

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Eduardo Alcides Peter

**SIMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM
CAMADAS ASFÁLTICAS: DEPENDÊNCIA DA VELOCIDADE
DE APLICAÇÃO DA CARGA E DA TEMPERATURA**

Porto Alegre
julho 2016

EDUARDO ALCIDES PETER

**SIMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM
CAMADAS ASFÁLTICAS: DEPENDÊNCIA DA VELOCIDADE
DE APLICAÇÃO DE CARGA E DA TEMPERATURA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento 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: Washington Peres Núñez

Porto Alegre

julho 2016

EDUARDO ALCIDES PETER

**SIMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM
CAMADAS ASFÁLTICAS: DEPENDÊNCIA DA VELOCIDADE
DE APLICAÇÃO DA CARGA E DA TEMPERATURA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 09 de julho de 2016

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela UFRGS
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lélío Brito (PUCRS)
Dr. pela Universidade de Nottingham

Prof. Jorge Augusto Ceratti (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

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

Dedico este trabalho a meus pais, Henrique Augusto Peter
e Liane Salete Ferrarezi, que sempre me deram amor de
forma incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Washington Peres Núñez, orientador deste trabalho, pela paciência e tranquilidade que teve para comigo e, também, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do tempo que interagimos.

Agradeço, mais uma vez, os meus pais e a minha família, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim.

Agradeço aos meus amigos, por estarem presentes nas horas boas e nas horas ruins, nos momentos de alegria e nos momentos de infelicidades. Eu devo ser abençoado por possuir amigos tão especiais.

E, por fim, agradeço aos professores que estiveram comigo ao longo desta caminhada. Lembrarei com muito carinho de todos.

RESUMO

As deformações permanentes estão entre as degradações induzidas pelas solicitações de tráfego mais comuns presentes nos pavimentos com revestimento asfáltico. Estas deformações acontecem devido à passagem dos veículos no pavimento. Parte das deformações causadas pelos veículos é recuperada (deformação elástica) e a outra parte persiste ao longo do tempo (deformação permanente). Costumeiramente admite-se que a mistura asfáltica pode ser razoavelmente modelada como um material viscoelástico linear, de forma que o seu módulo complexo de elasticidade depende da temperatura e da taxa de aplicação de carga. No presente trabalho, mostram-se, através de simulações computacionais feitas com o *software 3D-MOVE*, as deformações permanentes que ocorrem na camada asfáltica de um pavimento flexível para diferentes intensidades de tráfego, velocidades dos veículos e temperatura da camada. Para tal, definiu-se uma geometria comum às simulações e um semieixo padrão. Por limitação do *software* utilizado, para cada simulação, mantiveram-se fixas a temperatura da camada e a velocidade dos veículos. A curva mestra da mistura, que avalia o módulo complexo, utilizada foi obtida através de um relatório fornecido por um renomado laboratório brasileiro, sendo esta mistura empregada em uma importante rodovia do estado do Rio Grande do Sul. Como principal resultado, obteve-se que as deformações permanentes crescem com o aumento da temperatura e que decrescem com o aumento da velocidade dos veículos. Em especial, para temperaturas da ordem de 50°C , os valores das deformações aumentaram de forma significativa. Isto indica que, se a temperatura do pavimento aproxima-se facilmente deste valor com frequência no seu lugar de emprego, as deformações permanentes causadas no pavimento podem abreviar a sua vida de maneira significativa. Ressalta-se que trabalhos como este são benéficos para tomadas de decisão, uma vez que ajudam no entendimento global de um problema real.

Palavras-chave: Deformações Permanentes. *3D-MOVE*.
Módulo complexo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Deformações permanentes	24
Figura 2 – Etapas da pesquisa	29
Figura 3 – Componentes da camada asfáltica	31
Figura 4 – Tensão e deformação: ângulo de fase	33
Figura 5 – Curva mestra: $ E^* $ e $\log(f_r)$	38
Figura 6 – Curva mestra em escala logarítmica: $\log E^* $ e $\log(f_r)$	38
Figura 7 – Representação bidimensional do módulo complexo	39
Figura 8 – Representação tridimensional do módulo complexo	40
Figura 9 – Dependência do módulo complexo em relação à temperatura	41
Figura 10 – Dependência do fator de deslocamento em relação à temperatura	41
Figura 11 – Dependência do ângulo de fase em relação à temperatura	42
Figura 12 – Esquema simplificado do semieixo utilizado	45
Figura 13 – Esquema simplificado das pressões de contato	46
Figura 14 – Evolução das deformações permanentes R_D	50
Figura 15 – Resultado das simulações para as deformações permanentes R_D	52
Figura 16 – Resultado das simulações para as deformações permanentes R_D	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos corpos de provas (CPs)	36
Tabela 2 – Caracterização do ligante asfáltico	36
Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ajuste	37
Tabela 4 – Valores dos coeficientes de ajuste	42
Tabela 5 – Resumo das propriedades de cada uma das camadas	44
Tabela 6 – Plano de Simulações	51

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CBR – *California Bearing Ratio* (Índice de Suporte Califórnia)

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Corpo de prova

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

MEPDG – *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

S-VECD – *Simplified Viscoelastic Continuum Damage*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

a e b – coeficientes experimentais para o modelo do coeficiente de Poisson

a_T – fator de deslocamento

b_i – coeficientes de ajuste

e_s – deformação no topo do subleito devido a um eixo apenas

e_t – deformação no topo do subleito devido ao grupo de eixos

E – módulo de elasticidade (MPa)

