que para a determinação de um período de vida do pavimento será em função de diversos fatores, como: características dos materiais (módulo de resistência à deformação e à fadiga, durabilidade entre outras), as espessuras das camadas, programação de manutenções e também de critérios de falhas (NEWCOMB, WILLIS e TIMM, 2002).

Figura 7 - Estrutura de um pavimento perpétuo



Fonte: Adaptado de: Newcomb, Willis e Timm (2002).

## 2.17. CAMADA DE REVESTIMENTO

A camada de revestimento é uma superfície renovável que pode ser dimensionada para aplicações específicas conforme Terefder e Bateman (2009). De acordo com Newcomb, Willis e Timm (2002) essa camada depende das condições de tráfego, meio ambiente, experiência local e suas economias. Ambos os autores corroboram na questão dos requerimentos de desempenho, no qual o Pavimento Perpétuo necessita de resistência à formação de trilha de rodas e ruptura da superfície, boa aderência, atenuar o efeito de *splash* e *spray* e redução de ruído gerado pelo pavimento. Por outro lado os autores Terefder e Bateman (2009) afirmam que além das características expostas, o Pavimento Perpétuo poderá ter a necessidade de ser impermeável ou pouco permeável (poucos vasos comunicantes). Em termos de material para compor essa camada Newcomb, Willis e Timm (2002) orientam para o uso de *stone matrix asphalt* (matriz pétreo asfáltica) ou *Open Graded Friction Course* (OGFC) que é permeável, mas com poucos vasos comunicantes.

## 2.18. BASE

Denominada na literatura estrangeira como *Intermediate Layer*, a camada da base vem logo abaixo da camada de ligação. Tarefder e Bateman (2009) afirmam que esta camada é responsável a

resistir a maior parte do carregamento ao qual o pavimento esta submetido, necessitando ser resistente à deformação permanente além de durável. Para Newcomb, Willis e Timm (2002) isto pode ser alcançado promovendo-se o contato entre agregados graúdos e a utilização de um ligante duro ou polimérico (resistente à alta temperatura), sendo essencialmente necessária nos primeiros 10 centímetros da camada, pois é nessa localização que há a predominância de ocorrência de deformação permanente (trilha de rodas).

## 2.19.SUB-BASE

Para Newcomb, Buncher e Huddleston (2001) essa é uma camada formada por Concreto Asfáltico (*Hot Mixed Asphalt*) e deve resistir à ruptura por fadiga gerada pela flexão causada pela passagem do tráfego. A principal característica que deve possuir na composição dessa camada é uma elevada taxa de ligante asfáltico que lhe concederá uma maior durabilidade. De acordo com Tarefder e Bateman (2009) ao invés do uso de uma elevada quantidade de ligante asfáltico pode ser realizado o aumento da espessura total do pavimento a fim de que as tensões de deformação no final da camada sejam insignificantes, mas isso poderá gerar um custo maior de execução, além de uma maior quantidade de material.

## 2.20.APLICAÇÕES DO PAVIMENTO PERPÉTUO

São apresentados exemplos de estruturas de pavimentos perpétuos utilizados em Bradford e em Montgomery, ambos nos Estados Unidos da América.

Foi realizada a construção de um trecho de uma rodovia utilizando o programa PerRoad para o dimensionamento de uma Pavimento Perpétuo. A rodovia (Rota Estadual 219) fica localizada na cidade de Bradford, no estado da Pensilvânia, Estados Unidos da América (ROSENBERGER; ZURAT; COMINSKY, 2006).

A rodovia na qual a técnica foi aplicada possuía 8,4km de extensão e antes do início da execução da pavimentação, foi realizada a total remoção das camadas existentes até o subleito.

O dimensionamento resultou em quatro camadas, sendo três camadas asfálticas. A camada de sub-base foi dividida em duas, na qual ocorreu apenas uma alteração no teor de asfalto entre essas camadas. Entre a camada de revestimento e a camada da base houve variação no

diâmetro máximo do agregado e na espessura do pavimento. A única camada não asfáltica foi a camada de reforço do subleito, a qual foi realizada com material granular assente sobre o subleito.

No projeto executado a camada de desgaste resultou em uma espessura de 4 centímetros e foi utilizado como material para sua construção uma mistura asfáltica com diâmetro máximo do agregado sendo de 9,5 milímetros. Para a camada da base do pavimento foi escolhido uma mistura com 19 milímetros para o diâmetro máximo do agregado e essa camada ficou com uma espessura de 8 centímetros. A camada de sub-base que foi dividida em duas etapas, a mais superior foi executada com espessura de 12,5 centímetros e a mais inferior com 10 centímetros. Ambas com diâmetro máximo do agregado de 25 milímetros, sofrendo alteração somente no teor de asfalto, na qual a camada inferior da sub-base (a camada em contato com o subleito) recebeu uma quantidade superior.

Para os 33 centímetros da camada do reforço do subleito foi utilizado um material granular chamado de 2A, que é composto por uma mistura de brita de espessura máxima de 5 centímetros e pó de pedra.

Na escolha do módulo de resistência dos materiais foi levado em consideração a variação de temperatura encontrada nas 4 estações do ano. Durante o inverno com a diminuição da temperatura os materiais tornam-se mais rígidos adquirindo maior módulo de resistência e no verão com o aumento da temperatura ocorre a diminuição da rigidez do material. A Tabela 4 mostra os módulos de cada material nas 4 estações do ano.

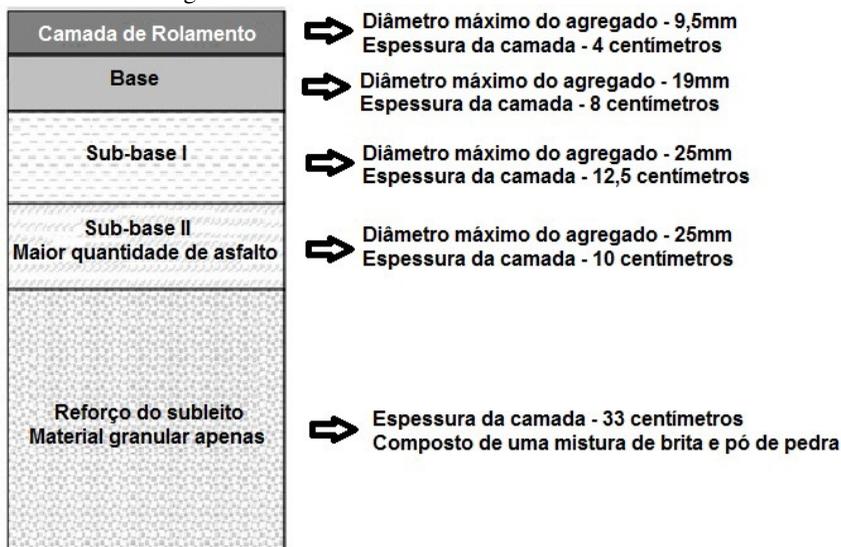
Tabela 4 - Módulo de resistência durante as estações (em psi)

Material	Estações do ano			
	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Concreto Asfáltico	600.000	1.100.000	1.600.000	1.000.000
Agregado	20.000	26.000	40.000	10.000
Material Granular (2A)	15.000	15.000	24.000	7.500

Fonte: Rosenberger, Zurat e Cominsky (2006).

A Figura 8 ilustra as camadas do pavimento perpétuo após a análise de tensão e deformação realizada (programa PerRoad) e as suas espessuras.

Figura 8 – Resultado final do dimensionamento

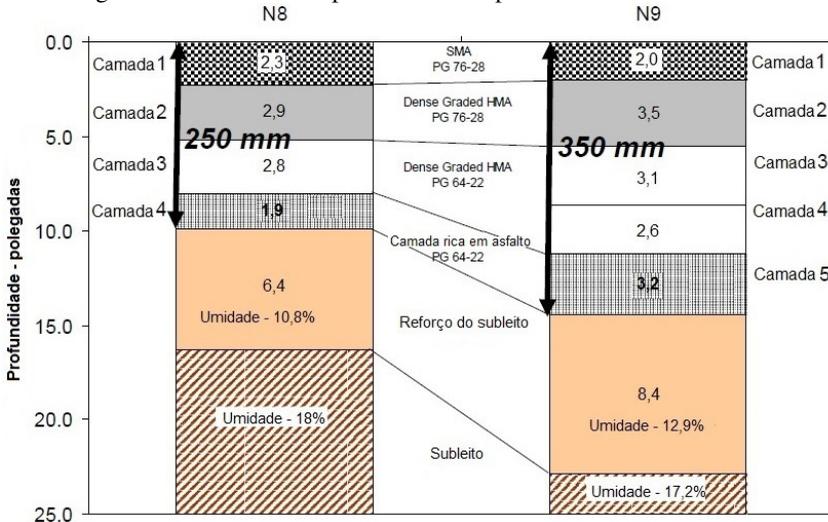


Fonte: Adaptado de Rosenberger, Zurat e Cominsky (2006).

