

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Junior Rodrigo Vicenzi

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA CALIFORNIANA DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM BASES
PERMEÁVEIS TRATADAS**

Porto Alegre
Dezembro 2019

JUNIOR RODRIGO VICENZI

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA CALIFORNIANA DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM BASES
PERMEÁVEIS TRATADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito

Porto Alegre
Dezembro 2019

JUNIOR RODRIGO VICENZI

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIA CALIFORNIANA DE
DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM BASES
PERMEÁVEIS TRATADAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)
Ph.D. pela University of Nottingham
Orientador

Marlova Grazziotin Johnston (UFRGS)
Dra. pela Universidade do Rio Grande do Sul
Co-orientadora

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. William Fedrigo (UFRGS)
Dr. pela Universidade do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho às minhas avós Liria e Anita (*in memoriam*), pela inspiração que me proporcionaram para chegar a este momento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, sem os quais nenhuma das minhas conquistas até hoje teriam sido possíveis. Agradeço principalmente quanto ao apoio financeiro, o qual foi fundamental para a concretização e consolidação do objetivo de finalizar minha graduação. Me orgulha estar tão próximo de um título de engenheiro, conquista que não é só minha, é deles também.

Agradeço meus professores do ensino médio do Instituto Estadual de Educação Assis Brasil da minha querida cidade de David Canabarro, especialmente meu professor Genuir Luiz Marchezi, quem me incentivou a buscar uma vaga em universidades federais e me mostrou que era possível e que eu tinha condições. Tudo se iniciou com essas motivações.

Ao meu orientador Lélío e co-orientadora Marlova, não só pelo trabalho, mas também pelo suporte oferecido ao longo dos anos em que permaneci no LAPAV através do incrível programa PETER, o qual me orgulho muito por ter participado, afinal, foi meu primeiro contato com a engenharia fora das salas de aula. Foi com eles que fiz meu processo seletivo de ingresso ao PETER e é uma satisfação tê-los em minha banca de TCC.

À Construtora Tenda, principalmente nas figuras dos engenheiros Artur Ozelame e Ricardo Fischer, que tiveram grande contribuição na minha passagem pela empresa. Pude aprender muito e ter uma experiência incrível muito pela assistência e confiança deles. Estendo meu agradecimento aos queridos amigos que fiz na empresa, meus amigos de vida do “Flores”, que tiveram da mesma forma uma enorme contribuição nesta jornada.

Aos meus colegas e amigos do curso de engenharia civil da UFRGS, que foram nessa trajetória a minha família aqui em Porto Alegre. Obrigado pela ajuda incondicional, carinho e parceria, isso foi fundamental para mim. Consegui chegar até aqui muito por toda contribuição deles.

Por fim, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, nas figuras dos professores e funcionários em geral. Me orgulha muito ter realizado minha graduação numa universidade com um ensino de excelência e gratuito. É imensurável a mudança que esta instituição proporcionou em minha vida, seja pessoal ou profissional. Fica meu eterno agradecimento e carinho.

Por mais que você encontre dificuldades pelo caminho,
não desista. Pois saiba que o campo da derrota não está
povoado de fracassos, mas de homens que tomaram
antes de vencer.

Abraham Lincoln

RESUMO

Este trabalho tem como motivação a aplicação de uma camada de base permeável tratada com emulsão (BPTE) nas obras de reparo da estrutura de rodagem do pavimento de um trecho da BR 116 entre as cidades gaúchas de Pelotas e Camaquã, restauração que ocorreu em 2011. A inserção desta solução ocorreu pelo excesso de defeitos estruturais e funcionais existentes na via devido a presença de água no interior do pavimento. Apesar da aplicação e dos bons resultados iniciais obtidos, com representativas reduções de valores de deflexão, não há uma caracterização de comportamento do material de uma BPTE para realização de dimensionamento a uma determinada vida útil de projeto. Para tanto, no trabalho, como mecanismo de estudo para bases permeáveis, realizou-se análises deste caso citado tendo como base os estudos e metodologia de dimensionamento de pavimentos do Departamento de Transportes da Califórnia (Método de Hveem), em que se faz uso de camadas permeáveis tratadas com ligante asfáltico (ATPB). Além do dimensionamento empírico por meio do Método de Hveem, realizou-se uma análise mecanística quanto à fadiga, apesar de se entender que o mecanismo de ruptura de uma camada permeável (como ocorre com a ATPB) é o *stripping* (perda de adesividade entre agregado e filme de ligante asfáltico), não havendo, neste caso, um mecanismo de previsão ou mesmo metodologia que aplique o dano por *stripping*. O fato de ser uma proposta de reabilitação de pavimento e a não realização de ensaios de caracterização dos materiais empregados fez com que se gerasse intervalos e diversos cenários de possíveis condições da seção tipo de dimensionamento (foram gerados 18 cenários). Gerando-se a estrutura representativa da seção, a determinação dos parâmetros empregados (materiais e tráfego), o dimensionamento pelo método de Hveem e a análise de fadiga; chegou-se a uma série de dados representativos possibilitando a realização de algumas análises e confirmação de hipóteses. Verificou-se que a camada permeável, dado seu alto volume de vazios, atinge a ruptura por fadiga precocemente. Ainda, foi possível quantificar o nível de fadiga que atinge uma camada de revestimento asfáltico (camada acima de uma base permeável) a uma dada condição de redução de rigidez da camada de base permeável (condição que pode ocorrer pela saturação da base em questão). Por fim tem-se uma síntese de recomendações absorvidas das revisões sobre ATPB para estudos e execuções de camadas permeáveis tratadas com emulsão.

Palavras-chave: Dimensionamento de pavimento. Base permeável. Emulsão asfáltica. Método Hveem. Fadiga.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: pilares para dimensionamento de pavimentos..	5
Figura 2: parâmetros avaliados na análise mecânica.....	10
Figura 3: estrutura original de projeto da rodovia BR 116 – Pelotas/Camaquã.....	12
Figura 4: estrutura proposta para restauração do pavimento.....	13
Figura 5: árvore representativa da estrutura de análise do estudo.....	15
Figura 6: interface programa CalFP-Web.	16
Figura 7: interface do programa AEMC.	17
Figura 8: fluxograma representativo do processo de análise.	20
Figura 9: gráfico de vida de fadiga para a BPTE de cada seção.	22
Figura 10: gráfico de vida de fadiga do revestimento asfáltico de cada seção.	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: valores de N adotados para cada nível de tráfego.	13
Tabela 2: parâmetros adotados para os materiais utilizados no dimensionamento.	14
Tabela 3: dimensionamento e análise de fadiga para a BPTE.	21
Tabela 4: dimensionamento e análise de fadiga para o revestimento asfáltico.	22
Tabela 5: tabela resumo das verificações de fadiga.	24

LISTA DE SIGLAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

AEMC - Análise Elástica de Múltiplas Camadas

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATPB - Asphalt Treated Permeable Base

BPTE – Base Permeável Tratada com Emulsão

CA – Concreto Asfáltico

CalME - Mechanistic–Empirical Program to Analyze and Design Flexible Pavement Rehabilitation

Caltrans - California Department of Transportation

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CT – California Test

MeDiNa - Método de Dimensionamento Nacional

PQM – Pré-Misturado a Quente

UCPRC – University of California Pavement Research Center

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USACE - US Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

AC – Teor de Ligante asfáltico em massa de agregado (%)

AV – Volume de Vazios da mistura (%)

CBR - California Bearing Ratio

CF – Climatic Factor

ε_v – Deformação Vertical

ε_t – Deformação de Tração

σ_v – Tensão Vertical

ESAL - Equivalent Standard Axle Load

GE – Gravel Equivalent

Gf – Gravel Factor

LDF – Lane Distribution Factor

M – Multiplicador de confiabilidade construção/ensaios laboratoriais

MR – Módulo de resiliência

N - Número equivalente de aplicações do Eixo Padrão

N_{fadiga} – Número de repetições do eixo-padrão para ruptura por fadiga (vida de fadiga)

$N_{fadiga,lab}$ – Vida de fadiga obtida via ensaios em laboratório

Ph – Pressão horizontal (kPa)

Pv – Pressão vertical (kPa)

R – Valor de resistência (R-Value)

SF – Shift Factor

t – Espessura de camada do pavimento (cm)

TCF – Temperature Correction Factor

TI – Traffic Index

z – Fator que depende da confiabilidade do projeto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTUDOS DA ATPB NA CALIFÓRNIA - EUA	3
3. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	5
3.1 Métodos empíricos	5
<i>3.1.1 Método de Hveem.....</i>	<i>6</i>
3.2 Análise mecânica de pavimentos	9
4. DADOS E METODOLOGIA	11
4.1 Estrutura de pavimento adotada.....	11
4.2 Parâmetros adotados e proposta de análise	13
4.3 Método de Hveem - Ferramenta CalFP-Web	16
4.4 Análise Mecânica	16
<i>4.4.1 Ferramenta AEMC</i>	<i>17</i>
<i>4.4.2 Critério de análise.....</i>	<i>18</i>
4.5 Estrutura de análise.....	20
5. RESULTADOS	20
6. CONCLUSÕES.....	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal de um pavimento é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. O desempenho adequado do conjunto de camadas do pavimento relaciona-se à capacidade de suporte e durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de tráfego. O desafio de projetar um pavimento reside no fato, portanto, de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais (Bernucci *et al.*, 2010).

Em levantamentos de defeitos de trechos da BR 116, entre Pelotas e Camaquã, verificou-se a presença de um excesso de deformações perceptíveis na superfície em alguns pontos, além de altos valores de deflexão medidos em trilhas de roda. Após estes levantamentos de defeitos, executou-se um plano de investigação para realizar um diagnóstico da situação funcional do pavimento para subsidiar a definição de uma solução tecnicamente adequada.

Com a abertura de janelas de inspeções no pavimento, foi possível verificar as condições e estado dos materiais das camadas do pavimento. Nas análises, notou-se que apenas a camada mais superficial (revestimento asfáltico) se mantinha íntegra e que nas demais havia presente um excesso de umidade e deformações. Concluiu-se, assim, que grande parte dos defeitos quantificados neste pavimento decorria da presença da água nas camadas inferiores por elevação do lençol freático em longos períodos de chuvas, condição característica da região.