$|E|^*$ - módulo complexo (MPa)

E' - parte real do módulo complexo (MPa)

E'' – parte imaginária do módulo complexo (MPa)

f – frequência (Hz)

f_r – frequência reduzida (Hz)

h_i – espessuras das camadas (cm)

N – número de semieixos padrão

P_{roda} – peso sobre cada roda (kN)

p_{roda} – pressão de contato dos pneus com a camada asfáltica (kPa)

R_D – deformação permanente (cm)

T – temperatura ($^{\circ}C$)

U – deflexões (cm)

v – velocidade de deslocamento do veículo sobre o pavimento (km/h)

α_i – coeficientes de ajuste

β – coeficiente de ajuste

γ – coeficiente de ajuste

δ – coeficiente de ajuste

ε – deformação

μ_i e α_i – parâmetros de deformação da camada i

ν – coeficiente de Poisson

ρ – peso específico (kg/m^3)

σ – tensão aplicada (MPa)

θ – ângulo de fase ($^\circ$)

ω – frequência angular (rad/s).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	27
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	27
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	27
2.2.1 Objetivo principal	27
2.2.2 Objetivos secundários	27
2.3 PRESSUPOSTO.....	27
2.4 PREMISSA	27
2.5 DELIMITAÇÕES	28
2.6 LIMITAÇÕES.....	28
2.7 DELINEAMENTO	28
3 CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO E DO CARREGAMENTO.....	31
3.1 COMPOSIÇÃO E GEOMETRIA DO PAVIMENTO ASFÁLTICO ESTUDADO	31
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS DO PAVIMENTO ASFÁLTICO	32
3.2.1 Caracterização da Mistura Asfáltica	32
3.2.2 Caracterização da Camada de Base	43
3.2.3 Caracterização da Camada de Sub-Base.....	43
3.2.4 Caracterização da Camada de Subleito.....	43
3.2.5 Resumo das Propriedades das Camadas	44
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARREGAMENTO	44
4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	47
4.1 INTRODUÇÃO AO <i>3D-MOVE</i>	47
4.2 SIMULAÇÕES	51
4.3 RESULTADOS.....	51
4.3.1 Simulações a Temperatura Constante	51
4.3.2 Simulações a Velocidade Constante	54
5 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A pavimentação possui um papel crucial no desenvolvimento da humanidade. Através dela foi possível o desenvolvimento e expansão dos povos, assim como a realização de trocas comerciais e contato entre culturas diferentes. As pirâmides do Egito, por exemplo, foram construídas depois de serem executadas vias que permitiam o transporte, via deslizamento, dos blocos constituintes. Outro exemplo notório é a Estrada da Seda, através dela foi possível a troca de mercadorias entre China, Índia e Europa. O seu apogeu ocorreu por volta do ano 600 d. C. (BERNUCCI et al., 2006).

Conforme Bernucci et al. (2006), ainda que sistemas de estradas já existissem, creditam-se aos romanos o planejamento e a construção mais elaborada das mesmas. Os romanos, principalmente durante o império de Otaviano Augusto, possuíam uma razoavelmente grande rede viária, planejada e com manutenções. Além disto, as estradas eram classificadas conforme o seu uso.

A manutenção e construção das estradas foram deixadas de lado pelas nações europeias depois da queda do Império Romano, ganhando novamente a devida importância na França, com Carlos Magno. No fim do século XVIII, Mascarenhas Neto, em 1790, publicou o “Tratado para construção de estradas”, no qual é mostrada a preocupação com vários aspectos na construção e manutenção de vias de modo a garantir sua qualidade (BERNUCCI et al., 2006).

No Brasil, a primeira estrada data de 1560, durante o governo de Mem de Sá, conectando São Vicente e o Planalto Piratininga. Poucas estradas foram construídas até a chegada do automóvel ao Brasil, em 1903. Em 1928 foi inaugurada a Rodovia Rio-São Paulo, contando com mais de 500 km de extensão. Porém, a construção rodoviária do país começou a crescer significativamente nas décadas de 1940 e 1950, com grandes investimentos para o aumento da rede viária nacional. Durante o governo militar, obras como a Ponte Rio-Niterói e a Rodovia Transamazônica foram realizadas. Em 1996, iniciou-se um processo de concessão de rodovias. As concessões, de uma maneira geral, elevaram a qualidade das rodovias (BERNUCCI et al., 2006).

Entretanto, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT), em pesquisa publicada em 2014 (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2014) para rodovias federais, cerca de 10% do pavimento da malha está em situação ruim ou péssima. Com relação a toda malha, este número é ainda maior, representando por volta de 13%. Levando-se em conta o estado geral das rodovias (onde são adicionadas as avaliações com relação à sinalização e geometria das vias, além da condição do pavimento), quase 24% da malha é classificada como ruim ou péssima. Este número é bastante preocupante, ainda mais na situação brasileira, onde cerca de 60% do transporte de carga e mais de 90% do transporte de passageiros é realizado pelo modal rodoviário.