A Figura 9 apresenta a estrutura de dois trechos (N8 e N9) da pista de testes da NCAT (*National Center for Asphalt Technology*) no qual foi utilizada a técnica de pavimentação perpétua.

A pista de teste esta localizada na cidade de Montgomery no estado do Alabama nos Estados Unidos da América possui 2,7km de extensão e é dividida em 46 trechos, sendo os trechos N8 e N9 construídos para testar a técnica de pavimento perpétuo.

Figura 9 - Estruturas dos pavimentos nas pistas de testes N8 e N9



Fonte: Adaptado de: Timm (2010).

Em que:

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).

## 2.21. LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Os pavimentos flexíveis de concreto asfáltico são dimensionados para resistir à ruptura por deformação permanente do subleito e a fadiga. Por esse motivo foi proposto o Limite de Resistência à Fadiga (*Fatigue Endurance Limit*) para avaliar estes parâmetros em pavimentos perpétuos (PROWELL ET AL, 2006).

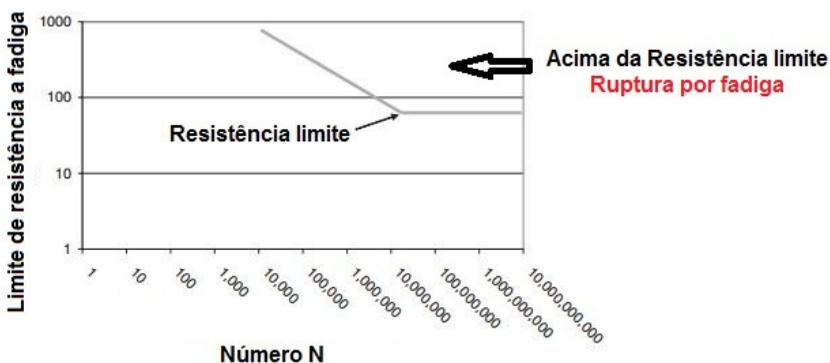
O Limite de resistência à fadiga é uma variável muito importante para ser considerada no dimensionamento de um pavimento perpétuo. Von Quintus (2001) definiu graficamente esse limite como sendo uma assíntota horizontal no qual qualquer valor abaixo do limite de resistência da deformação permanente retorna um valor de repetições de carga (N) infinito, conforme demonstrado na Figura 10 - A relação

entre o número N e Prowell et al. (2010) complementa que se a razão entre a resistência da mistura asfáltica e a tensão ao qual o mesmo estiver submetida for menor que 0,45, a mistura asfáltica terá uma essencialmente uma resistência a fadiga infinita.

De acordo com Thompson e Carpenter (2009), essa definição foi desenvolvida para que seja possível garantir, através de testes de laboratório, um indicador que possa demonstrar se a mistura asfáltica obtém a resistência à fadiga necessária para o pavimento se comportar como um Pavimento Perpétuo (sem danos por fadiga por um longo período de tempo).

De acordo com Thompson e Carpenter (2009) a temperatura na base da seção do pavimento nem sempre se mantém constante, havendo variações elevadas durante o ano, e o carregamento também é muito variável durante o tempo de vida de um pavimento. Essas variações geram uma deformação diferente daquela necessária para o comportamento de um Pavimento Perpétuo, demonstrando assim que o Limite de resistência à fadiga é uma variável apenas laboratorial.

Figura 10 - A relação entre o número N e o limite de resistência a fadiga



Fonte: Adaptado de Prowell et al (2010)

Para Von Quintus (2001), em pavimentos perpétuos, o uso do Limite de Resistência à Fadiga é considerado um elemento chave para a definição da espessura da camada de revestimento. Um valor prático e adequado que representa a deformação específica de tração é de 0,00007 in/in (70 *microstrains*), e com esse valor é possível observar pelo gráfico que o pavimento estaria apto a receber um infinito número de repetições de carga.

Nos pavimentos perpétuos os danos se propagam da camada superior em direção às camadas inferiores, portanto é necessário monitorar constantemente o avanço de fissuras (resultantes da fadiga), trilha de rodas, desgaste da superfície de rolamento e outras patologias, de modo a evitar que esses defeitos se propaguem para as camadas abaixo do revestimento (estrutura do pavimento) (NEWCOMB; BUNCHER; HUDDLESTON, 2001).

Esta degradação é denominada fenda com origem na superfície (FCOS), não comum em pavimentos brasileiros, FCOS ocorre em pavimentos com grande espessura de camadas asfálticas, como os pavimentos perpétuos.

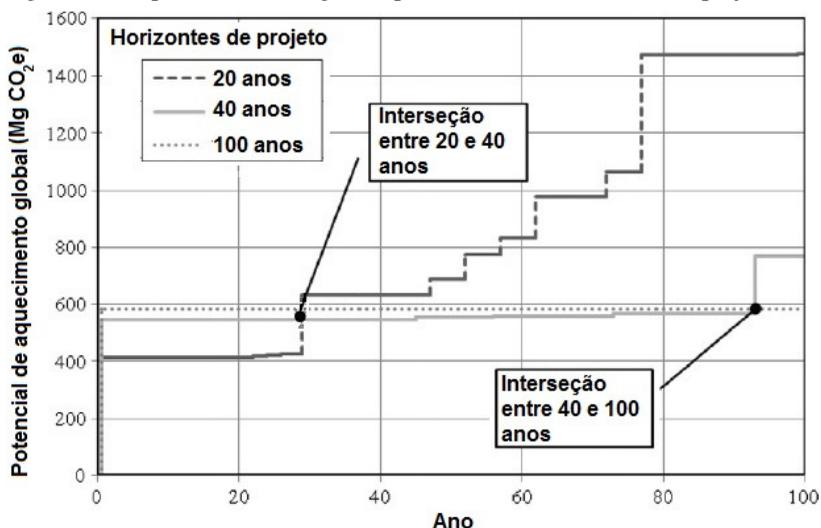
## 2.22. QUESTÕES AMBIENTAIS PARA PAVIMENTOS PERPÉTUOS

Para avaliar o impacto ambiental de pavimentos perpétuos tem-se utilizado o índice *Life-cycle assessment* (LCA – Avaliação de ciclo de vida). O ciclo de vida de um pavimento é dividido em 5 etapas distintas, são elas: extração e produção de materiais, construção, uso, manutenção e fim de vida (reconstrução) (SANTERO; HARVEY; HORVATH, 2011).

Santero, Harvey e Horvath (2011) através dos seus estudos mostram que até a etapa de construção, o pavimento perpétuo (dimensionado para 40 anos) possui um impacto ambiental muito acima daquele causado pelo pavimento com horizonte de projeto de 20 anos, entretanto, na etapa da reconstrução do projeto, após 20 anos (causado pelo fim do seu tempo de vida) o projeto de menor horizonte ultrapassa o pavimento perpétuo (horizonte de 40 anos) e gerando um maior impacto ambiental.

Os autores avaliaram ainda o impacto ambiental causado por outros dois horizontes de pavimentos perpétuos (com vida útil de 40 e 100 anos). O resultado encontrado foi similar ao anterior, para o pavimento de menor horizonte de projeto a sua condição ambiental é favorável até o ponto de sua reconstrução, no qual o pavimento que possui um horizonte de projeto maior passar a ser mais vantajoso do ponto de vista ambiental conforme representado na Figura 11 (SANTERO; HARVEY; HORVATH, 2011). No entanto, o horizonte de projeto de 100 anos é descartado devido a imprevisibilidade do tráfego.

Figura 11 - Impacto ambiental gerado por 3 diferentes horizontes de projeto



Fonte: Adaptado de Santero, Harvey e Horvath (2011).