A presença de água no pavimento é uma condição totalmente indesejável pela capacidade de degradação que este fluido possui. Um pavimento pode ser estável a uma dada condição de umidade preconizada no início da construção (umidade ótima), mas se torna instável quando seus materiais constituintes se tornam saturados e sujeitos a elevadas cargas do tráfego. Neste caso, na presença de água livre no interior da estrutura, elevadas pressões neutras são desenvolvidas pela ação dinâmica das cargas do tráfego na superfície gerando saturação das camadas do pavimento. A maior evidência do efeito das forças hidrostáticas é o bombeamento do material fino presente sob o revestimento do pavimento para a superfície, efeito em que estas partículas de solo são deslocadas pela água formando vazios e causando trincamento da estrutura por fadiga.

Para contornar este tipo de problema, Lovering e Cedergren (1962) propôs o uso de uma camada

de material com granulometria aberta sob a superfície do concreto asfáltico para pavimentos flexíveis. Como forma de viabilizar a alternativa, os autores propuseram o tratamento com asfalto desta camada drenante, pois a composição, por contar com grande percentual de vazios, teria seu intertravamento comprometido o que não forneceria uma plataforma estável para o tráfego dos veículos.

No estado norte-americano da Califórnia, faz-se uso de bases permeáveis tratadas com asfalto (ATPB – *Asphalt Treated Permeable Base*) desde meados da década de 1980. Neste período foram desenvolvidos diversos estudos acerca do material, desde observações, ensaios laboratoriais e simulações computacionais de estruturas de pavimentação representativas.

Foi com essa inspiração de solução, que o corpo de engenharia responsável pelas obras de reparo e recuperação da BR 116 de Pelotas a Camaquã propôs utilizar, em 2011, uma base permeável sobre o antigo pavimento em trechos com significativos defeitos pela ação da água como citado anteriormente. Entretanto, diferentemente da solução californiana, que utilizou como agente estabilizante um ligante asfáltico, a empresa em questão propôs fazer uso de emulsão asfáltica para a estabilização da camada.

Apesar dos bons resultados nos monitoramentos iniciais quanto à redução de índices de deflexões na via em questão, e ser considerada uma alternativa promissora, esta base permeável não possui uma caracterização de comportamento para um dimensionamento a uma determinada vida útil de projeto. Para a aplicação citada na BR 116, foi utilizada uma espessura de camada padrão, empírica, sem um dimensionamento de pavimento conforme sua condição estrutural e demanda.

Diante deste cenário, o estudo em questão buscou dimensionar um pavimento com seção semelhante aos dos trechos da BR 116 que tiveram incorporação de base permeável tratada com emulsão asfáltica (BPTE) a fim de buscar o entendimento e avaliação do comportamento desta mistura através da criação de discussões e hipóteses para o caso citado. Para isso, foi considerado o método de dimensionamento do Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans – *California Department of Transportation*) para ATPB. Ademais, foi realizada uma análise mecânica do desempenho do pavimento frente à ruptura por fadiga, mecanismo de ruptura predominante em camadas asfálticas.

2. ESTUDOS DA ATPB NA CALIFÓRNIA - EUA

A filosofia que levou ao desenvolvimento de critérios para a aplicação de ATPB como uma camada de drenagem num pavimento na Califórnia foi baseada no trabalho realizado por Lovering e Cedergren (1962). Tal trabalho tentou mitigar, por meio de melhorias de drenagem, os problemas associados à presença de água em pavimentos quando submetidos a carga de tráfego. Embora o Caltrans utilize atualmente a ATPB seguindo as recomendações do trabalho citado, existem algumas diferenças significativas entre as atuais práticas e as recomendações originais (Harvey *et al.*, 1999).

Lovering e Cedergren (1962) assumiu que o material de drenagem tratado com asfalto não contribuiria para a capacidade estrutural do pavimento para fins de dimensionamento, não atribuindo assim, um valor estrutural à camada. Eles indicaram que a melhoria da capacidade estrutural viria de uma melhor drenagem, ao invés da rigidez do material de drenagem.

Da mesma forma, a filosofia original do Caltrans foi incluir uma camada de aproximadamente 75 mm de base permeável tratada com asfalto (ATPB) entre o revestimento e as camadas granulares de todos os novos pavimentos flexíveis, com o objetivo central de interceptar a água que entrasse no pavimento e transportá-la para longe do pavimento antes que houvesse saturação completa e fosse causados danos à estrutura. Na prática, no entanto, o Caltrans incluiu a ATPB como parte da estrutura da seção transversal de pavimentos de concreto asfáltico, atribuindo a este material um valor estrutural correspondente às suas propriedades e capacidade.

Para determinar o valor estrutural do material e observar o comportamento e desempenho da camada permeável quando inserida numa estrutura, foram realizados diversos estudos e ensaios laboratoriais de carga repetida, em pistas experimentais com simuladores de tráfego e até em trechos de pavimentos rodoviários monitorados no período de 1994 a 2000. O programa realizou estudos comparativos entre pavimentos que incluíam uma camada de ATPB (pavimentos "drenados") e os que continham apenas base granular (pavimentos "não drenados").

Os resultados das simulações, segundo Harvey *et al.* (1999), indicaram que os pavimentos drenados teriam vidas de serviço substancialmente mais longas comparando com os pavimentos não drenados. O desempenho dos pavimentos drenados contendo ATPB que foram imersos foi inferior ao desempenho de pavimentos em que a ATPB estava no estado seco. No entanto, as

performances das estruturas drenadas em ambas as circunstâncias ainda excederam as performances do não drenado.

Segundo Bejarano *et al.* (2003), o *stripping* (efeito de perda de adesividade entre filme de ligante asfáltico e agregado) da ATPB em 10 anos de construção não é incomum em pavimentos de concreto asfáltico. Esse fenômeno pode ser rápido e comum em locais onde grande quantidade de água entra na camada de ATPB. Nesses casos de saturação da camada permeável, foi verificado que o *rutting* (deformação permanente) na superfície foi o modo de falha predominante causado pelo *stripping* da ATPB. Para as seções não drenadas e testadas em estado seco, trinca por fadiga foi o modo de falha predominante identificado.

Os estudos descritos por Harvey *et al.* (1999) também sugerem que a ATPB pode permanecer saturada por um período de tempo significativo após um evento de chuva. Os resultados dos ensaios laboratoriais em amostras de ATPB saturadas mostraram reduções significativas no módulo resiliente e aumento das taxas de deformação permanente após imersão, bem como perda de coesão e adesividade em interfaces de partícula quando submetido ao carregamento repetido. Estimou-se, no trabalho, por meio de ensaios laboratoriais, valores médios de módulos de 1172 MPa para ATPB em estado “seco”, enquanto que 500 MPa para ATPB em estado “imerso”, o que representa uma redução de mais de 50% na rigidez.

Para que as camadas de drenagem sejam efetivas, conforme enfatizou Lovering e Cedergren (1962), é necessário que haja saídas de drenagem com capacidade de fluxo adequada na borda do pavimento. Os autores também enfatizaram que as saídas de drenagem devem ser mantidas ao longo do tempo para que não se tornem entupidas e criem um efeito de “banheira” na camada de drenagem.

Assim, segundo Harvey *et al.* (2000), é importante definir métodos para manter a capacidade de drenagem das camadas de ATPB. Para as ATPBs permanecerem eficazes como camadas drenantes, é necessário garantir que haja camadas de filtro adequadas adjacentes à ATPB para minimizar a intrusão de finos provindos das demais camadas.

3. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

O dimensionamento de um pavimento consiste basicamente na determinação de espessuras e escolha de materiais para múltiplas camadas que devem atender, simultaneamente, a aspectos estruturais e funcionais. Portanto, por definição, essas camadas de diferentes características que compõem o pavimento devem interagir da forma mais harmônica possível de modo a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego, melhorar as condições de rolamento e resistir aos esforços horizontais de modo a tornar mais durável a superfície de rolamento (Mattos, 2014).

Algumas das principais dificuldades encontradas no dimensionamento de um pavimento flexível são o conhecimento e entendimento dos principais parâmetros que afetam significativamente o comportamento estrutural, como tráfego, efeitos climáticos, materiais das camadas e previsão correta da vida útil. Os pilares do dimensionamento de um pavimento podem ser representados como na figura abaixo.

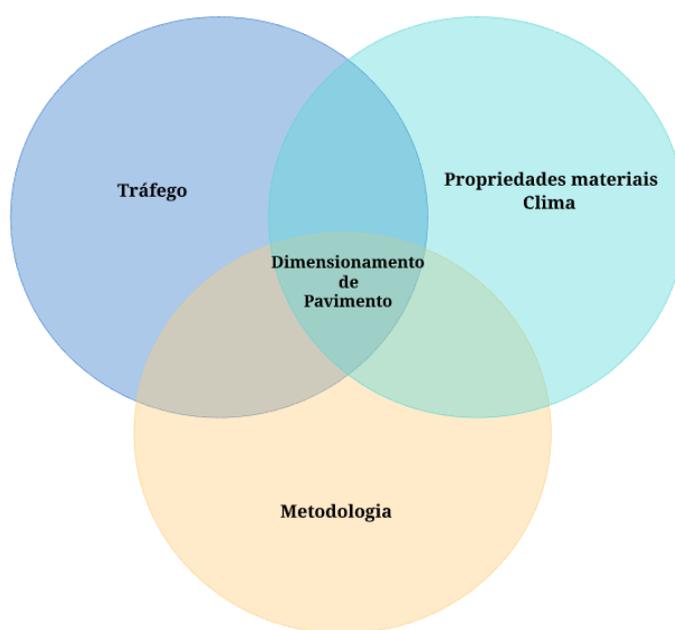


Figura 1: pilares para dimensionamento de pavimentos. (Fonte: autor).

3.1 Métodos empíricos

Os métodos mais antigos e difundidos para dimensionamento de pavimentos flexíveis são puramente empíricos. O precursor dessa abordagem foi o método baseado no Índice de Suporte Califórnia (CBR - *California Bearing Ratio*). Este método foi adaptado pelo Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (USACE - *US Army Corps of Engineers*) e conta com aplicações até hoje. No Brasil, por muito tempo se utilizou o método do Eng. Murillo

Lopes de Souza, baseado no método do CBR.