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (2014), é imprescindível que o setor do transporte seja eficiente, para que produtos e insumos cheguem aos seus destinos em menor tempo, com o menor custo, maior agilidade e flexibilidade possíveis. Para que isto ocorra, é necessária uma infraestrutura de qualidade e que atenda as exigências do mercado (malha grande para aumentar a agilidade e flexibilidade). Quanto à infraestrutura do modal rodoviário, o Brasil peca com relação a muitos outros países. Como comparação, segundo Bernucci et al. (2006), Estados Unidos e Brasil, países que possuem áreas comparáveis (**9,8 e 8,5 milhões de km²**, respectivamente), possuíam, em 1998, um consumo de asfalto muito diferente. Ao passo que os Estados Unidos consumiram, naquele ano, **27 milhões de toneladas de asfalto**, o Brasil consumiu apenas **2 milhões de toneladas**. Este dado reflete a realidade dos investimentos em infraestrutura no país, que produz uma consequência imediata indesejada: acaba por encarecer os produtos nacionais, diminuindo consideravelmente a competitividade destes produtos no mercado internacional.

Além dos investimentos, necessários tanto para manutenção quanto ampliação da malha, os autores propõem a participação efetiva das universidades para gerar “[...] um melhor entendimento dos materiais e de métodos de projeto teórico-empíricos.” (BERNUCCI et al., 2006, p. 22). Isto seria feito através do ensino, pesquisa e extensão: motivando e moldando jovens para que evoluíssem no entendimento e conhecimento dos fenômenos envolvidos na degradação dos pavimentos e no desenvolvimento de novos materiais e, obviamente, gerando a aplicação destes conhecimentos de forma que os pavimentos se tornem cada vez mais resistentes e menos onerosos. Assim, poderia haver uma realocação de recursos, que não mais seriam aplicados para manutenção de pavimentos mal dimensionados, ou manutenção de pavimentos com tecnologia defasada, mas sim, na ampliação da malha existente.

Nos dias de hoje, a pavimentação possui como foco a sua utilização para veículos automotores. Com o crescente aumento da população e da economia, aumenta-se, também, o volume de mercadorias e pessoas em trânsito nos pavimentos. Este aumento na demanda ao longo do tempo provoca uma necessidade de melhoria contínua nos processos construtivos, materiais empregados, qualidade dos materiais e no próprio desenvolvimento dos pavimentos. Dentre os materiais utilizados em pavimentação, um dos mais utilizados, especialmente no Brasil, é o asfalto. Aproximadamente, 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2006).

Outro problema enfrentado é o fato de o método de dimensionamento validado atualmente pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) ser obsoleto. Para a determinação das camadas, considera-se a capacidade de suporte dos materiais granulares e do subleito. A capacidade de suporte é avaliada pelo ensaio CBR (Índice de Suporte Califórnia ou *California Bearing Ratio*), que basicamente mede a pressão necessária para que um pistão penetre num corpo de prova de solo. Esta pressão é comparada com uma amostra padrão e o resultado do ensaio é expresso em porcentagem (dividindo-se a pressão para a penetração no solo pela pressão para a penetração na amostra padrão e multiplicando-se este resultado por cem). O método estabelece valores mínimos de CBR para cada uma das camadas constituintes do pavimento, bem como limites toleráveis de expansão dos materiais (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994; DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1981; DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

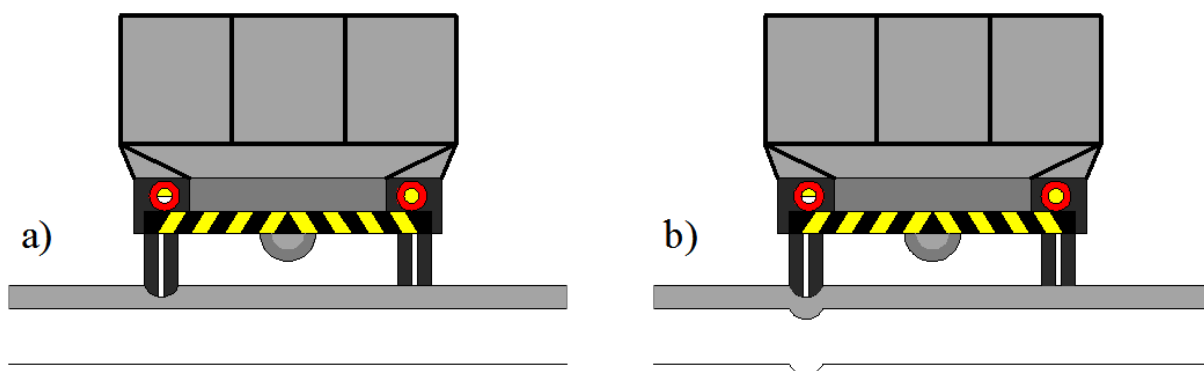
A determinação das espessuras das camadas é feita através de relações simples e que envolvem coeficientes de equivalência estruturais propostos pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Estes coeficientes trazem a ideia de rigidez relativa de um material com relação ao outro. A partir das relações de equivalência, do CBR e do número N de eixos padrão passantes durante o tempo de vida de projeto dimensionam-se as espessuras do pavimento (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1986; DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

Este método de dimensionamento é demasiadamente simples. Ele desconsidera vários efeitos que podem levar a uma ruptura precoce do pavimento. Entre estes efeitos, podem ser citadas a

fadiga e as deformações permanentes na camada asfáltica. Portanto, para um dimensionamento mais correto, é necessário que se incluam todos os efeitos que podem levar o pavimento à ruína. Um dimensionamento mais racional pode gerar economia na construção (evitando superdimensionamentos e aplicando os materiais adequados em quantidades adequadas) e na manutenção (prolongando o tempo de vida do pavimento).