## 2.23. INCENTIVO À APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PAVIMENTOS PERPÉTUOS

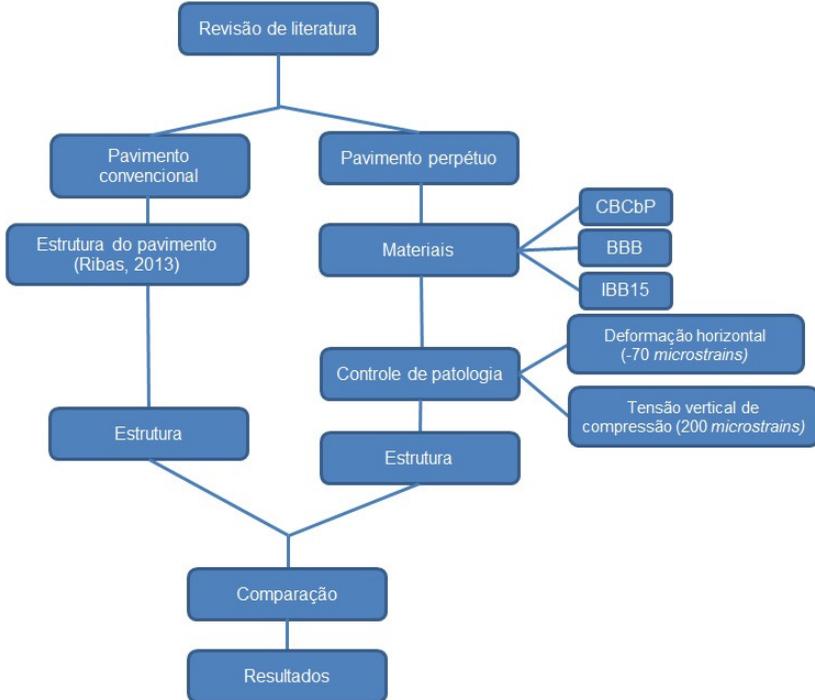
De acordo com a *Asphalt Pavement Alliance* os primeiros pavimentos perpétuos foram construídos no início dos anos 2000. No entanto existem muitas rodovias que há anos já haviam sido construídas e que apresentam uma resposta funcional equivalente aos pavimentos perpétuos. Tendo em conta a proposta funcional/estrutural foi instituída uma premiação anual para esses tipos de pavimentos.

Para se tornar elegível à premiação a rodovia não pode ter recebido mais do que 10 centímetros de adição de material a sua estrutura nos últimos 35 anos, além de não ter sido realizado mais do que um recapeamento a cada 13 anos. Atualmente, foram premiados mais de 100 rodovias em 30 estados norte-americanos e 1 província canadense (ASPHALT PAVEMENT ALLIANCE, 2015).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 12 apresenta o método adotado para se alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

Figura 12 - Fluxograma da estrutura do trabalho



Fonte: Autoria própria.

#### 3.1. MATERIAIS

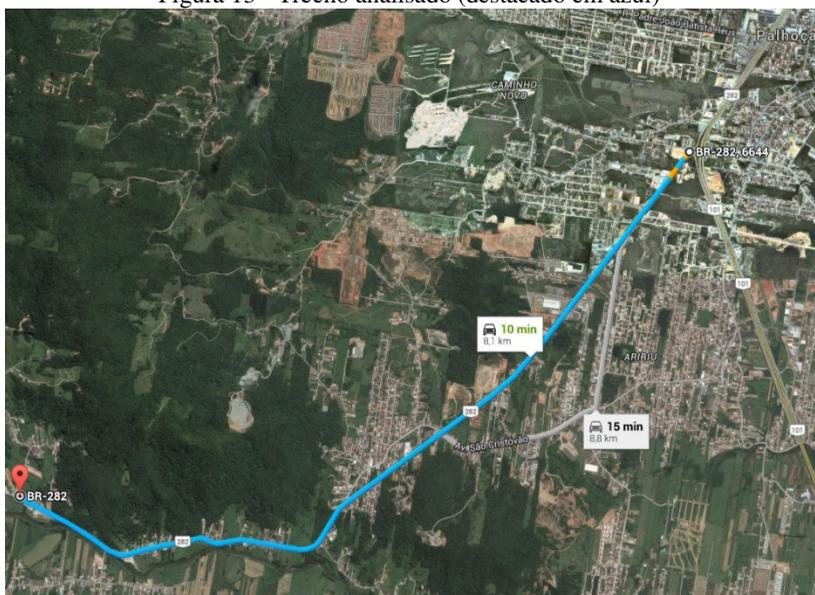
#### 3.2. Trecho Analisado

Para avaliar as diferenças resultantes em dimensionar um pavimento perpétuo foi realizada uma comparação com uma análise da estrutura em campo realizado por Ribas (2013) para um pavimento flexível tradicional. O trecho de 8.180 metros da BR-282 está localizado no estado de Santa Catarina, entre os municípios de Palhoça e Santo

Amaro da Imperatriz. Foram utilizados os mesmo dados para o tráfego, alterando-se apenas o horizonte de projeto adotado de 10 para 50 anos.

O trecho da BR-282 a ser analisado tem início no km 15,500 e fim no km 23,680 entre os municípios de Palhoça e Santo Amaro da Imperatriz em Santa Catarina (Figura 13 - Trecho analisado (destacado em azul)). A via é composta de duas faixas de tráfego com largura de 7,3 metros (RIBAS, 2013).

Figura 13 - Trecho analisado (destacado em azul)



Fonte: Google Maps (2015).

### 3.3. Constituição atual do trecho analisado

Atualmente o trecho analisado da rodovia BR-282 é constituído de quatro camadas. A Tabela 5 apresenta o módulo de elasticidade efetivo, o material constituinte e a espessura de cada uma dessas camadas. A camada de revestimento é constituída de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), atualmente o material possui a denominação de Concreto Asfáltico, o material é normatizado pela norma DNIT 031/2006 - ES.

Tabela 5 - Constituição atual do pavimento

Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo de elasticidade efetivo (MPa)	Módulo de elasticidade (psi)
Revestimento	CBUQ	10	840	12.1831,10
Base	Brita com areia	15	50	7.251,90
Sub-base	Macadame seco	17	35	5.076,30
Reforço	Saibro arenoso amarelo	19	40	5.801,50
Subleito	Saibro arenoso rosa	Infinito	90	13.053,30

Fonte: Ribas (2013).

A camada de reforço com espessura de 19 centímetros será mantida no dimensionamento do pavimento perpétuo. Será adotado como espessura total do pavimento existente o somatório da camada de revestimento, base e sub-base.

#### 3.4. Número N

Foi realizado o levantamento de carregamento ao qual o pavimento estará propenso a receber nos 50 anos de serviço. O Manual de Estudos de Tráfego (Brasil, 2006a) apresenta uma tabela completa da divisão adotada no Brasil para os tipos de veículos pesados (ônibus e caminhões). No entanto o *software* PerRoad 3.5 leva em consideração apenas alguns modelos de veículos que são os seguintes: ônibus (somatório dos tipos 2C, 3C e 4C do manual brasileiro) e os caminhões 2C (16), 2C (22), 3C, 2S2, 3S2, 3S3, 2C2, 3C2 e 3C3.

Para transformar esses dados de tráfego misto em um equivalente de operações de um eixo padrão (8,2tf) aplicaram-se os Fatores de Equivalência de Carga (FC) desenvolvidos pela *United States Army Corps of Engineers* (USACE) (Ribas, 2013).

De acordo com Ribas (2013) calculou-se então o fator veículo (FV) utilizando-se dos coeficientes de equivalência de carga por eixo e a composição do tráfego. Com a utilização da Equação 2 calcula-se o número N:

$$N_a = 365 \times VMDA \times FV \quad (2)$$

Em que:

$N_a$  = número de repetições de uma carga do eixo padrão de 8,2tf pelo período de 1 ano.

VMDA = Volume Médio Diário Anual de veículos.

FV = Fator Veículo.

Por causa da Resolução Contran nº 104/2009 será realizado um aumento de 7,5% na carga dos veículos pelo fato de gerar um cenário mais real para o dimensionamento.

Foi adotado este critério tendo em consideração que não há controle de peso neste trecho. Assim, os veículos de carga tendem trafegar com a carga superior à carga legal.

A Tabela 6 mostra o cálculo dos fatores de veículo (FVs) para o tráfego no ano de projeto.

Tabela 6 - Volume Médio Diário Anual de 2009

Contagem classificatória do tráfego			FV USACE		
Veículo tipo	VMD	Composição	Individual	Ponderado	
Ônibus	2c	87	4,84%	5,542	0,2682
	3c	18	1,00%	3,962	0,0397
	4c	3	0,17%	4,333	0,072
Caminhão	2c (16)	553	30,76%	5,542	1,7047
	2c (22)	399	22,19%	5,914	1,3124
	3c	560	31,15%	13,082	4,0744
	2s2	31	1,72%	18,253	0,3157
	3s2	82	4,56%	25,792	1,1763
	3s3	60	3,34%	25,547	0,8525
	2c2	4	0,22%	15,884	0,0353
	3c2	0	0,00%	23,423	0,0000
	3c3	1	0,06%	30,963	0,0172
<b>Total</b>	<b>1798</b>	<b>100,00%</b>	<b>FV total</b>	<b>9,803</b>	

Fonte: DNIT (2009) apud Ribas (2013).

Tabela 7 apresenta o número N encontrado levando em consideração um crescimento de 3% na taxa de veículos que irão trafegar na via e também o número N acumulado durante os 50 anos de projeto. Foi levado em consideração o tempo de um ano para o projeto e outro ano até o término das obras, considerando assim o ano de 2017 como sendo o primeiro ano de abertura ao tráfego no trecho analisado da BR-282.