Em geral, os métodos empíricos requerem poucos dados de entrada como a capacidade de suporte do subleito e o tráfego estimado para o período de projeto. Esses métodos têm como critério básico a ruptura por cisalhamento do subleito e camadas granulares, o que garante a proteção do subleito contra a geração de deformações plásticas excessivas e o afundamento de trilhas de roda na superfície durante o período de projeto.

3.1.1 Método de Hveem

O método de dimensionamento de pavimentos empírico do Caltrans faz uso e estudos de ATPB desde os anos 1980, tendo caracterizado o comportamento estrutural e funcional desse material quando inserido numa estrutura multicamadas.

Conforme Caltrans (2018), os dados necessários para projetar um pavimento flexível utilizando o método empírico do Caltrans, comumente chamado de Método de Hveem ou R-Value, são o valor de resistência (R – *California R-Value*) e o Índice de Tráfego (TI - *Traffic Index*). Este dimensionamento é baseado em uma relação entre equivalência dos materiais estruturais do pavimento (GE - *gravel equivalent*), TI e valores R. Os parâmetros envolvidos no procedimento para determinada vida útil de projeto estão descritos abaixo.

Índice de Tráfego (TI - Traffic Index)

O TI é uma medida do número acumulado de carga equivalente de eixo padrão (ESAL (N) - *Equivalent Standard Axle Load*) esperados durante a vida útil do projeto da estrutura do pavimento. O TI pode ser obtido pela relação apresentada pela Equação (1).

$$TI = 9,0 \times \left(\frac{ESAL \times LDF}{10^6} \right)^{0.119} \quad (1)$$

em que TI: índice de tráfego para uma determinada vida útil do projeto;

ESAL (N): número equivalente de aplicações do eixo-padrão rodoviário durante a vida útil do projeto da estrutura do pavimento;

LDF: fator de distribuição de faixa.

O eixo-padrão rodoviário adotado equivale a um veículo com eixo simples de rodas duplas com 80 kN de carga. Também é considerada uma pressão de contato de 690 kPa, com distância

central de 300 mm entre as rodas duplas, conforme utilizado em Caltrans (2018) e descrito em UCPRC (2019). Já o LDF é um fator utilizado para considerar incertezas e variabilidade da distribuição de tráfego em rodovias com mais de uma faixa em cada sentido, sendo que para rodovias com apenas duas faixas (uma em cada sentido), o LDF adotado é 1.

Valor de resistência (R – California R-Value)

O valor R é uma medida de resistência dos solos à deformação sob carregamento em condições saturadas. Este parâmetro é utilizado para determinar o valor de suporte do subleito, base e sub-base. Os valores de R são obtidos no *California Test* (CT) 301, estando descrito também em AASHTO T 190-14. Este ensaio mede a resposta de uma amostra de solo ou agregado compactado a uma pressão aplicada verticalmente sob condições específicas. Outras agências norte-americanas adotaram o método de projeto de pavimentos da Califórnia e especificam os ensaios de valor de resistência para as camadas inferiores.

Neste procedimento, corpos de prova são submetidos a um carregamento em um molde de aço até que significativa umidade seja expelida atingindo-se um indicador de exsudação. Posteriormente, a amostra é saturada por 24 horas. Após, coloca-se o material em um equipamento chamado de *Stabilometer Hveem* para medir o valor de resistência (R). Neste equipamento, a amostra é submetida a um carregamento vertical a dada pressão especificada pelo procedimento, de forma que é medida uma pressão de resposta lateral pela deformação plástica causada pelo carregamento vertical. Como resultado, obtém-se uma relação que fornece uma indicação da resistência à deformação plástica do material, disposta em uma escala linear de 0 a 100, obtida de forma simples pela Equação (2). Nesta relação, a pressão lateral varia inversamente com a resistência interna do solo. Por exemplo, um valor R de 100 indica um material que não se deforma a uma carga vertical. Por outro lado, um valor R de 0 indica que o material não oferece resistência ao cisalhamento e se comporta como um líquido.

$$R = \left(1 - \frac{P_h}{P_v}\right) \quad (2)$$

em que R: valor de resistência do material;

P_h : pressão horizontal;

P_v : pressão vertical;

Vale citar que o valor R difere do CBR – parâmetro de resistência tradicionalmente conhecido

e utilizado no Brasil. Segundo Hashiro (2005), enquanto o CBR se baseia em uma falha de cisalhamento por penetração, o valor de R representa uma relação de deformação do material dado um carregamento (procedimento semelhante a um ensaio triaxial), de forma que o desempenho final do subleito é mais conservador e melhor aproximado por este método. Diversos estudos norte-americanos buscaram desenvolver, inclusive, correlações entre CBR e valor R, dado o maior custo e complexidade da aparelhagem utilizada pelo procedimento deste último parâmetro.

Típicos valores R utilizados pelo departamento variam de 5 para materiais muito moles e flexíveis a 80 para materiais de base tratados. Alguns materiais, como agregados grosseiros e areias, podem apresentar valores maiores que seria normalmente necessário para um subleito de um projeto de pavimento. Todavia, o valor R para solos do subleito, deve ser limitado a não mais que 50 (Caltrans, 2018).

Equivalência do material (GE– Gravel Equivalent)

O GE de cada camada, ou toda a estrutura flexível do pavimento, é a espessura equivalente de agregado (agregado da sub-base) que seria necessário para evitar deformação permanente nas camadas subjacentes devido ao tráfego cumulativo de cargas previstas durante a vida útil do projeto de um pavimento (Caltrans, 2018). A necessidade de GE de todo o pavimento flexível ou cada camada é calculada usando a Equação (3).

$$GE = 0,098 \times TI \times (100 - R) \times CF \quad (3)$$

em que GE: equivalência do material [cm];

TI: índice de tráfego;

R: valor de resistência;

CF: fator climático.

A demanda de GE de cada tipo de material usado na estrutura do pavimento flexível é determinada para cada camada estrutural, começando com a camada superficial e prosseguindo para as camadas inferiores até a base e a sub-base de acordo com a necessidade. Para pavimentos que incluem base e/ou sub-base, um fator de segurança de 6 cm é adicionado ao valor de GE para as camadas superficiais para compensar tolerâncias de construção. Este fator de segurança não se destina a aumentar o GE do pavimento geral, pois uma compensação da

espessura é subtraída da camada de sub-base (ou camada base, se não houver sub-base). Ao determinar o fator de segurança apropriado a ser adicionado, a ATPB deve ser considerada como parte da camada de superfície (Caltrans, 2018).

Fator de ponderação do material (Gf – Gravel Factor)

O *Gf* do material estrutural do pavimento é a capacidade de suporte relativa desse material comparado ao agregado de sub-base ($G_f = 1$). A espessura de cada camada estrutural de pavimento flexível é obtida dividindo o GE pelo *Gf* apropriado para o material da camada conforme a Equação (4).

$$t = \frac{GE}{G_f} \quad (4)$$

em que *t*: espessura da camada [cm];

GE: fator de equivalência do material [cm];

Gf: fator de ponderação do material.

Pelo Manual de Projeto de Estradas do Caltrans (*Highway Design Manual*; Caltrans, 2018) um *Gf* típico para uma base de pavimento da classe 2 (classificação equivalente a brita graduada simples) é 1,1. Para sub-bases, usa-se *Gf* igual a 1. Já para concretos asfálticos, o *Gf* fica entre 1,46 e 2,54. Para uma camada de ATPB, utiliza-se *Gf* de 1,4. Além disso, o manual prescreve que a espessura mínima de qualquer camada asfáltica não deve ser inferior a três vezes o tamanho de agregado máximo. A espessura mínima de um revestimento asfáltico não deve ser menor que 4,6 cm. Materiais de base e sub-base, exceto ATPB, devem ter uma mínima espessura de 10,7 cm.

3.2 Análise mecânica de pavimentos

A partir da década de 80, com o desenvolvimento de programas computacionais para análises de tensão e deformação e a capacitação de laboratórios para a realização de ensaios mais representativos das condições de campo, algumas empresas e departamentos começaram a contemplar análises mecânicas da estrutura para o refinamento do dimensionamento.

Os métodos mecânicos consideram o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas, analisando e utilizando as características resilientes dos materiais empregados no pavimento quando sujeitos à ação das cargas do tráfego e do clima. A partir da resposta estrutural obtida, é possível estimar o desempenho do pavimento através de funções de transferência

comparando-se tais respostas estruturais com os valores admissíveis.

Ao empregar tais conceitos, busca-se o melhor desempenho de cada material para que o pavimento seja solicitado de forma equilibrada, evitando, portanto, a atuação de cargas elevadas em apenas uma das camadas a ponto de levar a estrutura à ruptura. As vantagens dos métodos mecanísticos consistem em proporcionar uma maior confiabilidade ao projeto, melhor utilização dos materiais devido às suas características e previsão de defeitos específicos para a estrutura dimensionada (Mattos, 2014). Na análise mecanística de uma estrutura de pavimento, as principais condições avaliadas são representadas conforme a Figura 2.

- A deformação de tração (ε_t) na fibra inferior da camada asfáltica, para controle do trincamento por fadiga;
- O estado de tensão nas camadas inferiores, importante em estruturas com revestimentos delgados para se controlar a ruptura por cisalhamento;
- A tensão (σ_v) ou deformação vertical (ε_v) no topo do subleito para controle da deformação permanente.