As **deformações permanentes** estão entre os defeitos mais comuns que aparecem durante a vida dos pavimentos. Estas deformações podem acontecer **na camada asfáltica** (como pode ser visto no painel *a* da figura 1) ou nas camadas inferiores, que apresentam deformações por ruptura ao cisalhamento ou por densificação que ocorre devido ao tráfego de cargas pesadas (mostradas no painel *b* da figura 1) (BERNUCCI et al., 2006).

Figura 1 – Deformações permanentes



(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2006, p. 316)

Conforme Bernucci et al. (2006, 317), a deformação permanente em misturas asfálticas

[...] ocorre devido a uma combinação do fluxo do material (visco elástico ou viscoplástico) e do dano neste material, representado pela formação e propagação de trincas. A capacidade de uma mistura de resistir a esse tipo de deformação depende de diversos fatores, entre os quais, a consistência do ligante e a volumetria da mistura (agregados e ligantes).

E é justamente este o fenômeno (o de deformações permanentes em misturas asfálticas) estudado neste trabalho.

As deformações permanentes são ocasionadas pela passagem dos veículos no pavimento. Cada carga que se movimenta sobre o pavimento faz com que o pavimento se deforme. Esta deformação é em parte recuperada (deformação elástica). Entretanto, outra parte desta

deformação persiste ao longo do tempo após a passagem da carga (deformação irreversível ou permanente). As deformações permanentes, salvo quando há dimensionamento inadequado das camadas inferiores (ou má drenagem, por exemplo), acontecem com maior amplitude na camada asfáltica.

Este tipo de fenômeno está ligado às propriedades viscoplásticas daquela camada. Considerando que a mistura asfáltica seja um material viscoelástico linear, a deformação permanente é função de vários fatores – intrínsecos ao pavimento, ambientais e dependentes do tráfego – como, por exemplo: da velocidade com que as cargas se deslocam sobre o pavimento; do peso destas cargas; da composição da mistura asfáltica; da espessura da camada asfáltica; e, claro, da temperatura da camada asfáltica.

No presente trabalho é feita uma análise baseada em simulações computacionais, através do *software 3D-MOVE*, onde é assumido um pavimento composto por subleito, sub-base, base e, por fim, camada asfáltica.

O objetivo da análise é mostrar, de forma quantitativa, como o valor da deformação permanente depende da intensidade do tráfego, da temperatura e da velocidade com que os veículos se deslocam pelo pavimento. A intensidade do tráfego é obtida através da definição do semieixo padrão e do número de repetições deste semieixo ao longo do tempo.

As espessuras e os materiais constituintes do pavimento são mantidos fixos para as diferentes condições estabelecidas para o problema, de modo a garantir que as diferenças nos resultados sejam funções apenas dos diferentes parâmetros adotados.

As diretrizes da pesquisa são mostradas no capítulo 2. Nas diretrizes apresentam-se elementos chave para o melhor entendimento do trabalho, tais como: questão e objetivo central da pesquisa.

No capítulo 3 é feita a caracterização do pavimento asfáltico e do carregamento. Neste capítulo é apresentada a curva mestra, necessária para a determinação do módulo de elasticidade complexo, da mistura asfáltica, com base em um relatório fornecido por um renomado laboratório para a mistura asfáltica adotada em uma importante rodovia do Rio Grande do Sul. Também são fornecidos a curva do ângulo de fase e o fator de deslocamento, necessários para avaliar a deformação permanente. Uma espessura é estabelecida para esta

camada. Os materiais e as espessuras que compõem as outras camadas asfálticas também são definidos neste capítulo. Por fim, no capítulo 3, caracteriza-se o carregamento através da definição do semieixo padrão e do tipo e forma da distribuição da carga sobre o pavimento (adotou-se uma distribuição de pressões do tipo uniforme, com forma circular).

Depois de estabelecida a caracterização do pavimento asfáltico, apresenta-se, no capítulo 4, de forma sintetizada, o programa utilizado (*3D-MOVE*¹) para as simulações numéricas e os resultados. Os resultados foram obtidos através de um plano de simulações do tipo *ceteris paribus*: primeiramente as simulações foram realizadas para uma temperatura e uma velocidade específicas, variando-se o número de semieixos padrão passantes, e mantendo todo o resto fixo; em seguida, mudou-se o valor da velocidade e novamente as simulações foram realizadas para diferentes números de semieixos padrão passantes; e, por fim, variou-se o valor da temperatura da camada asfáltica, utilizando diferentes velocidades e diferentes números de semieixos padrão passantes. Através deste procedimento foi possível avaliar a relevância da intensidade do tráfego, da temperatura do pavimento e da velocidade, de forma isolada, no que diz respeito às deformações permanentes na camada asfáltica.

É realizada, ainda no capítulo 4, uma pequena discussão sobre os resultados.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como os comentários finais e as propostas para um possível melhoramento do trabalho no futuro. Espera-se que este trabalho seja convincente quanto a mostrar de uma forma clara que as deformações permanentes em camadas asfálticas são fortemente dependentes da intensidade do tráfego, da velocidade dos veículos e, por fim, da temperatura da camada asfáltica. O entendimento da dependência desses fatores deve, seguramente, ser levado em consideração quando da elaboração de um projeto de um pavimento, para o seu melhor proveito (redução de custos de manutenção e aumento da vida útil da estrutura, por exemplo).