Tabela 7 - Projeção de tráfego nos 50 anos de serviço

Ano	VMDA	N ano	N acumulado	Ano	VMDA	N ano	N acumulado
-----	------	-------	-------------	-----	------	-------	-------------

2017	2.278	8,14E+06	3,84E+07	2042	4.769	1,70E+07	1,70E+07
2018	2.346	8,39E+06	4,68E+07	2043	4.912	1,75E+07	3,46E+07
2019	2.416	8,64E+06	5,54E+07	2044	5.059	1,81E+07	5,27E+07
2020	2.489	8,90E+06	6,43E+07	2045	5.211	1,86E+07	7,13E+07
2021	2.564	9,17E+06	7,35E+07	2046	5.367	1,92E+07	9,05E+07
2022	2.640	9,44E+06	8,30E+07	2047	5.528	1,97E+07	1,10E+08
2023	2.720	9,73E+06	9,27E+07	2048	5.694	2,03E+07	1,30E+08
2024	2.801	1,00E+07	1,02E+08	2049	5.865	2,09E+07	1,51E+08
2025	2.885	1,03E+07	1,13E+08	2050	6.041	2,16E+07	1,73E+08
2026	2.972	1,06E+07	1,23E+08	2051	6.222	2,22E+07	1,95E+08
2027	3.061	1,09E+07	1,34E+08	2052	6.409	2,29E+07	2,18E+08
2028	3.153	1,12E+07	1,45E+08	2053	6.601	2,36E+07	2,42E+08
2029	3.247	1,16E+07	1,57E+08	2054	6.799	2,43E+07	2,66E+08
2030	3.345	1,19E+07	1,69E+08	2055	7.003	2,50E+07	2,91E+08
2031	3.445	1,23E+07	1,81E+08	2056	7.213	2,58E+07	3,17E+08
2032	3.549	1,27E+07	1,94E+08	2057	7.430	2,65E+07	3,43E+08
2033	3.655	1,30E+07	2,07E+08	2058	7.653	2,73E+07	3,71E+08
2034	3.765	1,34E+07	2,21E+08	2059	7.882	2,82E+07	3,99E+08
2035	3.878	1,38E+07	2,35E+08	2060	8.119	2,90E+07	4,28E+08
2036	3.994	1,42E+07	2,49E+08	2061	8.362	2,99E+07	4,58E+08
2037	4.114	1,47E+07	2,64E+08	2062	8.613	3,08E+07	4,89E+08
2038	4.237	1,51E+07	2,79E+08	2063	8.872	3,17E+07	5,21E+08
2039	4.364	1,56E+07	2,94E+08	2064	9.138	3,26E+07	5,53E+08
2040	4.495	1,60E+07	3,10E+08	2065	9.412	3,36E+07	5,87E+08
2041	4.630	1,65E+07	3,27E+08	2066	9.694	3,46E+07	6,22E+08

Fonte: Autoria própria (2015).

Em que:

VM DA = Volume Médio Diário Anual.

### 3.5. MÉTODO

### 3.6. Dimensionamento de um trecho de uma rodovia com conceitos de um Pavimento Perpétuo

Para a realização do dimensionamento do pavimento perpétuo foi utilizada uma ferramenta computacional para análise da deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica e para obter uma configuração de pavimento com vida útil de 50 anos. Esta estrutura foi dimensionada de modo que as camadas do pavimento não apresentem danos estruturais. Apenas a camada de desgaste (revestimento) deverá sofrer intervenções periódicas.

Com o resultado do dimensionamento do pavimento perpétuo será realizada uma comparação da quantidade de material utilizado para a execução (construção) dos 8.180 metros da rodovia para os dois métodos de dimensionamento e outra comparação levando em conta um horizonte de tempo de 50 anos e assim comparar a quantidade de material utilizado para construir e reconstruir, no caso do pavimento tradicional, e construir e realizar manutenções da camada de revestimento para o pavimento perpétuo.

### 3.7. Programa PerRoad 3.5 para o Dimensionamento de um Pavimento Perpétuo

Desenvolvido por David H. Timm da universidade de Auburn nos Estados Unidos da América, o programa PerRoad 3.5 possui distribuição gratuita pela *American Pavement Alliance*.

De acordo com o *Asphalt Pavement Alliance* o programa PerRoad utiliza a filosofia do método empírico-mecanicista para o dimensionamento de pavimentos. O programa une a análise elástica das camadas com uma análise estatística para estimar assim a tensão e deformação em um pavimento.

O programa necessita da entrada de dados fornecidos pelo usuário. Um desses dados refere-se às informações sazonais (duração de cada estação do ano), no qual será utilizado somente o verão para simplificação. Outro dado a ser inserido refere-se à estrutura do pavimento como: número de camadas, tipo de material utilizado em cada camada, grau de desempenho, módulo de resistência do material, coeficiente de Poisson e a espessura da camada. A Figura 14 apresenta a tela de entrada dos dados referenciados.

Figura 14 – Informações estruturais e sazonais

Structural and Seasonal Information (F1 for Help)

# of Layers:  2,  3,  4,  5

Seasonal Information:  Summer,  Fall,  Winter,  Spring,  Spring2, Current Season: Summer

Duration (weeks): Summer: 26, Fall: 8, Winter: 12, Spring: 6, Spring2: 0

Mean Air Temperature, F: Summer: 70, Fall: 70, Winter: 70, Spring: 70, Spring2: 70

Temperature Correction

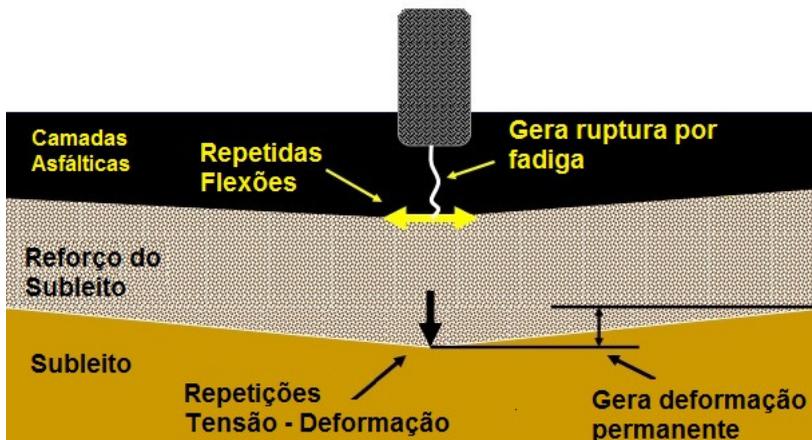
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Material Type	AC	Soil	Soil	Soil	Soil
PG Grade	70 -22				
Min Modulus (psi)	50000	3000	3000	3000	3000
Modulus (psi)	522958	12000	12000	12000	12000
Max Modulus (psi)	4000000	40000	40000	40000	40000
Poisson's Ratio	0.35	0.45	0.45	0.45	0.45
Min - Max	0.15 - 0.4	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5
Thickness (in)	10	999	999	999	Infinite
	Variability	Variability	Variability	Variability	Variability
	Performance Criteria				

Cancel Changes Accept Changes

Fonte: Programa PerRoad 3.5.

É necessário ainda informar os critérios de desempenho de cada camada, o que no caso do pavimento perpétuo será o controle da deformação horizontal na base das camadas asfálticas (no valor de  $-70$  *microstrain*) e a tensão vertical de compressão na base da camada de reforço do subleito ( $+200$  *microstrain*) conforme apresentado na Figura 15 (ROSENBERGER; ZURAT; COMINSKY, 2006).

Figura 15 - Representação dos critérios de rupturas adotados



Adaptado de: Thompson (2006).

O *software* adota como parâmetro o sinal negativo para identificar a tração e o sinal positivo para a compressão. A Figura 16 apresenta o local para inserção dos critérios de desempenho.

Figura 16 – Critérios de rupturas

Position	Criteria	Threshold	Transfer Function	k1	k2
<input type="checkbox"/> Top					
<input type="checkbox"/> Middle					
<input checked="" type="checkbox"/> Bottom	Horizontal Strain	-70	microstrain		

Note: The following sign convention is used...  
 Negative = Tension  
 Positive = Compression  
 Deflection is Positive Downward

Note: The transfer functions are for strain only.

Fonte: Programa PerRoad 3.5.

A última entrada de dado necessária é referente às condições de carregamento ao qual o pavimento estará sujeito durante a sua vida. Nesse caso há a possibilidade da utilização de características pré-definidas de carregamento que dependem do uso que o pavimento terá

(estrada rural ou urbana). Neste estudo foram usados dados coletados para o trecho avaliado da BR-282 por Ribas (2013).

Para a comparação das estruturas foram utilizados os dados levantados em campo referentes ao tráfego existente na BR-282. Para o cálculo do carregamento gerado pelo tráfego o *software* requer a informação do Volume Médio Diário Anual (VMDA) do ano de abertura, que será em 2017, e a taxa de crescimento do tráfego por ano. Na Figura 17 e Fonte: Programa PerRoad 3.5.