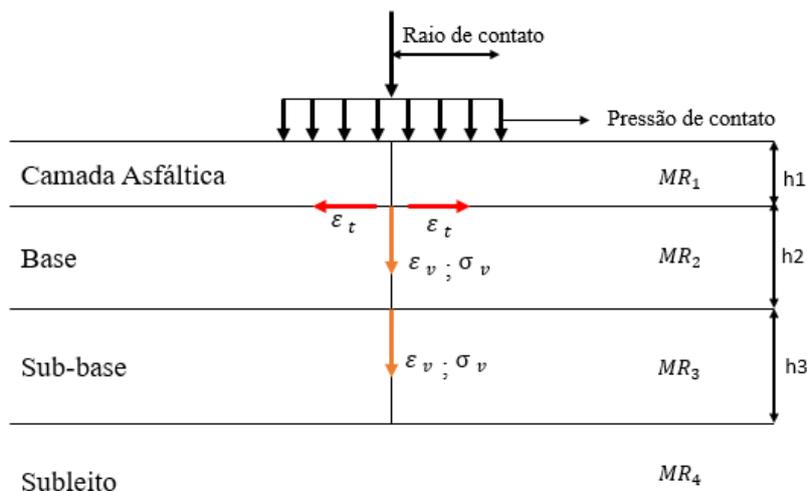


Figura 2: parâmetros avaliados na análise mecanística. (Fonte: adaptado de Thives (2009))

Segundo os mais diversos estudos acerca de mecanismos de ruptura de pavimentos, o modo de falha predominante em camadas asfálticas é a fadiga. Segundo Pinto e Preussler (2002), a fadiga de um material asfáltico consiste num processo de deterioração estrutural quando este material está submetido a um estado de tensões e deformações repetidas, ocasionando o aparecimento de fissuras na parte tracionada do material asfáltico cuja progressão resulta na ruptura do material após um determinado número de repetições deste carregamento. A repetição de

carregamentos dado pelas rodas dos veículos solicita à flexão a camada asfáltica, portanto, conforme vai sendo solicitado o pavimento, geralmente, começam a surgir fissuras na fibra inferior que se propagam de baixo para cima (*bottom-up cracking*) até atingirem a superfície do pavimento.

A resistência à tração do material asfáltico é um dos principais parâmetros para caracterizar a fadiga das misturas asfálticas. Além disso, o efeito da fadiga é agravado pelo comportamento resiliente dos materiais empregados no pavimento, uma vez que as tensões de tração serão tão maiores quanto maior a razão entre comportamento resiliente da mistura asfáltica e do material da base (Medina e Motta, 2005).

4. DADOS E METODOLOGIA

Como citado anteriormente, a motivação deste estudo foi a aplicação de bases permeáveis tratadas com emulsão asfáltica (BPTE) em trechos da BR 116 entre Pelotas e Camaquã em 2011, onde se executou tal camada sobre o antigo pavimento para solucionar os danos decorrentes da presença de água no interior do pavimento.

Apesar de se entender que provavelmente o comportamento de uma mistura com ligante asfáltico não será completamente equivalente ao de uma mistura com emulsão, parte-se do pressuposto de se criar discussões, criar hipóteses, e na medida do possível, tirar conclusões sobre a BPTE através desse estudo.

Para atingir o objetivo proposto de dimensionamento da camada de BPTE e o novo revestimento asfáltico, o programa de estudo deste trabalho consistiu em se determinar uma seção de pavimento semelhante à utilizada na BR 116, adotando-se valores típicos da literatura para os parâmetros dos materiais, tráfego e clima. Posteriormente, foi aplicado o Método de Hveem, fazendo-se por fim, uma análise mecânica da estrutura dimensionada.

4.1 Estrutura de pavimento adotada

Inicialmente, determinou-se uma seção referência de pavimento semelhante à seção do trecho que o material foi aplicado. A Figura 3 representa os materiais empregados na estrutura inicial da via em questão que foi construída em 1963. Neste projeto, verificou-se para o trecho de estudo, a presença de camada de saibro granítico com espessura de 50 cm; tratamento superficial com 2 cm, PQM (Pré-Misturado a Quente) com 13 cm e CBUQ (Concreto

Betuminoso Usinado a Quente) com 7 cm.

Após esta análise do histórico de construção da via, também foram abertas janelas de inspeção para realização de sondagens a fim de se certificar dos elementos estruturais determinados no projeto inicial e também obter amostras para caracterização do material antigo. Como resultado dos mapeamentos, verificou-se que as espessuras de projeto não haviam sido seguidas, existindo espessuras da camada de saibro de, em média, 30 cm (20 cm a menos que a espessura de projeto). Além disso, notou-se que a camada asfáltica antiga variava entre 25 a 40 cm, resultado de recapamentos realizados na via frente aos defeitos superficiais que foram surgindo ao longo do tempo. Como material de subleito, constatou-se a presença de um solo siltoso, além da presença de material orgânico em alguns pontos, o qual será desconsiderado para fins de estudo.

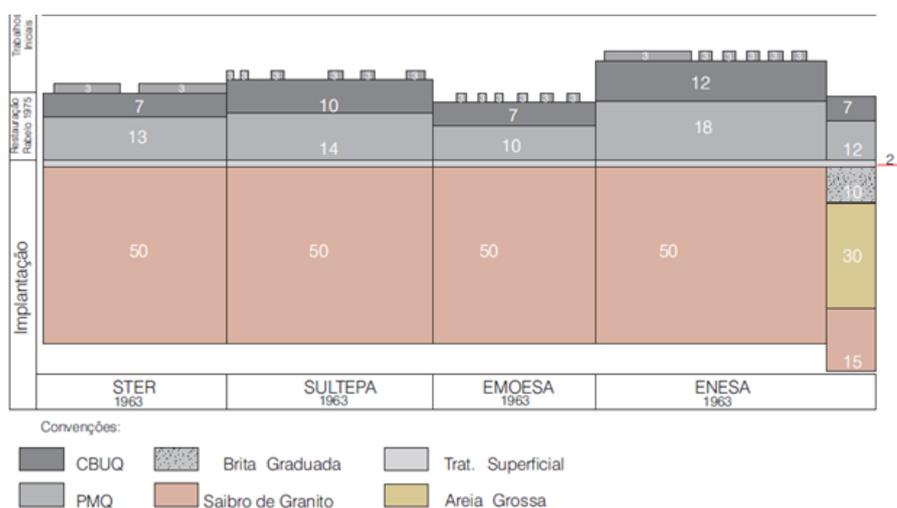


Figura 3: estrutura original de projeto da rodovia BR 116 – Pelotas/Camaquã (Fonte: ECOSUL-ANTT)

Tendo considerado estes levantamentos da estrutura original do pavimento gerou-se a estrutura aproximada da condição real que servirá de referência para este estudo (figura 4). Partiu-se da condição de que se aplicou, em 2011, como solução para reduzir os problemas estruturais e funcionais da superfície de rodagem, uma camada de BPTE seguida de uma camada de revestimento asfáltico de CBUQ modificado por polímero, sendo a que as tais representam a nova plataforma superficial do pavimento.



Figura 4: estrutura proposta para restauração do pavimento.

4.2 Parâmetros adotados e proposta de análise

Definida a estrutura de pavimento referência (figura 4) e a metodologia de análise (Método de Hveem seguido por análise mecanística) adotou-se parâmetros para os materiais, tráfego e clima conforme valores típicos obtidos na literatura.

Vale ressaltar, no entanto, que é imprescindível para os projetistas terem em mãos dados de ensaios dos materiais aplicados num projeto de pavimentação, para que se possa determinar com maior precisão as propriedades dos mesmos, permitindo-se gerar melhores resultados finais. Além disso quanto ao tráfego da via, em condições ideais, deve-se fazer contagem e pesagem por um período que resulte em uma alta confiabilidade dos dados levantados.

Neste trabalho, para realização das análises, adotou-se números de repetições do eixo-padrão (ESAL ou N) para uma vida útil de pavimento de 10 anos. Os valores foram adotados conforme os estudos de Engelke (2019) para um cenário de 80% dos veículos carregados e 20% dos veículos descarregados (80c+20d) para níveis de trafegabilidade conforme a Tabela 1.

Tabela 1: valores de N adotados para cada nível de tráfego.

	Tráfego Baixo	Tráfego Médio	Tráfego Alto
N (ESAL)	9,0E+06	2,7E+07	5,2E+07

Fonte: Engelke (2019)

Para a determinação das propriedades dos materiais empregados na estrutura de referência, utilizou-se as classificações e aproximações disponíveis na literatura (Highway Design Manual - Caltrans, 2018; Harvey *et al.*, 1999; Xiao, 2009; Romanoschi *et al.*, 2009; Bernucci *et al.* 2010; Bonzanini, 2011). A Tabela 2 apresenta os parâmetros adotados.

Tabela 2: parâmetros adotados para os materiais utilizados no dimensionamento.

Camada	Espessura (cm)	MR (MPa)	Massa esp. (g/cm ³)	Valor R	Gf	Coef. Poisson
CA mod. por polímero	A determinar	4000	2,35	N/A	1,55	0,35
BPTE	A determinar	400 - 1200	1,8	N/A	1,4	0,40
Concreto asfáltico antigo	25-40	800 - 3000	2,35	78	1,3	0,35
Saibro granítico	30	97	1,9	40	0,9	0,35
Subleito - Solo siltoso	infinito	76	1,6	18	N/A	0,35

Para o solo siltoso do subleito e saibro, foi realizada classificação de solos conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (*Unified Soil Classification System*) que é baseada no ASTM D 2487, sendo que tal classificação foi obtida no *Highway Design Manual* - Caltrans (2018). O material siltoso foi classificado como ML (siltes inorgânicos, areias muito finas, poucos grãos, sedimentos ou areias finas argilosas). Já o saibro foi classificado como SC (areias argilosas, mistura de areia-argila). O próprio manual apresenta para estas classificações valores típicos de valor R, Módulo de Resiliência (MR), coeficiente de Poisson e Gf, além de estarem na biblioteca de dados do *CalFP-Web* (programa que será apresentado posteriormente). Os valores de massa específica foram adotados conforme Bernucci *et al.* (2010) e Bonzanni (2011).

Para o revestimento asfáltico com ligante modificado por polímero, utilizou-se valores típicos de módulos de resiliência e massa específica obtidos em Xiao (2009) e Romanoschi *et al.* (2009) para misturas asfálticas com teor de ligante asfáltico de 4,8% da mistura, 4% de volume de vazios a uma temperatura de 25 °C. Os valores de coeficiente de Poisson e Gf para esta camada de revestimento foram gerados pelo *CalFP-Web*.

Para a camada de concreto asfáltico (CA) antigo, alguns valores foram adotados e hipotetizados. Dada às incertezas de espessuras da camada de CA antiga, foi considerado um intervalo com três valores representativos de espessura num intervalo de 25 a 40 cm. Da mesma forma, foram hipotetizados valores de módulo de resiliência para cada espessura adotada, já que se trata de uma camada muito heterogênea, com materiais apresentando diferentes propriedades e aplicados em diferentes períodos, além do fator de envelhecimento do ligante asfáltico que varia para diferentes condições de espessura de camada, temperatura e umidade. Quanto aos parâmetros de valor R e coeficiente de Poisson, adotou-se valores próximos aos de uma base granular de classe 2, conforme classificação do *Highway Design Manual* – Caltrans (2018). Já para o Gf, utilizou-se um valor intermediário entre material da classe 2 e um concreto asfáltico típico, de forma a considerar a condição de incerteza e variabilidade do material.