¹ *Software* disponível em: www.arc.unr.edu/Software.html.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: a intensidade do tráfego e os efeitos da temperatura e da velocidade dos veículos podem afetar significativamente as deformações permanentes em misturas asfálticas?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a verificação da importância quantitativa dos efeitos da taxa de aplicação de carga e da temperatura na deformação permanente em camadas asfálticas.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) apresentação de uma breve introdução ao *software 3D-MOVE*;

2.3 PRESSUPOSTO

O pressuposto deste trabalho é de que o *software 3D-MOVE* e os modelos que ele utiliza sejam confiáveis em termos dos resultados obtidos através das simulações numéricas.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que as deformações permanentes em camadas asfálticas dependem da taxa de aplicação de carga e da temperatura da camada asfáltica, fatos que devem ser levados em consideração no dimensionamento de pavimentos asfálticos.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo das deformações permanentes apenas em camadas asfálticas e da sua dependência com a taxa de aplicação de carga e com a temperatura utilizando velocidades e temperaturas que são fixas ao longo das simulações (avaliação do tipo *ceteris paribus*).

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

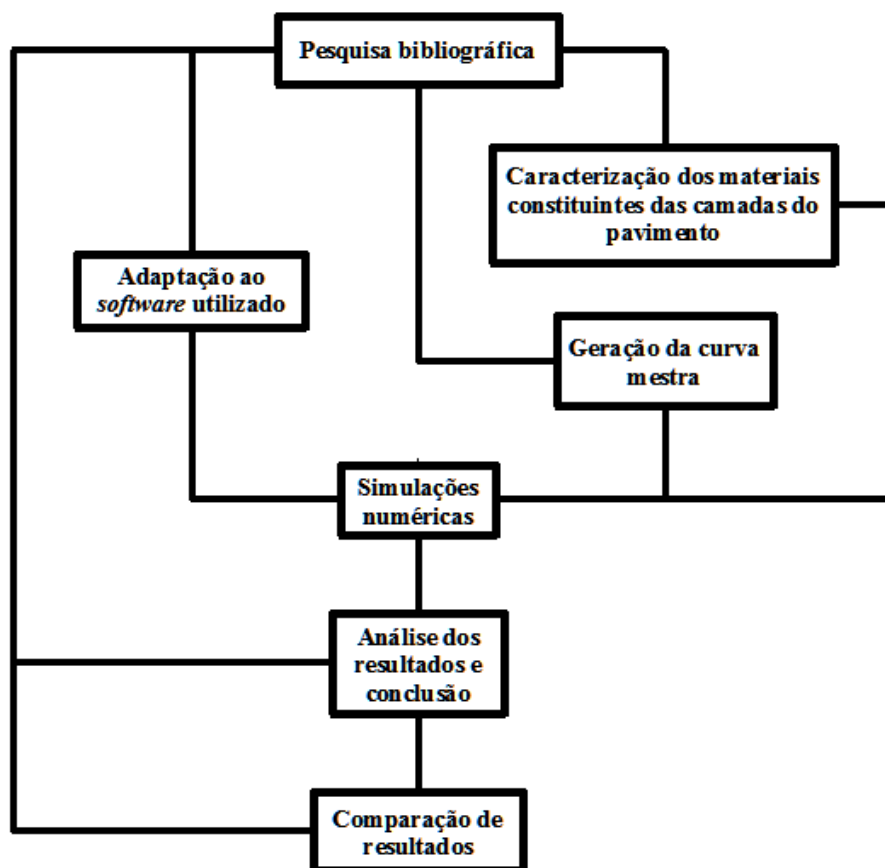
- a) a consideração de apenas uma velocidade para os veículos ao longo de cada simulação;
- b) a utilização apenas do eixo padrão como carga (e não um espectro de cargas, como seria mais correto);
- c) a consideração de que o asfalto se comporta de maneira viscoelástica linear;
- d) a consideração de que a temperatura da camada asfáltica é constante e uniforme ao longo de cada simulação.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 2, que são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) caracterização dos materiais constituintes das camadas do pavimento;
- c) adaptação ao *software* utilizado;
- d) geração da curva mestra;
- e) simulações numéricas;
- f) comparações dos resultados;
- g) análise dos resultados e conclusões.

Figura 2 – Etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Na primeira etapa, denominada **pesquisa bibliográfica**, é explorada a literatura atual sobre o tema. Nela, são levantados dados e informações imprescindíveis para o desenvolvimento do presente trabalho, bem como, através dela constrói-se a base teórica de conhecimento e fundamentação. Esta etapa ocupa quase toda a duração do trabalho.

Na etapa de **caracterização dos materiais constituintes das camadas do pavimento**, são determinados os materiais que constituem as camadas do pavimento e suas propriedades físicas, tais como coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e peso específico.

Na etapa de **adaptação ao software utilizado**, são realizados testes com o programa *3D-MOVE*, com a finalidade de entender o mecanismo do seu funcionamento e os seus pormenores.

Na etapa da **geração da curva mestra**, utiliza-se a função que descreve a curva mestra e representa-se ela de forma tridimensional. Além disto, mostra-se como o módulo complexo depende da frequência do carregamento e da temperatura.

Depois de caracterizados os materiais que compõem o pavimento, bem como as características geométricas do pavimento, iniciam-se as **simulações numéricas** com o *software 3D-MOVE*. Através das simulações obtêm-se as predições sobre a deformação permanente na camada asfáltica.

As simulações numéricas são realizadas para diferentes valores de temperatura, semieixos passantes e velocidades. Na etapa de **comparações de resultados**, os resultados fornecidos pelo *software* para os diferentes valores são comparados.