Figura 18 estão indicados os locais em que são inseridas as informações referentes à distribuição por tipo de veículos.

Figura 17 – Dados do carregamento

Loading Conditions (F1 for Help)

---

**General Traffic Data**

Two-Way AADT:       % Trucks:       % Trucks in Design Lane:  %  
 Axles Groups / Day:       % Truck Growth:       Directional Distribution:  %

---

**Loading Configurations (Check All That Apply)**

 Single  %     
   Tandem  %     
   Tridem  %     
   Steer  %     
 Current Configuration:

---

**Current Axle Load Distribution**

Axle Wt kip	% Axles								
0-2	<input type="text" value="0"/>	24-26	<input type="text" value="0"/>	48-50	<input type="text" value="0"/>	72-74	<input type="text" value="0"/>	96-98	<input type="text" value="0"/>
2-4	<input type="text" value="0"/>	26-28	<input type="text" value="0"/>	50-52	<input type="text" value="0"/>	74-76	<input type="text" value="0"/>	98-100	<input type="text" value="0"/>
4-6	<input type="text" value="0"/>	28-30	<input type="text" value="0"/>	52-54	<input type="text" value="0"/>	76-78	<input type="text" value="0"/>	100-102	<input type="text" value="0"/>
6-8	<input type="text" value="0"/>	30-32	<input type="text" value="0"/>	54-56	<input type="text" value="0"/>	78-80	<input type="text" value="0"/>	102-104	<input type="text" value="0"/>
8-10	<input type="text" value="0"/>	32-34	<input type="text" value="0"/>	56-58	<input type="text" value="0"/>	80-82	<input type="text" value="0"/>	104-106	<input type="text" value="0"/>
10-12	<input type="text" value="0"/>	34-36	<input type="text" value="0"/>	58-60	<input type="text" value="0"/>	82-84	<input type="text" value="0"/>	106-108	<input type="text" value="0"/>
12-14	<input type="text" value="0"/>	36-38	<input type="text" value="0"/>	60-62	<input type="text" value="0"/>	84-86	<input type="text" value="0"/>	108-110	<input type="text" value="0"/>
14-16	<input type="text" value="0"/>	38-40	<input type="text" value="0"/>	62-64	<input type="text" value="0"/>	86-88	<input type="text" value="0"/>	110+	<input type="text" value="0"/>
16-18	<input type="text" value="0"/>	40-42	<input type="text" value="0"/>	64-66	<input type="text" value="0"/>	88-90	<input type="text" value="0"/>		
18-20	<input type="text" value="0"/>	42-44	<input type="text" value="0"/>	66-68	<input type="text" value="0"/>	90-92	<input type="text" value="0"/>	Total	<input type="text" value="0"/>
20-22	<input type="text" value="0"/>	44-46	<input type="text" value="0"/>	68-70	<input type="text" value="0"/>	92-94	<input type="text" value="0"/>		
22-24	<input type="text" value="0"/>	46-48	<input type="text" value="0"/>	70-72	<input type="text" value="0"/>	94-96	<input type="text" value="0"/>		

---

Fonte: Programa PerRoad 3.5.

Figura 18 - Distribuição por tipo de veículo

Vehicle Type Distribution (Press F1 for Help)

Roadway Functional Classification: Rural Interstate

Vehicle Classification	% AADTT	Average Number of Axles Per Vehicle		
		Single	Tandem	Tridem
 4	1.2	1.62	0.39	0
 5	9.4	2	0	0
 6	3.3	1.02	0.99	0
 7	0.5	1	0.26	0.83
 8	7.4	2.38	0.67	0
 9	68.9	1.13	1.93	0
 10	1.2	1.19	1.09	0.89
 11	6.1	4.29	0.26	0.06
 12	0.8	3.52	1.14	0.06
 13	1.2	2.15	2.13	0.35
Total	100			

Cancel Changes      Accept Changes

Fonte: Programa PerRoad 3.5.

Com os dados de entrada para alimentar o programa, este estará apto a realizar o dimensionamento do pavimento e retornar o tempo esperado de vida conforme as espessuras, carregamentos e critérios de desempenho escolhidos (Figura 19).

Figura 19 - Resultados

Output & Design Module (F1 for Help)

Reliability Analysis

Perform Analysis

Perpetual Pavement Design Results

Thickness Design Studio

Number of Pavement Layers: 2

	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Material	AC	Soil	Soil	Soil	Soil
Thickness, in.	10	999	999	999	Infinite

Disclaimer Cost Analysis Export Data Leave Module

Fonte: Programa PerRoad 3.5

Para calcular os resultados desejados, um pavimento cuja estrutura tenha vida útil de 50 anos, o *software* realizará uma simulação de Monte Carlo, que consiste em incorporar variabilidade nos dados de entrada (padrão do PerRoad consiste em realizar 5000 combinações dessas variações) para que o resultado seja o mais realista possível. A resposta do *software* consiste em avaliar a quantidade de combinações encontradas para um dado carregamento que acarretou em um dano acumulado de 0,1 (10%) à estrutura utilizando como parâmetro os critérios de ruptura determinados (deformação horizontal e tensão vertical, por exemplo), e assim encontrar o tempo de vida útil que o pavimento possuirá (NEWCOMB, WILLIS e TIMM, 2002). A Figura 20 ilustra o dano acumulado de 10%.

Figura 20 - Dano a estrutura do pavimento em função dos critérios de ruptura



Fonte: Autoria própria.

### 3.8. Comparação entre modos de dimensionamento

De modo que tenha um tempo de vida de no mínimo 50 anos foram realizadas iterações nas espessuras das camadas no software PerRoad 3.5 até que se estabelece-se o resultado desejado para o tempo de vida do pavimento. O material contido no subleito foi mantido para a análise do pavimento perpétuo.

Foram realizados três cenários para as comparações, o primeiro cenário consiste em diminuir em 50% a espessura total do pavimento, que atualmente está em 42 centímetros. Não se alcançando a vida útil requerida o segundo cenário foi realizado, no qual a espessura atual do pavimento foi reduzida em 25%. Após a realização dos dois cenários ainda não foi possível adquirir um tempo de vida útil do pavimento de 50 anos, foram então realizadas alterações nas espessuras das camadas que compõe o pavimento até se chegar ao tempo de vida útil requerido.

### 3.9. Materiais que irão compor o pavimento perpétuo

O pavimento perpétuo dimensionado é composto por três camadas asfálticas, a camada de revestimento necessita ter uma resistência elevada a deformação permanente, por esse motivo foi realizada a escolha do concreto asfáltico CBCbP (Mistura *California*

*Department of Transportation* com CAP 30/45 e borracha portuguesa criogênica), na camada de base foi escolhido uma mistura com alto módulo de resistência, a BBB, uma mistura asfáltica convencional com CAP 50/70 e granulometria DNIT Faixa “C”. Para a última camada, a de sub-base, foi feita uma escolha de mistura que tivesse alta resistência à fadiga, e a mais adequada foi a mistura IBB15 (Mistura *Asphalt Institute* com betume tipo *terminal blend* com 15% de borracha. Na Tabela 8 são apresentadas as características de cada uma das misturas escolhidas.

Tabela 8 - Características dos materiais utilizados

Características	Mistura Asfáltica		
	CBCbP	BBB	IBB15
Módulo (MPa)	5.192	6.314	4.909
Modulo (psi)	753.036	915.768	711.990
Asfalto Base (CAP)	30/45	50/70	50/70
Borracha (%)	17	0	15
Asfalto (%)	8	5,5	7
Volume de vazios (%)	5	4	5

Fonte: Fontes (2009).

## 4. RESULTADOS

Com os materiais que irão compor a estrutura do pavimento perpétuo escolhidos, em função do controle das suas patologias, foi necessário definir a espessura de cada camada que formará a estrutura final do pavimento perpétuo para atingir uma vida útil de pelo menos 50 anos.

### 4.1. DIMENSIONAMENTO

Pelo fato do *software* PerRoad utilizar o método iterativo para o dimensionamento da estrutura do pavimento, foram definidos cenários para alcançar ao resultado desejado.

A lei de fadiga adotada para o dimensionamento do pavimento perpétuo foi a desenvolvida por Timm e Davis (2009), isto se deve ao fato que para pavimentos espessos, os ensaios de fadiga são realizados em modo de tensão controlada. No Brasil se utiliza deformação controlada porque os revestimentos apresentam pequena espessura (menor que 15 centímetros) e não se dispunha na literatura estes valores. As misturas asfálticas adotadas foram as desenvolvidas por Fontes (2009).

### 4.2. CENÁRIO 1

Na primeira análise foi realizada uma redução em 50% da espessura total do pavimento (camadas de revestimento, base e sub-base) que juntas possuem na estrutura existente na BR-282 um total de 42 centímetros. Com a redução proposta totalizou assim em uma estrutura de 21 centímetros de espessura.