Para a camada de BPTE, foram utilizados valores típicos de ATPB da biblioteca do *CalFP-Web* e de Harvey *et al.* (1999) para os parâmetros de Gf e coeficiente de Poisson. Para valores de módulo de resiliência, partiu-se do mesmo princípio aplicado anteriormente, adotando-se um intervalo de módulos de 400 MPa a 1200 Mpa. Tais valores foram baseados no trabalho de Harvey *et al.* (1999) como referência para tais adoções, que obtiveram valores de 1172 MPa para ATPB em estado “seco”, enquanto 500 MPa para ATPB em estado “imerso”.

Considerando o conjunto de parâmetros e limitações citados acima, além de um fator climático (CF) igual a 1, gerou-se a proposta de análise para este trabalho, criando-se 18 diferentes seções para o caso de estudo que estão representados na Figura 5.

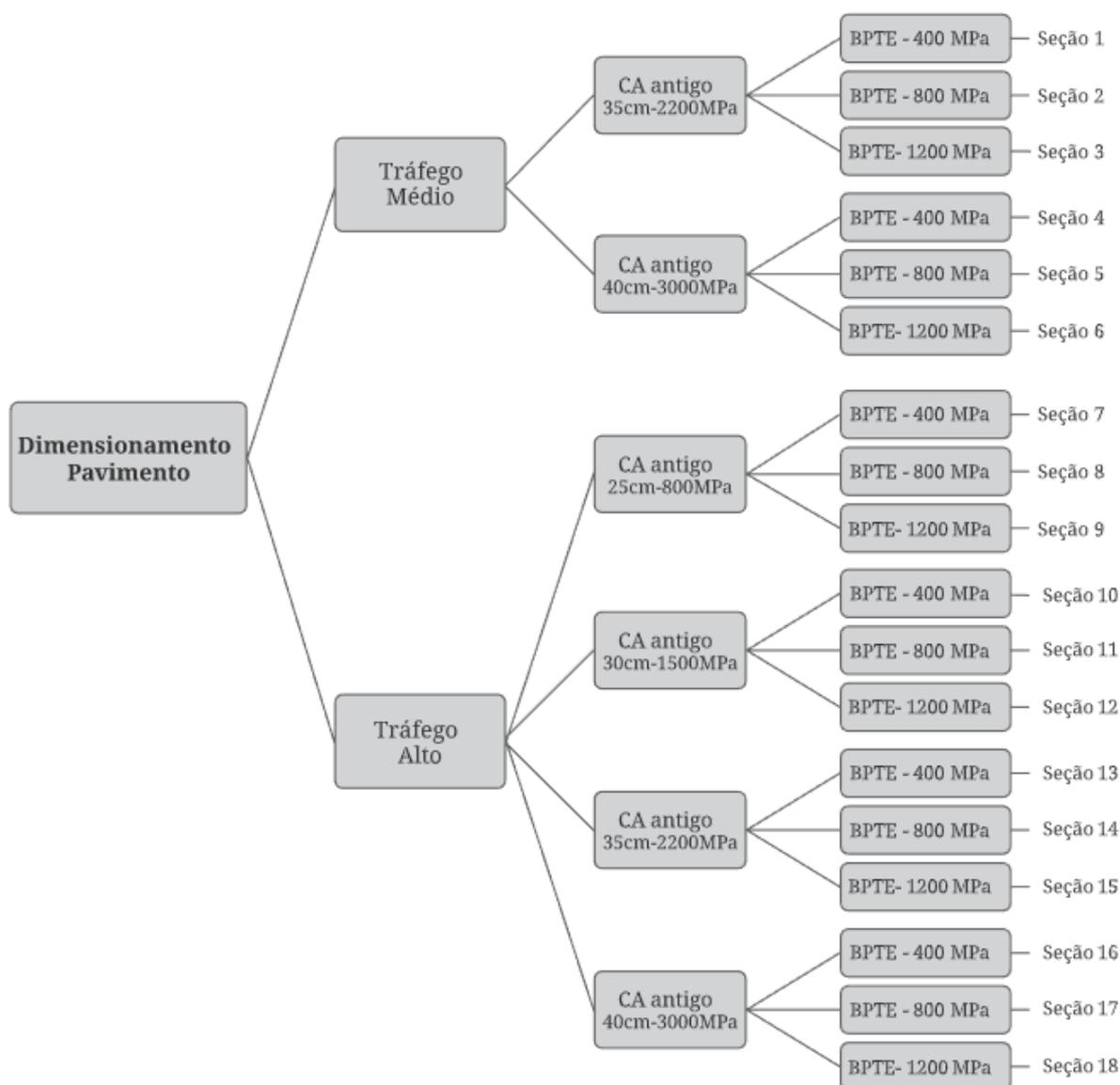


Figura 5: árvore representativa da estrutura de análise do estudo.

4.3 Método de Hveem - Ferramenta CalFP-Web

Depois de definidos os parâmetros de tráfego, fator climático, número e propriedades das camadas do pavimento, o *CalFP-Web* foi utilizado para determinar um conjunto de alternativas de espessuras de camadas que atendem aos critérios de projeto do Método empírico de Hveem.

Este programa computacional foi desenvolvido pelo Caltrans em colaboração com o Centro de Pesquisa de Pavimento da Universidade da Califórnia (UCPRC - *University of California Pavement Research Center*) e é o ponto de partida para a análise mecanística-empírica do *software* CalME. O procedimento de uso do programa está descrito em UCPRC (2019). A representação da interface do programa pode ser verificada na Figura 6.

Current Pavement Structure									
When Applicable, Unconfined Compressive Strength (UCS) for LTS or CS: 4.1 MPa <input type="checkbox"/> Decouple E from Material									
#	Type	Age (d)	Material	Thickness (mm)	Modulus-E (MPa)	R-value	GF	Cost (\$)	
1	HMA	0	Standard HMA Type A Mix with polymer modified binder for non-PRS Projects	50	4,000.0	N/A	1.66	216.00	
2	ATPB	N/A	Standard ATPB for non-PRS Projects	230	400.0	N/A	1.40	111.00	
3	AB	N/A	Standard AB-Class 2 for non-PRS Projects	300	1,500.0	78	1.10	35.00	
4	AS	N/A	Standard AS-Class 3 for non-PRS Projects	300	96.5	40	1.00	33.00	

Check

Results of the Caltrans Empirical Design Check Applied to the Current Structure

Minimum and Maximum Thickness Checks
No problems with minimum/maximum thickness checks;

Structural Adequacy Checks
Warning: Gravel Equivalent Provided above Layer 3 (AB): 406 is more than required: 308;
Warning: Gravel Equivalent Provided above Layer 5 (SG): 1036 is more than required: 920;

Figura 6: interface programa *CalFP-Web*.

Submetendo os valores de número de repetições do eixo-padrão (ESAL ou N), fator climático, número de camadas, materiais aplicados, as espessuras iniciais e os valores de R e Gf, o programa verifica os resultados quanto ao GE e se as espessuras máximas e mínimas estão sendo respeitadas. O processo é iterativo até que se estabeleça uma condição admissível quanto aos critérios do método.

4.4 Análise Mecanística

O primeiro passo na avaliação mecanística de um pavimento é calcular a resposta do pavimento - em termos de tensões, deformações e / ou deslocamentos – utilizando um método matemático (ou modelo mecanístico). No segundo passo, a resposta calculada é utilizada como uma variável empírica para prever danos estruturais (diminuição de módulos ou fissuras) e danos funcionais (deformações e rugosidade) ao pavimento. Tal processo é iterativo no qual os parâmetros de projetos são ajustados repetidamente com base no desempenho previsto até que uma condição

admissível seja alcançada.

4.4.1 Ferramenta AEMC

As análises mecânicas foram realizadas com o auxílio do programa AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), desenvolvido para uso como um componente do programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) do DNIT e com instruções em Franco (2018). Este programa (interface representada na Figura 7) realiza cálculos de tensões e deformações, ou seja, a resposta do pavimento a uma carga de eixo-padrão numa estrutura de pavimento. Tais cálculos são utilizados para verificar os resultados do prévio dimensionamento, no caso desta pesquisa, realizados pelo *CalFP-Web* como mencionado anteriormente.

As hipóteses fundamentais da solução computacional do programa baseiam-se nas mesmas consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos. Dentre as hipóteses adotadas pode-se citar a de materiais elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos; e de que a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda área de contato.

The screenshot shows the AEMC software interface. At the top, there is a table titled 'Estrutura >>' with columns: CAMADA, ESPESURA (cm), MASSA ESP (g/cm³), COMPORTAMENTO, MÓDULO (MPa), k1, k2, k3, k4, COEF POISSON, and ADERÊNCIA. Below this, there are options for 'Tipo de carregamento:' (Eixo padrão rodoviário, Eixo simples, Dois eixos simples direcional, Eixo duplo, Dois eixos duplos) and 'Pontos de análise e resultados' with a 'Calcular' button. The results table has columns: Ponto, X (cm), Y (cm), Z (cm), Ux (µm), Uy (µm), and Uz (µm).

CAMADA	ESPESURA (cm)	MASSA ESP (g/cm³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5	2,35	LINEAR	4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	1,0
2	19	1,8	LINEAR	1200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	1,0
3	35	2,35	LINEAR	2200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
4	30	1,96	LINEAR	97	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
5	0,0	1,6	LINEAR	76	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz (µm)
1	0,00	0,00	5,00	0,00000	0,00000	229,74372
2	2,64	0,00	5,00	-3,23579	0,00000	231,71930
3	5,27	0,00	5,00	-5,52931	0,00000	237,14611
4	15,00	0,00	5,00	-1,85142	0,00000	250,59622
5	24,73	0,00	5,00	3,19934	0,00000	224,45189
6	45,00	0,00	5,00	-6,35240	0,00000	182,59560
7	65,00	0,00	5,00	-9,13749	0,00000	167,59375
8	85,00	0,00	5,00	-10,43251	0,00000	154,17308
9	105,00	0,00	5,00	-10,93578	0,00000	141,37870
10	0,00	0,00	24,00	0,00000	0,00000	215,14923
11	2,64	0,00	24,00	0,00899	0,00000	215,08080
12	5,27	0,00	24,00	0,05549	0,00000	214,86329
13	15,00	0,00	24,00	0,79171	0,00000	212,03304
14	24,73	0,00	24,00	1,55513	0,00000	205,01328
15	45,00	0,00	24,00	-0,15203	0,00000	185,80174
16	65,00	0,00	24,00	-1,81081	0,00000	169,77041

Figura 7: interface do programa AEMC.