Na etapa de **análise dos resultados e conclusões**, os resultados são interpretados e, com base nestas interpretações, são feitas as conclusões para o fechamento do trabalho.

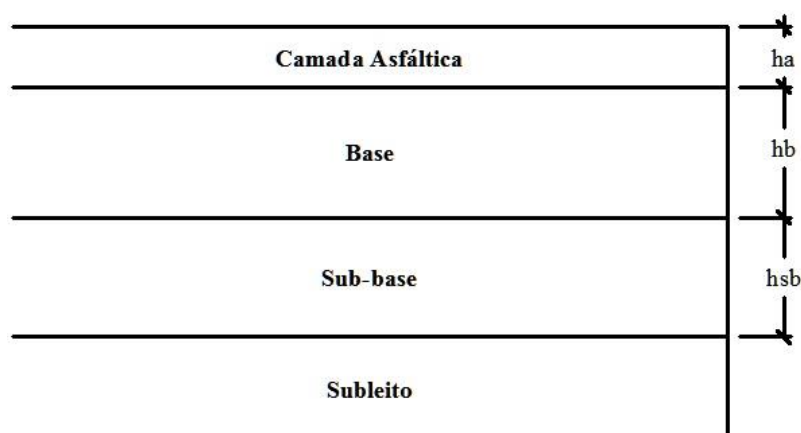
3 CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO E DO CARREGAMENTO

Neste capítulo é feita a caracterização do pavimento asfáltico a ser simulado. Nele constam as informações geométricas, bem como a caracterização de cada uma das camadas constituintes do pavimento. Em uma etapa posterior, através do *software 3D-MOVE*, são simuladas as deformações permanentes para este pavimento, variando-se a temperatura da camada asfáltica, a velocidade e a intensidade do tráfego. O objetivo destas variações, mantendo-se constantes as características geométricas do pavimento, bem como os seus materiais constituintes, é mostrar de forma isolada e teórica o efeito da taxa de aplicação de carga e da temperatura nas deformações.

3.1 COMPOSIÇÃO E GEOMETRIA DO PAVIMENTO ASFÁLTICO ESTUDADO

Considera-se, neste trabalho, um pavimento composto por uma camada asfáltica (onde o material constituinte é uma mistura asfáltica quente), uma camada de base (formada por material granular), uma camada de sub-base (de macadame) e, finalmente, o subleito (de solo argiloso). A figura 3 sintetiza a caracterização geométrica do pavimento.

Figura 3 – Componentes da camada asfáltica



(fonte: elaborado pelo autor)

Na próxima seção são caracterizadas as propriedades mecânicas de cada uma das camadas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CAMADAS DO PAVIMENTO ASFÁLTICO

Para Bernucci et al. (2006, p. 287), nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente para a caracterização de misturas asfálticas, devendo haver, portanto, um julgamento para a utilização das que mais afetam o comportamento dos materiais. Neste trabalho, as variáveis que são levadas em conta para a determinação das propriedades da mistura são a temperatura e o tempo de aplicação de carga.

3.2.1 Caracterização da Mistura Asfáltica

As misturas asfálticas, devido às suas propriedades, podem ser (e usualmente são) pensadas como materiais visco-elásticos lineares e, por este motivo, seu comportamento mecânico é emulado através de diferentes modelos mecânicos compostos por diferentes combinações de molas e amortecedores (AHMED, 2014; BARRA, 2009; DE CARVALHO, 2012; KALISKE; ROTHERT, 1997; MAINA et al., 2011; MAINARDI; SPADA, 2011; YAO et al., 2013;). Além de modelos mecânicos, podem-se utilizar modelos puramente matemáticos (XU, 2014).

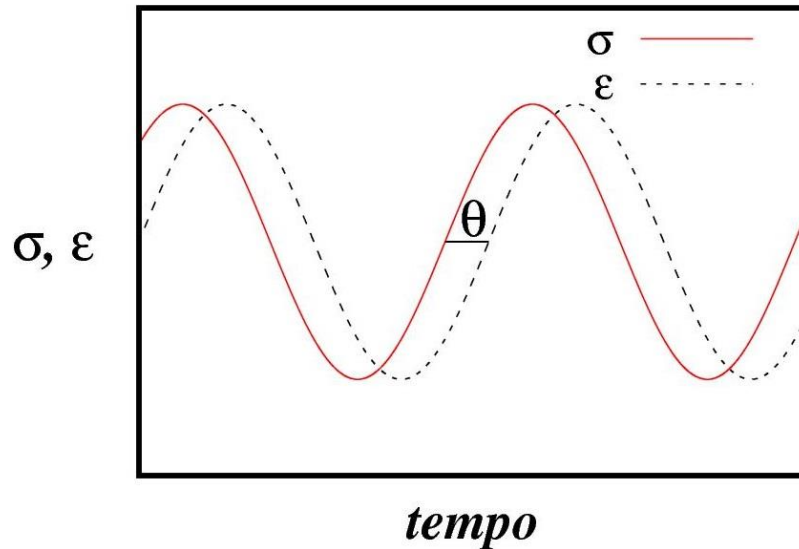
Para a caracterização de materiais considerados elásticos (ou que trabalham dentro do regime elástico), é necessário conhecer o seu módulo de elasticidade, E , e o coeficiente de Poisson, ν . Entretanto, na caracterização de materiais considerados visco-elásticos lineares, o módulo de elasticidade depende fortemente da frequência de aplicação da carga (ou taxa de aplicação de carga ou velocidade) e da temperatura. Além disto, após a aplicação da carga, parte da deformação causada não é recuperada. Ou seja, há dissipação de energia durante o processo de deformação do material, o que faz com que o material não volte à forma original.