Na Tabela 9 são apresentadas as espessuras adotadas das camadas com seus módulos de resistência em psi (unidade padrão para rigidez no *software*). A camada de base foi definida com uma espessura maior em relação as demais camadas devido ao material que a compõe por possuir o maior módulo de resistência, conduzindo a uma maior rigidez à estrutura do pavimento.

Tabela 9 - Estrutura do primeiro cenário

Camada	Material	Módulo (psi)	Espessura (cm)
Revestimento	CBCbP	753.036	5,10
Base	BBB	915.768	10,15
Sub-base	IBB15	711.990	5,75
Reforço	Saibro arenoso amarelo	5.801	19
Subleito	Saibro arenoso rosa	13.053	Infinito

Fonte: Autoria própria.

Com a estrutura limitada a 21 centímetros, o pavimento obteve uma vida útil de 18 anos de acordo com resultado obtido por meio do *software* PerRoad apresentados na Tabela 10. É possível observar que a deformação horizontal na base da camada da sub-base resultou em um dano acumulado de 0,1 (10%) na estrutura do pavimento. Essa deformação horizontal foi o que limitou a vida útil da estrutura do pavimento e por esse motivo, a camada de sub-base irá sofrer um acréscimo na sua espessura para o cenário 2. Com o resultado alcançado no cenário 1 a estrutura do pavimento não alcançou o tempo de vida útil almejado, não resultando assim em um pavimento perpétuo.

Tabela 10 - Resultados do 1º cenário

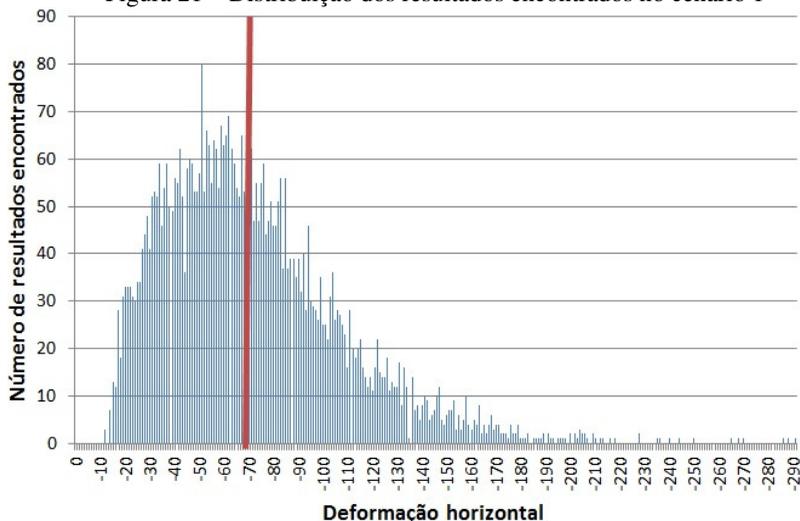
Critério de desempenho	Local de controle	Limite adotado ( <i>microstrains</i> )	A (%)	Tempo até dano acumulado = 0,1
Deformação Horizontal	Na base da camada de sub-base	-70	55,60	18 anos
Tensão vertical de compressão	Na base da camada de reforço do subleito	+200	72,12	Não encontrado

A = Porcentagem de resultados analisados pelo *software* que não ultrapassaram o limite adotado nos critérios de desempenho.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 21 é apresentada a distribuição dos resultados encontrados no dimensionamento para a deformação horizontal causada na estrutura. Os valores que estão localizados à direita da linha vermelha são os valores que ultrapassaram o limite adotado de -70 *microstrains* (limite de resistência a fadiga) para evitar o surgimento da fadiga na camada de sub-base, que no caso do 1º cenário representam 44,40% das iterações realizadas pelo *software*.

Figura 21 – Distribuição dos resultados encontrados no cenário 1



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3. CENÁRIO 2

Na segunda tentativa de se alcançar 50 anos de vida útil da estrutura do pavimento reduziu-se em 25% a espessura da estrutura original. Com a redução proposta, a estrutura que compôs o cenário 2 possui uma espessura total de 31,50 centímetros.

Devido ao resultado encontrado no 1º cenário houve a necessidade de acréscimo na espessura da camada de sub-base ocasionado pela ruptura precoce por fadiga aos 18 anos.

A Tabela 11 mostra a estrutura do pavimento para a realização do dimensionamento do cenário 2.

Tabela 11 – Estrutura do segundo cenário

Camada	Material	Módulo (psi)	Espessura (cm)
Revestimento	CBCbP	753.036	5,1
Base	BBB	915.768	13,7
Sub-base	IBB15	711.990	12,7
Refoço	Saibro arenoso amarelo	5.801	19
Subleito	Saibro arenoso rosa	13.053	Infinito

Fonte: Autoria própria.

Com a estrutura mais “robusta” em comparação à estrutura do primeiro cenário foi possível se chegar a um tempo de vida útil de 76 anos (espessura de 31,50 centímetros). No entanto um tempo de vida útil muito elevado como o alcançado é econômica e ambientalmente desfavorável devido a grande imprevisibilidade, tanto de tráfego quanto da utilidade da via. Na Tabela 12 são mostrados os resultados alcançados utilizando-se a estrutura proposta para o segundo cenário.

Tabela 12 – Resultados do segundo cenário

Critério de desempenho	Local de controle	Limite adotado ( <i>microstrains</i> )	A (%)	Tempo até dano acumulado = 0,1
Deformação Horizontal	Na base da camada de sub-base	-70	91,90	76 anos
Tensão vertical de compressão	Na base da camada de reforço do subleito	+200	96,70	Não encontrado

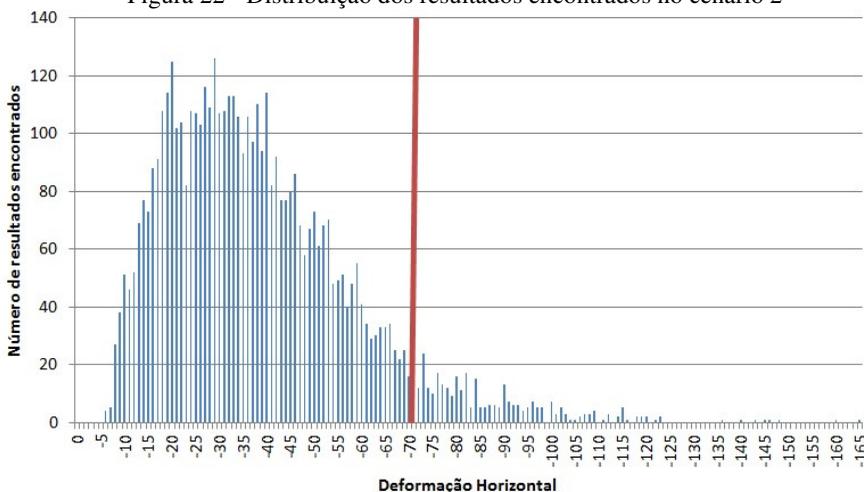
A = Porcentagem de resultados analisados pelo *software* que não ultrapassaram o limite adotado nos critérios de desempenho.

Fonte: Autoria própria.

O aumento provocado na espessura da camada de sub-base da estrutura resultou em uma eliminação, quase que completa, dos resultados que ultrapassaram os *-70 microstrains* adotados para o limite da deformação horizontal. E igualmente ao ocorrido no primeiro cenário a tensão vertical de compressão, limitada a *+200 microstrains*, não foi relevante ao dimensionamento do tempo de vida útil do pavimento.

A Figura 22 - Distribuição dos resultados encontrados no cenário 2 mostra a distribuição dos resultados obtidos através das iterações realizadas pelo *software* PerRoad. Diferentemente do gráfico de distribuição do cenário 1, o gráfico do cenário 2 apresenta apenas 8,10% de resultados que ultrapassaram o limite de resistência à fadiga.

Figura 22 - Distribuição dos resultados encontrados no cenário 2



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4. CENÁRIO 3

Para chegar à vida útil do pavimento em 50 anos foi necessário realizar alterações nas espessuras das camadas constituintes do pavimento levando em consideração o resultado obtido no cenário número dois. Com isso foram realizadas diminuições nas camadas de base e sub-base do pavimento até se chegar ao tempo desejado de vida útil da estrutura.

A Tabela 13 apresenta as camadas e suas espessuras do pavimento perpétuo. Foi desta forma obtida a estrutura que será comparada com a estrutura atual do trecho da rodovia BR-282.

Tabela 13 – Estrutura do terceiro cenário

Camada	Material	Módulo (psi)	Espessura (cm)
Revestimento	CBCbP	753.036	5,1
Base	BBB	915.768	10,7
Sub-base	IBB15	711.990	11,7
Refoço	Saibro arenoso amarelo	5.801	19
Subleito	Saibro arenoso rosa	13.053	Infinito

Fonte: Autoria própria.