Para as análises do AEMC, adotou-se os valores de carga, pressão de pneus e espaçamento entre rodas para o eixo-padrão, conforme o Método de Hveem e citado na seção 3.1.1. Para os cálculos de tensão-deformação do AEMC, considerou-se as ligações entre camadas asfálticas como aderidas conforme Franco (2018), ao passo que as demais interações entre camadas foram consideradas como não aderidas. O programa também tem como convenção o sinal positivo

para tensões e deformações de compressão, sendo que negativo para as de tração, convenção adotada também para este trabalho.

Foram analisadas as deformações em diversos pontos: ponto no centro do carregamento (sentido do rolamento); no fundo das camadas de revestimento e base permeável (ao longo da profundidade), onde tem-se os pontos de início das fissuras por fadiga; e no centro do carregamento, meio entre o centro e a borda interna da roda, no centro da roda, na borda externa da roda e em 5 pontos a cada 20 cm a partir da borda externa da roda (direção perpendicular ao rolamento). No entanto, adotou-se apenas os maiores valores para o fundo de cada camada, de forma que em geral ocorre entre os dois pneus (centro do carregamento).

4.4.2 Critério de análise

Os valores dos critérios de desempenho são aqueles que constituem falhas primárias como deformações permanentes ou trincas por fadiga, falhas estas que resultarão em falhas secundárias como rachaduras superficiais. Neste trabalho, como passo posterior ao cálculo das tensões e deformações do pavimento pelo AEMC, utilizou-se critérios de desempenho para a qualidade e durabilidade de camadas asfálticas quanto ao dano por fadiga em dada vida útil de serviço. Tais critérios foram obtidos de modelos de comportamento desenvolvidos em Harvey *et al.* (1996) e UCPRC (2019). O modelo utilizado estima o número de repetições de carga de eixo-padrão admissível no pavimento para que não ocorra ruptura das camadas asfálticas por fadiga (vida de fadiga) antes do fim da vida útil de projeto.

O modelo de dano por fadiga utilizado inclui como variáveis a temperatura em que a camada está submetida, especialmente a temperatura na parte inferior onde se iniciam as fissuras; o volume de vazios da camada analisada, de forma que um aumento nesse parâmetro reduz a vida de fadiga de um pavimento; o teor de ligante asfáltico, que aumenta a vida de fadiga quanto maior seu percentual; e a deformação de tração que ocorre no fundo na camada, variável calculada pelo AEMC neste trabalho. A Equação (5) apresenta o modelo de fadiga.

$$N_{fadiga} = \frac{N_{fadiga,lab} \times SF}{TCF \times M} \quad (5)$$

em que N_{fadiga} : número de repetições do eixo-padrão para ruptura por fadiga (vida de fadiga);

$N_{fadiga,lab}$: vida de fadiga obtida via ensaios em laboratório;

SF (*Shift Factor*): fator necessário para conciliar diferenças *in situ* e em laboratório;

TCF: fator de conversão de temperatura para absorver diferenças de temperaturas *in situ* para uma temperatura única normalmente utilizada em ensaios laboratoriais;

M: multiplicador de confiabilidade com base no nível de risco e variabilidades aceitáveis associados a variação das variáveis de construção e de ensaio laboratorial.

O N de laboratório foi modelado por Harvey *et al.* (1996) através de testes de deformação controlada, gerando o modelo de regressão da Equação (6).

$$N_{fadiga,lab} = 2,2953 \times 10^{-10} \times e^{0,594AC-0,164AV} \times \varepsilon_t^{-3,73} \quad (6)$$

em que AC: teor de ligante asfáltico em massa de agregado da mistura em percentual;

AV: volume de vazios da mistura em percentual;

ε_t : deformação de tração calculada na parte inferior da camada asfáltica para uma carga padrão de 80 kN.

As deformações desenvolvidas por tensões de tração foram calculadas pelo AEMC. A camada de base permeável simulada tem 25% de volume de vazios e um teor asfáltico de 3%. Já a camada de concreto asfáltico modificado por polímero foi adotada com ligante asfáltico de 4,8% da mistura, 4% de volume de vazios a uma temperatura de 25°C. Nas Equações (7), (8) e (9) podem ser conferidas as relações para as demais variáveis.

$$SF = 2,7639 \times 10^{-5} \times \varepsilon_t^{-1,3586} \quad \text{para } \varepsilon \geq 0,000040 \quad (7)$$

em que ε_t : deformação calculada na parte inferior da camada asfáltica para uma carga padrão de 80 kN.

$$TCF = 1,754 \times \ln(t) - 2,891 \quad (8)$$

em que t: é a espessura da camada asfáltica [cm].

$$M = e^{0,6481z} \quad (9)$$

em que z: fator que depende da confiabilidade do projeto.

Para este estudo, adotou-se uma confiabilidade de projeto de 90%, o que representa um fator z de 1,28. Assim, para todos os casos analisados, o M utilizado foi de 2,29.

4.5 Estrutura de análise

Para cada caso gerado conforme a Figura 5, foi aplicada a sequência de análises apresentado no fluxograma da Figura 8. Para a condição em que a base permeável atinge a falha por fadiga enquanto o revestimento não, se considera o cenário como indefinido. Isso porque, nesses casos, deveria se refazer a distribuição após a ruptura da camada permeável, considerando-se um novo módulo para esta camada já trincada e se recalculando as tensões e deformações no fundo do revestimento a fim de reconsiderar a nova vida de fadiga para o revestimento asfáltico.

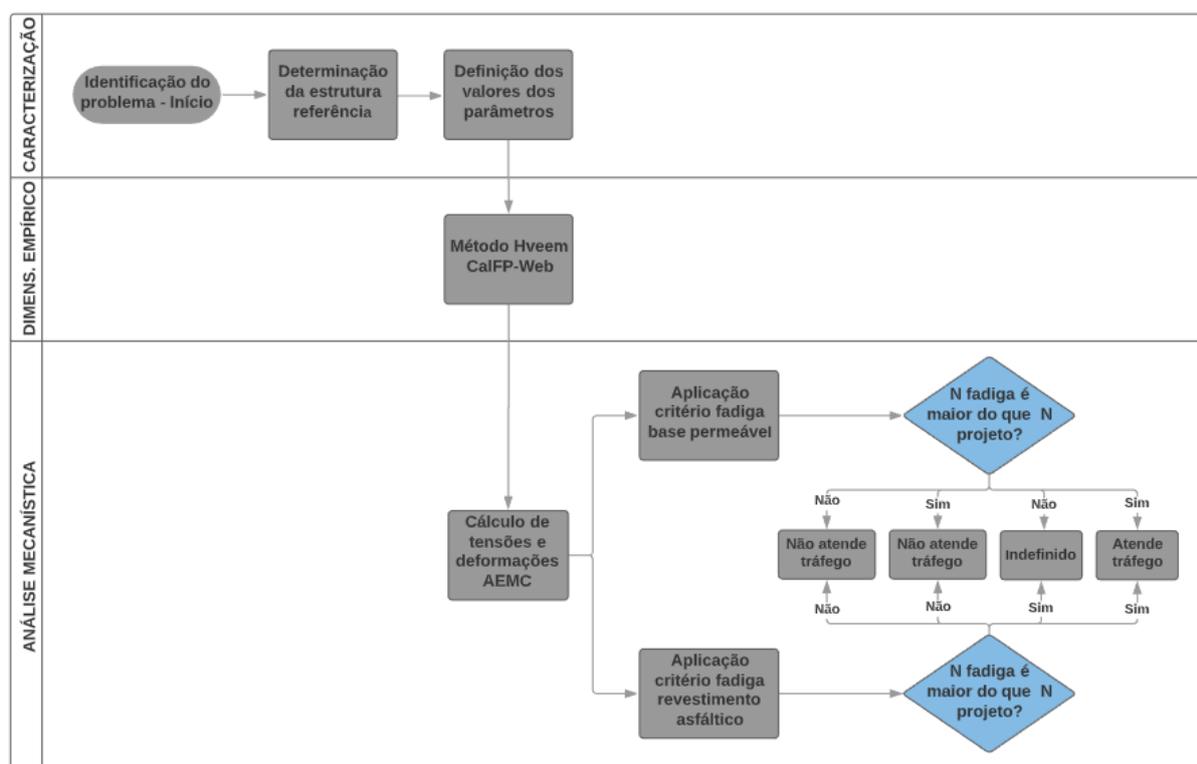


Figura 8: fluxograma representativo do processo de análise.

5. RESULTADOS

Na Tabela 3 e Figura 9 tem-se os resultados do dimensionamento e análise de vida de fadiga para a base permeável tratada. Valores da razão de N de fadiga e N de projeto acima de 1 representam que não ocorre ruptura da camada considerada no período de vida projetado (resultados muito altos da razão foram omitidos na Figura 9). As espessuras, determinadas pelo Método de Hveem, variam conforme as espessuras atribuídas para a camada de CA antigo e o tráfego (médio ou alto), tendo-se obtido nesse estudo um intervalo de 17 a 35,5 cm.

Pode-se verificar também que, analisando a camada de BPTE separadamente, as maiores vidas de fadiga foram obtidas em condições em que se tem menores módulos para esta camada. Isso

ocorre pois nesse caso a linha neutra é transladada para cima, reduzindo tensões de tração que ocorrem no fundo do material. Todavia, neste caso tem-se aumento das tensões de tração no fundo da camada de revestimento (comportamento que poderá ser visualizado nas Tabelas 4 e 5).

Além disso, verifica-se que conforme maior a rigidez da camada de concreto asfáltico antigo, maior será o alívio das tensões de tração atuantes na base permeável. Isso ocorre pelo fato de que nesta situação a linha neutra é deslocada para baixo, ocorrendo na BPTTE uma maior quantidade de esforços por compressão ao invés de esforços por tração.