Em termos de resposta do material à aplicação de carga, há uma resposta (leia-se deformação) instantânea (atrelada ao comportamento elástico do material) e uma resposta defasada (correspondente ao comportamento diferido do material). Tal comportamento é demonstrado na figura 4, considerando a aplicação de uma carga senoidal em um caso unidimensional.

Na figura 4, a tensão aplicada (que tem formato senoidal) é representada pela linha sólida vermelha, enquanto a deformação causada (igualmente senoidal) é representada pela linha pontilhada. A separação angular entre a tensão aplicada e a deformação é o ângulo de fase,

representado por θ . Para materiais puramente elásticos $\theta = 0^\circ$ e para materiais puramente viscosos $\theta = 90^\circ$.

Figura 4 – Tensão e deformação: ângulo de fase.



(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2006, p. 304)

De uma maneira geral, para um carregamento senoidal unidimensional, a tensão pode ser expressa de forma complexa como:

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t}, \quad (\text{Eq. 1})$$

enquanto a deformação é escrita como:

$$\epsilon^* = \epsilon_0 e^{i(\omega t - \theta)}. \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

σ : a tensão aplicada;

σ_0 : a amplitude da tensão aplicada;

ϵ : a resposta em termos da deformação;

ϵ_0 : a amplitude da deformação;

ω : a frequência angular, a qual é relacionada com a frequência por $\omega = 2\pi f$;

$f = 1/T$: t o tempo, e T o período;

θ : o ângulo de fase relacionado com o atraso temporal da deformação após a tensão.

O módulo complexo $|E^*|$ é definido como a máxima (pico) tensão dinâmica dividida pela recuperação máxima (pico) da deformação axial. Desta forma, escreve-se o módulo complexo como sendo:

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\theta} = E' + iE'' \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

E' : a parte real do módulo (módulo de armazenamento), responsável pela recuperação da deformação.

E'' : a parte imaginária do módulo (módulo de perda), correspondente à deformação não recuperada.

O módulo complexo, por sua vez, é descrito por:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (\text{Eq. 4})$$

O módulo complexo depende fortemente da temperatura e da taxa de aplicação de carga (MAINA et al, 2011). Vários modelos estão disponíveis na literatura para avaliar estas dependências. A proposta de cada um dos modelos é determinar o que é chamada de **curva mestra**. Nesta curva estão todas as informações relativas ao comportamento mecânico do material visco-elástico linear. Através dela é possível, por exemplo, determinar o módulo complexo para uma determinada temperatura e uma determinada frequência.

Como exemplos de modelos mecânicos, têm-se o **modelo de Maxwell**, o **modelo de Kelvin**, o **modelo de Burger**, o **modelo generalizado de Maxwell**, o **modelo generalizado de Kelvin** e o **modelo de Huet-Sayegh**.

O **modelo de Maxwell** consiste em uma mola e um amortecedor em série. A mola é utilizada para emular o módulo elástico do material. O amortecedor representa a parte viscosa, dependente da taxa de aplicação de carga. O **modelo de Kelvin** se resume ao uso de uma

mola e um amortecedor em um arranjo paralelo e mais uma mola, em série com este arranjo. O **modelo de Burger** é uma combinação dos modelos de Maxwell e Kelvin, ambos em série. Este modelo reproduz satisfatoriamente a curva mestra para uma pequena região do espectro de frequências. Os **modelos generalizados de Maxwell e Kelvin** são combinações de múltiplos termos do modelo de Maxwell e Kelvin em paralelo e em série, respectivamente. Por fim, o **modelo de Huet-Sayegh**, no qual um amortecedor variável é utilizado (em contrapartida aos amortecedores lineares dos casos anteriores).

Ademais, existem **modelos matemáticos**, tais como o modelo que utiliza a **função sigmoideal**. Neste modelo, utilizado para o presente trabalho, o módulo complexo, $|E^*|$, é escrito como:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \frac{1}{e^{\beta + \gamma \log(f_r)}}}. \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

δ , α , β e γ : constantes obtidas através de ajuste;

f_r : a chamada frequência reduzida, em *Hz*.

Como se pode observar na equação que descreve o módulo complexo no modelo matemático da função sigmoideal, o módulo é função apenas da frequência reduzida. A frequência reduzida, f_r , é a frequência correspondente ao carregamento multiplicada por um fator de deslocamento (conhecido como *shift factor*) (MAINA et al., 2011). Este fator de deslocamento, a_T , é o responsável por introduzir correções de temperatura. Deste modo, neste modelo, o módulo complexo passa a ser uma função da temperatura e da frequência do carregamento.

O logaritmo do fator de deslocamento de temperatura é descrito por uma parábola:

$$\log(a_T) = a_1 T^2 + a_2 T + a_3. \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

a_1 , a_2 e a_3 : coeficientes de ajuste.

T : temperatura em $^{\circ}\text{C}$.

São mostrados, a seguir, os resultados fornecidos em relatório pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em misturas aplicadas em pistas experimentais monitoras pela mesma universidade, no âmbito do programa Rede Temática de Asfaltos².

Os testes foram realizados com amostras enviadas ao CENPES (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello), para a caracterização da mistura asfáltica.