A estrutura definitiva resultou em uma estrutura de 27,50 centímetros (revestimento, base e sub-base). A camada de revestimento não sofreu alterações devido ao fato da tensão vertical de compressão não ter ultrapassado o limite estabelecido. Com isso foi realizado uma pequena diminuição nas camadas de base e sub-base em comparação à estrutura utilizada no cenário 2 e essa diminuição reduziu em 27 anos o tempo de vida útil do pavimento.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados finais encontrados para o dimensionamento do pavimento perpétuo.

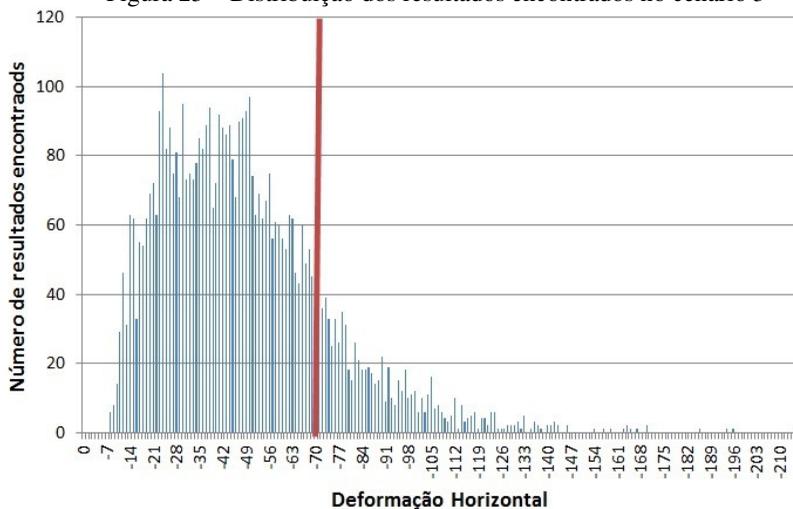
Tabela 14 – Resultados do terceiro cenário

Critério de desempenho	Local de controle	Limite adotado ( <i>microstrains</i> )	A (%)	Tempo até dano acumulado = 0,1
Deformação Horizontal	Na base da camada de sub-base	-70	82,96	50 anos
Tensão vertical de compressão	Na base da camada de reforço do subleito	+200	92,12	Não encontrado

Fonte: Autoria própria.

O resultado do dimensionamento final da estrutura do pavimento perpétuo que alcançou a marca dos 50 anos de vida útil foi encontrado 17,04% de iterações que ultrapassaram o limite de resistência à fadiga (estabelecido), conforme apresentado na Figura 23.

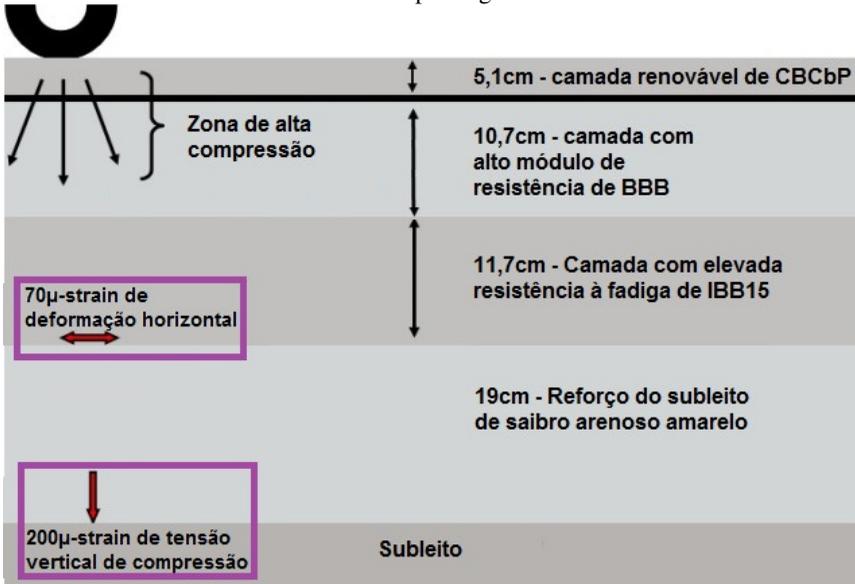
Figura 23 – Distribuição dos resultados encontrados no cenário 3



Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 apresenta a estrutura final encontrada do pavimento perpétuo com vida útil de 50 anos e também apresenta a localização dos critérios de controle patologias utilizados no dimensionamento da estrutura.

Figura 24 - Estrutura final do pavimento perpétuo e os critérios adotados para controle de patologias



Fonte: Adaptado de Walubita e Scullion (2010).

#### 4.5. COMPARAÇÃO DAS ESTRUTURAS

A estrutura resultante do cenário 3 aliada a uma correta aplicação de técnicas construtivas e o monitoramento das condições da camada de revestimento para a realização das reabilitações no tempo adequado irão conferir a esta estrutura a vida útil de 50 anos.

Comparando a estrutura do pavimento perpétuo resultante à estrutura existente atualmente no trecho da rodovia BR-282 observou-se que houve uma redução de 35% no somatório das espessuras das camadas de revestimento, base e sub-base. Essa redução na espessura da estrutura se deu pelo uso do asfalto nas três camadas, o que conferiu uma maior rigidez a estrutura.

Na Tabela 15 é apresentada uma comparação entre as duas estruturas, suas camadas e os materiais constituintes. A maior variação de espessura na comparação das duas estruturas foi encontrada na camada de revestimento, isso se deve ao fato de que no pavimento perpétuo a camada de revestimento exerce a função de camada de desgaste.

Tabela 15 - Comparação entre as estruturas

Estrutura	Pavimento existente		Pavimento perpétuo		Variação na espessura
	Material	Espessura	Material	Espessura	
Revestimento	CBUQ	10	CBCbP	5,10	49%
Base	Brita com areia	15	BBB	10,70	29%
Sub-base	Macadame seco	17	IBB15	11,70	31%
Reforço do subleito	Saibro arenoso amarelo	19	Saibro arenoso amarelo	19	0%
Subleito	Saibro arenoso rosa	Infinito	Saibro arenoso rosa	Infinito	

Fonte: Autoria própria.

Com a obtenção da estrutura do pavimento perpétuo foi realizada uma comparação entre o volume de material desprendido para a execução dessa estrutura com o material utilizado na estrutura existente da BR-282. A Tabela 16 apresenta o volume de material utilizado em cada situação. A tabela mostra que a pavimentação perpétua utiliza menos volume de material para sua construção. No entanto a Tabela 17 mostra que para executar o pavimento perpétuo utilizaria 70% a mais de cimento asfáltico de petróleo para os 8.180 metros de extensão da via.

Tabela 16 - Material utilizado (m<sup>3</sup>)

Camada	Pavimento existente	Pavimento Perpétuo
Revestimento	5.971,40	3.045,41
Base	8.957,10	6.389,40
Sub-base	10.151,38	6.986,54
Total	25.079,88	16.421,35

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 - Volume de CAP utilizado (m<sup>3</sup>)

Pavimento existente				Pavimento perpétuo		
Estrutura	Material	% CAP	Volume (m <sup>3</sup> )	Material	% CAP	Volume (m <sup>3</sup> )
Revestimento	CBUQ	5,50%	328,43	CBCbP	8,00%	243,63
Base	Brita com areia	0%	0	BBB	5,50%	351,42
Sub-base	Macadame seco	0%	0	IBB15	7,00%	489,06
Total			328,43	Total		1084,11

Fonte: Autoria própria.

Utilizando o horizonte de projeto de 50 anos para avaliar o total material desprendido para a realização de ambas as estruturas verificou-se que a estrutura tradicional, com horizonte de projeto de 10 anos, utilizou 4,91 vezes mais material em volume do que a pavimentação perpétua utilizaria, conforme resultado apresentado na Tabela 18. Utilizou-se o período reabilitação como sendo 13 anos, pois é o mínimo necessário para que um pavimento perpétuo atinja a idade para a premiação oferecida pela *Asphalt Pavement Alliance*. Não foi levado em consideração o material utilizado para a execução da camada de reforço do subleito devido ao material estar contido igualmente em ambas as estruturas.

Tabela 18 - Volume utilizado de material no horizonte de 50 anos (m<sup>3</sup>)

Serviço	Linha do tempo (anos)	Pavimento existente	Pavimento Perpétuo
Construção	0	25.079,88	16.421,35
Reconstrução	10	25.079,88	0,00
Recapeamento	13	0,00	3.045,41
Reconstrução	20	25.079,88	0,00
Recapeamento	26	0,00	3.045,41
Reconstrução	30	25.079,88	0,00
Recapeamento	39	0,00	3.045,41
Reconstrução	40	25.079,88	0,00
Final da vida útil da estrutura de ambos os pavimentos aos 50 anos			
Total de Material utilizado		125.399,40	25.557,59

Fonte: Autoria própria.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um comparativo entre a estrutura de um pavimento dimensionado tradicionalmente, tempo de vida útil de 10 anos, com a estrutura de um pavimento perpétuo, com tempo de vida útil definida em 50 anos.