Também, conforme esperado pelo elevado percentual de volume de vazios, pode-se verificar que as tensões de tração máximas admissíveis para a camada de base permeável são baixas para a condição de não ocorrência de ruptura de fadiga durante a vida útil de projeto. Consequência disso também, os valores para o fator SF são relativamente altos, já que este é um fator dado em função das deformações por tração.

Tabela 3: dimensionamento e análise de fadiga para a BPTTE.

ANÁLISE BASE PERMEÁVEL TRATADA							
Seção	t (cm)	$\mu\varepsilon_t$	SF	TCF	$N_{fadiga,lab}$	N_{fadiga}	$N_{fadiga}/N_{projeto}$
1	21,5	-7,7	26,1	2,5	2,7E+08	1,2E+09	46,20
2	21,5	-17,8	26,1	2,5	1,2E+07	5,4E+07	1,99
3	21,5	-22,0	26,1	2,5	5,3E+06	2,4E+07	0,90
4	17,0	-3,9	26,1	2,1	3,4E+09	1,9E+10	686,52
5	17,0	-11,8	26,1	2,1	5,4E+07	3,0E+08	11,05
6	17,0	-15,5	26,1	2,1	2,0E+07	1,1E+08	3,99
7	35,5	-42,2	24,3	3,4	4,7E+05	1,5E+06	0,03
8	35,5	-50,5	19,0	3,4	2,4E+05	5,9E+05	0,01
9	35,5	-49,2	19,7	3,4	2,6E+05	6,8E+05	0,01
10	31,0	-15,2	26,1	3,1	2,1E+07	7,7E+07	1,35
11	31,0	-25,5	26,1	3,1	3,1E+06	1,1E+07	0,20
12	31,0	-28,6	26,1	3,1	2,0E+06	7,3E+06	0,13
13	26,0	-6,4	26,1	2,8	5,3E+08	2,2E+09	37,73
14	26,0	-15,5	26,1	2,8	2,0E+07	7,9E+07	1,39
15	26,0	-19,1	26,1	2,8	9,0E+06	3,6E+07	0,64
16	21,5	-3,2	26,1	2,5	7,1E+09	3,2E+10	567,65
17	21,5	-10,3	26,1	2,5	9,0E+07	4,1E+08	7,25
18	21,5	-13,5	26,1	2,5	3,3E+07	1,5E+08	2,64

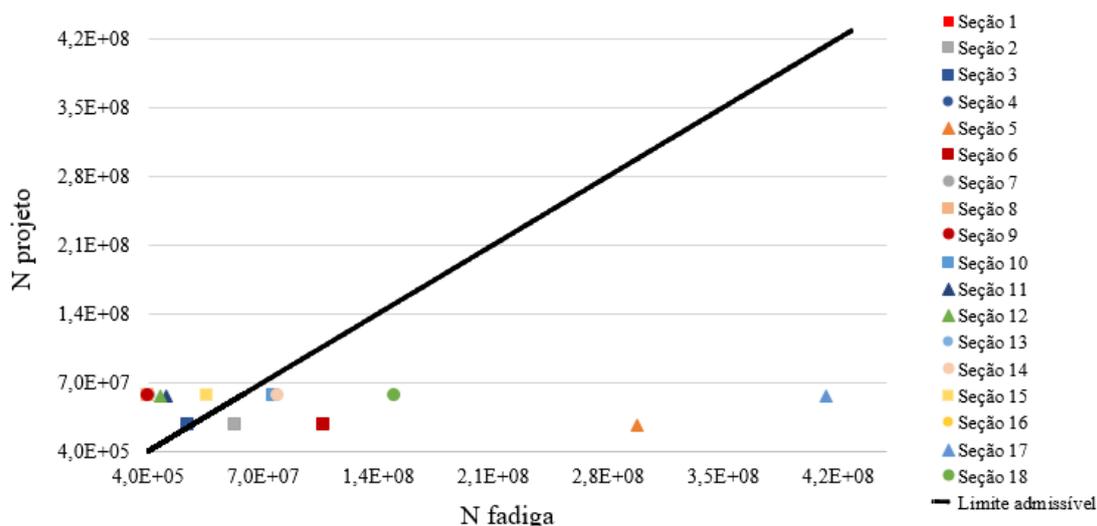


Figura 9: gráfico de vida de fadiga para a BPTe de cada seção.

Para a camada de revestimento, adotou-se uma espessura padrão de 6 cm, que é o valor que foi aplicado em 2011 nas obras de reabilitação da BR 116 no trecho do estudo em questão. Após, foi verificada a vida de fadiga desta camada para todos os cenários de pavimento, que podem ser conferidos na Tabela 4 e Figura 10.

Tabela 4: dimensionamento e análise de fadiga para o revestimento asfáltico.

ANÁLISE REVESTIMENTO ASFÁLTICO							
Seção	t (cm)	$\mu\epsilon_t$	SF	TCF	$N_{fadiga,lab}$	N_{fadiga}	$N_{fadiga}/N_{projeto}$
1	6	-169,5	3,7	0,3	2,4E+05	1,5E+06	0,06
2	6	-90,8	8,6	0,3	2,5E+06	3,6E+07	1,35
3	6	-57,5	15,9	0,3	1,1E+07	3,2E+08	11,73
4	6	-161,8	3,9	0,3	2,8E+05	1,9E+06	0,07
5	6	-89,4	8,8	0,3	2,6E+06	3,9E+07	1,46
6	6	-58,2	15,7	0,3	1,1E+07	3,0E+08	11,03
7	6	-179,4	3,4	0,3	1,9E+05	1,1E+06	0,02
8	6	-91,4	8,5	0,3	2,4E+06	3,5E+07	0,62
9	6	-55,3	16,8	0,3	1,3E+07	3,9E+08	6,78
10	6	-177,4	3,4	0,3	2,0E+05	1,2E+06	0,02
11	6	-92,6	8,3	0,3	2,3E+06	3,3E+07	0,58
12	6	-57,6	15,9	0,3	1,1E+07	3,1E+08	5,51
13	6	-174,6	3,5	0,3	2,1E+05	1,3E+06	0,02
14	6	-93	8,3	0,3	2,2E+06	3,2E+07	0,57
15	6	-59	15,4	0,3	1,0E+07	2,8E+08	4,87
16	6	-170,4	3,6	0,3	2,3E+05	1,5E+06	0,03
17	6	-93,7	8,2	0,3	2,2E+06	3,1E+07	0,55
18	6	-60,3	14,9	0,3	9,6E+06	2,5E+08	4,36

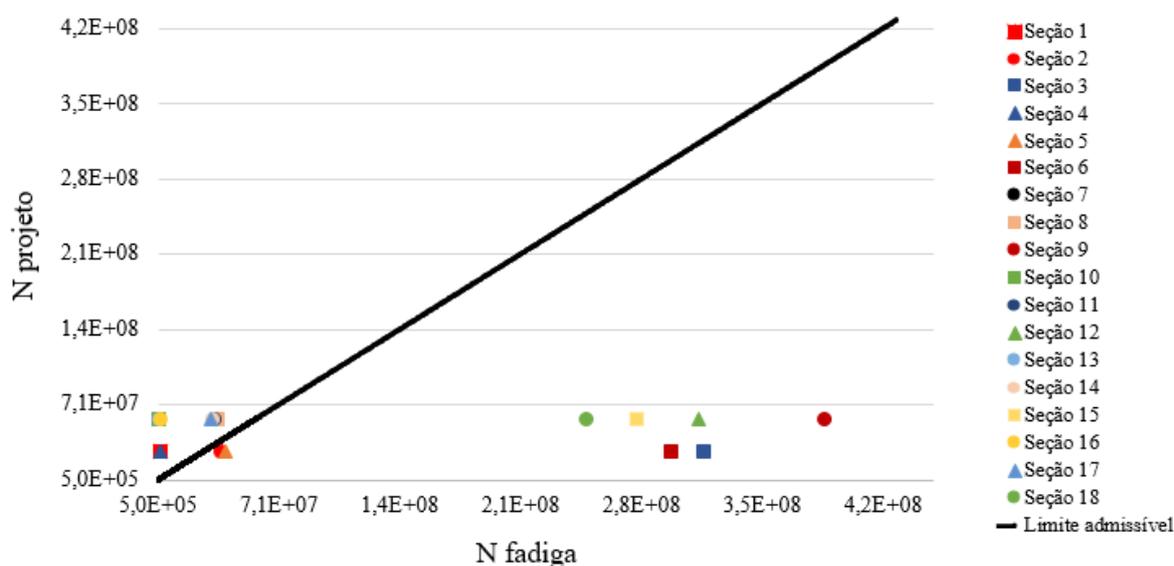


Figura 10: gráfico de vida de fadiga do revestimento asfáltico de cada seção.

Igualmente à análise anterior, valores da razão de N de fadiga por N de projeto acima de 1, representam que não há ruptura por fadiga durante a vida útil. Pelos resultados, pode-se analisar que as maiores vidas de fadiga estão atreladas a maiores valores de módulo da camada de BPTE. Isso porque com a camada de base mais rígida, a linha neutra será transladada para baixo, comprimindo a camada de revestimento, reduzindo as tensões de tração atuantes que são causadoras do efeito de fadiga.

Pelos resultados da análise do revestimento, também se nota uma menor significância dos valores adotados para a camada de CA antigo no resultado de vida de fadiga do revestimento, sendo este efeito muito mais variável com a diferença de performance da base permeável.

Após a análise das condições para base permeável e revestimento asfáltico separadamente, fez-se a análise conjunta para a determinação da capacidade de atendimento ao tráfego estimado para a vida de projeto seguindo-se a sequência estabelecida pelo fluxograma da Figura 8. A compilação das análises pode ser verificada na Tabela 5.

Pelos resultados abaixo, o conjunto das camadas asfálticas atingiu condições de suporte exigido (ou possível suporte) principalmente em condições de maiores módulos e espessura da camada de CA antigo, além de médios/altos módulos da camada de BPTE.

Tabela 5: tabela resumo das verificações de fadiga.