Para tanto foi escolhido um trecho da rodovia BR-282 o qual teve sua estrutura definida por Ribas (2013), e também se obteve o carregamento ao qual o pavimento perpétuo estará sujeito durante o seu período de vida útil.

Os materiais que constituem a estrutura do pavimento perpétuo foram definidos de forma a evitar o surgimento da fenda com origem na superfície e da ruína da estrutura por deformação permanente.

A estrutura do pavimento perpétuo foi então concebida tendo como limitação a deformação horizontal na base das camadas asfálticas em  $-70$  *microstrains* e a tensão vertical de compressão no topo da camada de reforço do subleito, limitada a  $+200$  *microstrains*.

Para a definição das espessuras das camadas que formaram a estrutura do pavimento perpétuo foi necessário realizar três cenários, o primeiro cenário supôs uma diminuição de 50% na espessura total do pavimento em comparação a estrutura original do trecho da BR-282. Essa redução gerou um pavimento com vida útil de 18 anos.

Não tendo sido alcançado o tempo de vida útil desejado, foi realizado a tentativa de diminuição em 25% da estrutura original do pavimento. Nesse cenário foi encontrado um período de vida útil da estrutura do pavimento em 76 anos, no entanto possuindo uma vida útil muito elevada. Por motivos de economia de material e de imprevisibilidade de utilização da via foi descartada a utilização dessa estrutura.

Na definição da estrutura final do pavimento foram realizadas diminuições na espessura das camadas da base e da sub-base do pavimento até o ponto de obter uma vida útil de 50 anos para a estrutura.

Tendo sido definida a estrutura do pavimento perpétuo, foi comparada a quantidade de cimento asfáltico de petróleo (em volume) utilizado para a execução de ambas as estruturas. Posteriormente foi realizada a comparação da quantidade de material (também em volume)

desprendido para manter as estruturas em funcionamento por um período de 50 anos.

Mesmo que para a aplicação dos conceitos de pavimentação perpétua na execução de pavimentos venha a aumentar o consumo de um material não renovável como o cimento asfáltico de petróleo, foi notória a diminuição na quantidade de outros materiais e mão de obra durante o seu período de vida útil. Essa diminuição refletirá no usuário tendo em conta o menor impacto de reabilitações estruturais que impedem a utilização da via, como também na redução do custo (capital privado ou público) em longo prazo.

Todos os objetivos propostos para o trabalho foram alcançados. Foi possível concluir que para se executar uma estrutura que tenha uma vida útil elevada, proposta para 50 anos, não necessariamente significa que deverá haver um acréscimo na sua espessura total.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por ser um assunto recente no cenário da pavimentação, é vital que haja uma continuidade na pesquisa do assunto. E para isso são expostas algumas ideias para trabalhos futuros:

- a) Realização de um estudo comparativo de custos na aplicação da pavimentação perpétua frente a pavimentação tradicional;
- b) O uso da pavimentação perpétua para pavimentar ruas de baixo volume de tráfego em cidades;
- c) Definição de constantes experimentais das curvas de fadiga para as misturas asfálticas mais utilizadas no Brasil utilizando o modo de tensão controlada.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução nº 19, de 11 de julho de 2005. Diário Oficial da União, Brasília, 13 de julho de 2005. Seção 1, p. 79-80.

AMINI, Amir A. et al. Life cycle cost comparison of highways with perpetual and conventional pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 13, n. 6, p. 553-568, 2012.

ASPHALT PAVEMENT ALLIANCE, Asphalt Pavement Alliance Perpetual Pavement Award Winners. Disponível em: <<http://www.asphaltroads.org/perpetual-pavement/award-winners/>>. Acesso em 06/05/2015.

ASPHALT PAVEMENT ALLIANCE, Asphalt Pavement Alliance Perpetual Pavement Award Winners. Disponível em: <<http://myemail.constantcontact.com/APA-Now-Accepting-2012-Perpetual-Pavement-Award-Nominations.html?soid=1109615552496&aid=vTX3Ub6JtC4>>. Acesso em 18/05/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15529: Asfalto borracha – Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2007.

BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, 1ª Edição PETROBRAS. ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e

Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Estudos de Tráfego. Rio de Janeiro, 2006a.

DNIT, Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2ª Edição. Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Ministério dos Transportes, Brasil, 2006.

DNIT, Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2ª Edição. Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Ministério dos Transportes, Brasil, 2006.

DNIT, Norma DNIT 005/2003 – TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia. 12 folhas. 06/08/2003.

DNIT, Norma DNIT 036/2006 – ES. Pavimentos flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de serviço. 14 folhas. 26/06/2006.

DNIT, Norma DNIT 111/2009 – EM. Pavimentação flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material. 6 folhas. 29/09/2009.

EL-HAKIM, Mohab Y.; TIGHE, S. L.; GALAL, Khaled A. Performance Prediction and Economic Analysis of Perpetual and Conventional Pavement Designs Using Mechanistic Empirical Methods. In: Proceedings Of The Fifty-Fourth Annual Conference Of The Canadian Technical Asphalt Association (Ctaa); Moncton, Nb November, 2009. 2009.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION et al. Long-Life asphalt pavements. Technical, 2007.

FLEXIBLE PAVEMENTS OF OHIO, Current News, volume 10. Disponível em:  
<[http://www.flexiblepavements.org/sites/www.flexiblepavements.org/files/ohio-asphalt-pdf/newsletter\\_16.pdf](http://www.flexiblepavements.org/sites/www.flexiblepavements.org/files/ohio-asphalt-pdf/newsletter_16.pdf)> . Acesso em 05 de maio de 2015.

FONTES, Liseane PTL. Otimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos. 2009.

MAHONEY, Joe P. Study of long-lasting pavements in Washington State. Transportation Research Circular, v. 503, p. 88-95, 2001.

NEWCOMB, David E. Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation. 2009.

NEWCOMB, David E.; BUNCHER, Mark; HUDDLESTON, Ira J. Concepts of perpetual pavements. Transportation Research Circular, v. 503, p. 4-11, 2001.

NEWCOMB, David E.; WILLIS, Richard; TIMM, David H. Perpetual asphalt pavements: A synthesis. 2010.

NUNN, Michael; FERNE, Brian W. Design and assessment of long-life flexible pavements. Transportation Research Circular, v. 503, n. 2001.12, p. 32-49, 2001.

PROWELL, B. D. et al. NCHRP Report 646: Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2010.

RIBAS, Cristine Yohana et al. Estudo comparativo entre as metodologias empírica e empírico-mecanicista de dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis: Um estudo de caso da rodovia BR-282/SC. 2013.

ROSENBERGER, Carlos E.; ZURAT, Thomas J.; COMINSKY, Ronald J. A Practical Look at Pennsylvania's Bradford Bypass - A Perpetual Pavement. Ohio University, 2006.

SANTERO, Nicholas J.; HARVEY, John; HORVATH, Arpad. Environmental policy for long-life pavements. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 16, n. 2, p. 129-136, 2011.

SENÇO, Wlastermiler. Manual de Técnicas de Pavimentação Vol. I- São Paulo-1997 Editora Pini, 1997.

SILVA, Paulo Fernando A. Manual de patologia e manutenção de pavimentos. PINI, 2008.

TAREFDER, Rafiqul A.; BATEMAN, Damien. Design of Optimal Perpetual Pavement Structure. *Journal of Transportation Engineering*, v. 138, n. 2, p. 157-175, 2010.

TERREL, Ronald L.; HICKS, R. Gary. Viability of Hot In-Place Recycling as a Pavement Preservation Strategy. Final report for Caltrans. California Pavement Preservation Center Report CP2, v. 106, 2008.

THOMPSON, M.; CARPENTER, S. H. Perpetual pavement design: An overview. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Perpetual Pavement*. 2009.

THOMPSON, Marshall R. Perpetual pavement design. Department of Civil Engineering University of Illinois, 2006.

TIMM, D. H.; DAVIS, K. P. Perpetual pavement design using MEPDG and PerRoad. In: *Proceedings for the International Conference on Perpetual Pavement*, Columbus, OH. 2009.

VON QUINTUS, Harold L. Hot-Mix Asphalt Layer Thickness Designs for Longer-Life Bituminous Pavements. *Transportation research circular*, n. 503, p. 66-78, 2001.

WALUBITA, Lubinda F.; SCULLION, Thomas. Texas Perpetual Pavements: New Design Guidelines. Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, 2010.