TABELA RESUMO DE ANÁLISE DE FADIGA DAS CAMADAS ASFÁLTICAS								
Tráfego	CA Antigo		BPTE			Revest. Asfáltico		Total
$N_{projeto}$	MR (MPa)	t (cm)	MR (MPa)	t (cm)	$N_{fadiga}/N_{projeto}$	t (cm)	$N_{fadiga}/N_{projeto}$	Atende tráfego?
			400	21,5	46,20	6	0,06	NÃO
2,7E+07	2200	35	800	21,5	1,99	6	1,35	SIM
			1200	21,5	0,90	6	11,73	INDEFINIDO
			400	17,0	686,52	6	0,07	NÃO
2,7E+07	3000	40	800	17,0	11,05	6	1,46	SIM
			1200	17,0	3,99	6	11,03	SIM
			400	35,5	0,03	6	0,02	NÃO
5,7E+07	800	25	800	35,5	0,01	6	0,62	NÃO
			1200	35,5	0,01	6	6,78	INDEFINIDO
			400	31,0	1,35	6	0,02	NÃO
5,7E+07	1500	30	800	31,0	0,20	6	0,58	NÃO
			1200	31,0	0,13	6	5,51	INDEFINIDO
			400	26,0	37,73	6	0,02	NÃO
5,7E+07	2200	35	800	26,0	1,39	6	0,57	NÃO
			1200	26,0	0,64	6	4,87	INDEFINIDO
			400	21,5	567,65	6	0,03	NÃO
5,7E+07	3000	40	800	21,5	7,25	6	0,55	NÃO
			1200	21,5	2,64	6	4,36	SIM

6. CONCLUSÕES

Como resultado final do estudo, para uma camada de revestimento asfáltico de 6 cm adotada em todos os cenários como aplicado *in situ*, a menor espessura de base permeável obtida foi de 17 cm, o que é acima do valor de 12 cm aplicado nos trechos de recuperação da BR 116 – Pelotas/Camaquã em 201. Desta forma, com as análises do trabalho em questão, a estrutura estaria subdimensionada, apesar dos resultados positivos quanto aos valores de deflexão medidos e verificados em ECOSUL-ANTT (2016) até o ano de 2016.

É importante observar e frisar que o estudo foi realizado na intenção de se aproximar e estimar a espessura da camada de BPTE através do método aplicado na Califórnia para uma ATPB (estabilizada com ligante asfáltico ao invés de emulsão asfáltica). Além disso, deve-se considerar o conservadorismo dos métodos norte-americanos, condição comum dada às vidas úteis usuais mais longas neste país (acima de 20 anos). Ademais, deve-se considerar as condições de incertezas e variabilidade das camadas, principalmente à camada de concreto

asfáltico antigo, as quais foram aproximadas, o que abre margem para discussões e ponderações.

Há de ressaltar também que, apesar da análise mecânica ter sido desenvolvida entorno do mecanismo de ruptura por fadiga como citado na seção 2, os estudos para bases permeáveis indicam uma tendência de ruptura por *stripping*. Se hipotetiza que este também é modo de falha predominante para uma camada de BPTe, sendo que, todavia, não há mecanismos de se prever o efeito ou mesmo metodologia para se dimensionar a camada através de parâmetros obtidos com a análise deste dano.

Como forma preventiva para o efeito de *stripping*, considerados em Harvey *et al.* (1999) e Harvey *et al.* (2000), deve-se evitar ao máximo as condições de saturação da camada, de modo que haja um sistema de drenagem externo eficiente, realizando-se também segundas inspeções e manutenções. Também deve-se considerar a aplicação de filtros, quando identificada a possibilidade de intrusão de finos na camada. Em termos de composição da mistura, para reduzir possibilidade de ocorrência de *stripping*, deve-se avaliar a possibilidade de incremento de teor de emulsão asfáltica quando possível, de forma a não extrapolar demasiadamente o teor determinado como ótimo para que não se intensifique o efeito de deformação permanente.

Para futuros estudos deste material, sugere-se a realização de análises do material em condições saturadas, como realizado em Harvey *et al.* (1999), podendo se realizar uma caracterização da performance deste material tratado com emulsão quando saturado, já que em períodos chuvosos do ano, ao menos, pode-se ter presente este efeito.

Como verificado nos estudos realizados da ATPB, as camadas usuais de bases permeáveis não ultrapassam, em geral, valores de 7,5 cm. O próprio programa *CalFP-Web* tende a estabelecer camadas com esta espessura quando realizados dimensionamentos. Entende-se que o custo de uma camada permeável tratada é elevado pelo benefício estrutural que ela pode propor, considerando-se sobretudo, o risco latente de ocorrência de *stripping*, o que pode gerar colapso das camadas superiores por deformação permanente, ou até perda de sustentação da plataforma rodante. Para tanto, apesar do dimensionamento de camadas de BPTe de até 35,5 cm neste estudo e tais valores serem aceitáveis no programa *CalFP-Web* (máximo admissível de 36 cm), considera-se que devem ser verificados tais cenários, seja por viabilidade econômica ou mesmo estrutural, considerando a possibilidade de se utilizar camadas não tratadas e/ou aplicar

camadas mais robustas de revestimento asfáltico, e aplicando uma camada delgada de base permeável com função principal de drenagem, com menor função estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSHTO (2018) *T 190-14: Standard Method of Test for Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils*. Washington, DC, USA.
- ASTM (2017) *D 2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Annual Book of ASTM Standards. USA
- Bejarano, M. O.; Harvey, J. T.; Ali, A.; Mahama, D.; Hung, D.; Preedonant, P. (2003) *Performance of Drained and Undrained Flexible Pavement Structures in Accelerated Loading under Wet Conditions*. Pavement Research Center Institute of Transportation Studies. University of California at Berkeley, California, USA.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M.G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro, PETROBRAS, ABEDA. Pag. 403.
- Bonzanini, J. A.F. (2011) *Estudo dos efeitos do tamanho de corpos-de-prova nos módulos de resiliência de quatro solos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- Caltrans (2000) *California Test (CT) 301: Method for Determining the Resistance "R" Value of Treated and Untreated Bases, Subbases, and Basement Soils by the Stabilometer*. California, USA.
- Caltrans (2018) *Highway design Manual (6ª ed.)*. California Department of Transportation. Sacramento, California, USA.
- ECOSUL-ANTT (2016) *Relatório Final KM 417 BR 116*. ECOSUL. Agência Nacional de Transportes Terrestres. *Publicação indisponível*.
- Engelke, D. C. (2019) *Caracterização da frota rodante comercial nas rodovias federais brasileiras e o impacto dos carregamentos dos veículos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- Franco, F. A. C. P. e Motta, L. M. G. (2018) *Relatório Parcial IV (A) – Guia para Utilização de Método Empírico – Apresentação dos programas desenvolvidos*. Execução de estudos para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Convênio COPPE-UFRJ/DNIT. Universidade Federal do Rio de Janeiro/Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ.
- Harvey, J., J. Deacon, B. Tsai, e C. Monismith (1996) *Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California* (1996) RTA-65W485-2. Asphalt Research Program. CAL/APT Program. Institute of Transportation Studies, University of California. Berkeley, California, USA.
- Harvey, J. T., Du Plessis, L., Long, F., Deacon, J. A., Guada, I., Hung, D. And Scheffy, C. (1997) *CAL/APT Program: Test results from accelerated pavement test on pavement structure containing asphalt treated permeable base (ATPB), section 500RF*. Report No. RTA-65W485-3. California Department of Transportation. UC Pavement Research Center. CAL/APT Program. Institute of Transportation Studies. University of California: Davis and Berkeley. California, USA.
- Harvey, J. T., I. Guada, C. Scheffy, L. Louw, J. Prozzi, And D. Hung (1998) *CAL/APT Program: Test Results from Accelerated Pavement Test on Pavement Structure Containing Asphalt Treated Permeable Base—Section 502CT*. Pavement Research Center. CAL/APT Program. Institute of Transportation Studies, University of California. Berkeley, California, USA.
- Harvey, J., Tsai, B-W., Long, F., And Hung, D. (1999) *CAL/APT Program: Asphalt Treated Permeable Base (ATPB), laboratory tests, performance predictions and evaluation of Caltrans and other agencies' experience*. California Department of Transportation. UC Pavement Research Center. CAL/APT Program. Institute of Transportation Studies. University of California: Davis and Berkeley. California, USA.
- Harvey, J., J. Deacon, B. Tsai, And C. Monismith (2000) *Caltrans Accelerated Pavement Test (Cal/Apt) Program Summary Report Six Year Period: 1994–2000*. California Department of Transportation. UC Pavement Research Center. CAL/APT Program. Institute of Transportation Studies. University of California: Davis and Berkeley. California, USA.
- Hashiro, R. S. (2005) *Correlation of Resistance Value (R-Value) with California Bearing Ratio (CBR) for use in the design of flexible pavements*. Thesis to the graduate division in Civil Engineering. University of Hawaii Library. Hawaii, USA.
- Lovering, W., and H. Cedergren (1962) *"Structural Section Drainage," Proceedings of the First International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. University of Michigan. Ann Arbor, Michigan, USA.

- Mattos, J. R.G. (2014) *Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290 – A implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul*. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. UFRGS. Porto Alegre, RS.
- Medina, J. e Motta, L. M. G. (2005) *Mecânica dos pavimentos (2ª ed.)*. Ed. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- Pinto, S. e Preussler, E. S. (2002) *Pavimentação rodoviária conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis (2ª ed.)*. IBP. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, RJ.
- Romanoschi, S. A.; Dumitru, N. I., Dumitru, O. (2006) *Resilient Modulus and the Fatigue Properties of Kansas Hot Mix Asphalt Mixes*. Report No. K-Tran: Ksu-02-6: Final Report. Kansas Department of Transportation Topeka and Kansas State University Manhattan. Kansas, USA.
- Scherer, C. (2016). *Influência do Comportamento Resiliente do Subleito no Desempenho de Pavimentos Flexíveis*. Trabalho de conclusão de curso. Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, RS.
- Thives, L.P. (2009) *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Portugal.
- UCPRC (2019) *CalME Help – Adoption of Mechanistic- Empirical (ME) Pavement Design Method*. University of California Pavement Research Center. University of California. Berkeley, California, USA.
- Xiao, Y. (2009) *Evaluation of Engineering Properties of Hot Mix Asphalt Concrete for the Mechanistic Empirical Pavement Design*. *Doctoral Thesis in Civil Engineering*. College of Engineering Florida State University. Tallahassee, Flórida, USA.