Os ensaios realizados para a mistura asfáltica foram:

- determinação do módulo dinâmico nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C, nas frequências de 25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0,5Hz e 0,1Hz, conforme AASTHO T 342.
- determinação do *Flow Number* não confinado, a 60°C e 204kPa – AASTHO TP 79.
- ensaios uniaxiais cíclicos de fadiga S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*) – metodologia CENPES.

De forma que apenas será utilizado o ensaio de determinação do módulo dinâmico para o presente trabalho.

A porcentagem de vazios usada nos corpos de prova (CPs) para cada um dos ensaios é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 – Características dos corpos de provas (CPs)

Ensaio	Porcentagem de Vazios (%)
Módulo dinâmico	5,5±0,5
<i>Flow Number</i>	7,0±0,5
Fadiga S-VECD	5,5±0,5

(fonte: elaborado pelo autor)

A caracterização do ligante asfáltico é mostrada na tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do ligante asfáltico

Especificação Brasileira			
Tipo	Penetração 25°C, 0,1mm	Ponto de amolecimento, °C	Viscosidade Rotacional 135°C, cP
AMP 60/85	61	67,8	1053

(fonte: elaborado pelo autor)

² O relatório não está disponibilizado no presente trabalho.

Por fim, na tabela 3, apresentam-se os valores dos coeficientes de ajuste à curva sigmoidal para avaliação do módulo complexo e à parábola de fator de deslocamento (a temperatura de referência é de 20°C).

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de ajuste

Curva Sigmoidal			
δ	α	β	γ
1,6288	2,7900	0,9925	0,5610
Fator de Deslocamento			
a_1	a_2	a_3	
0,00073	-0,1699	3,1054	

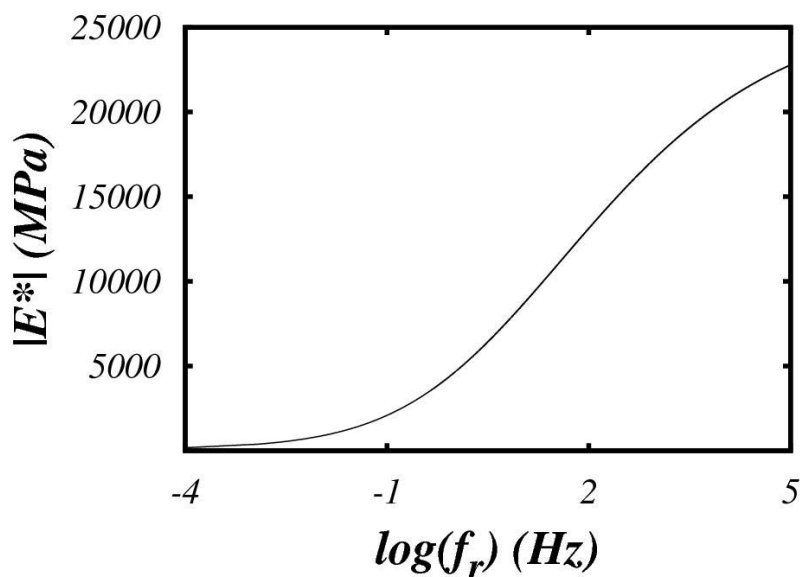
(fonte: elaborado pelo autor)

Logo, a equação para o módulo complexo é escrita como:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \frac{1}{e^{\beta + \gamma \log(f_r)}}}. \quad (\text{Eq. 7})$$

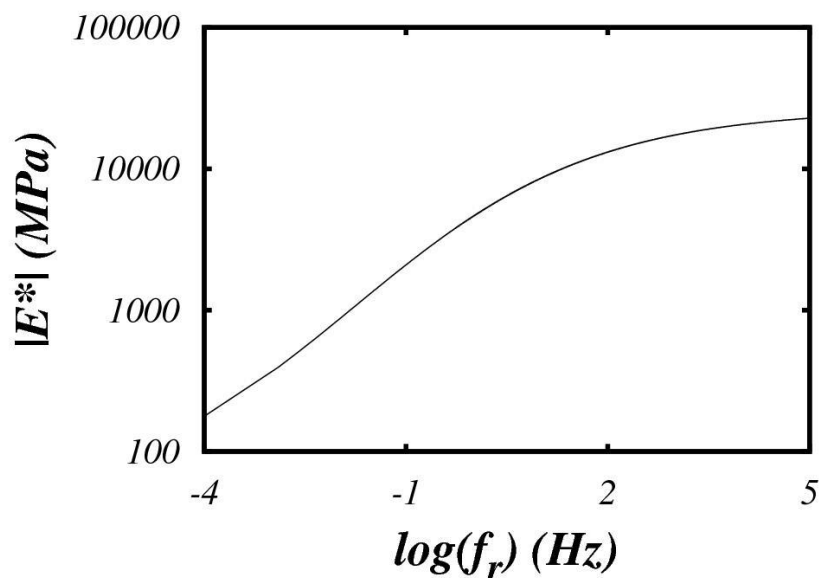
Nesta equação, $|E^*|$ é dado em MPa, enquanto f_r é dado em Hz.

Esta equação é representada graficamente na figura 5, recebendo o nome de curva mestra. No eixo vertical está o valor do módulo complexo, em MPa, e no eixo horizontal está o logaritmo da frequência reduzida. O comportamento do módulo complexo é bem claro com relação à frequência: quanto maior for o valor da frequência, maior é o valor do módulo complexo.

Figura 5 – Curva mestra: $|E^*|$ e $\log(f_r)$.

(fonte: elaborado pelo autor)

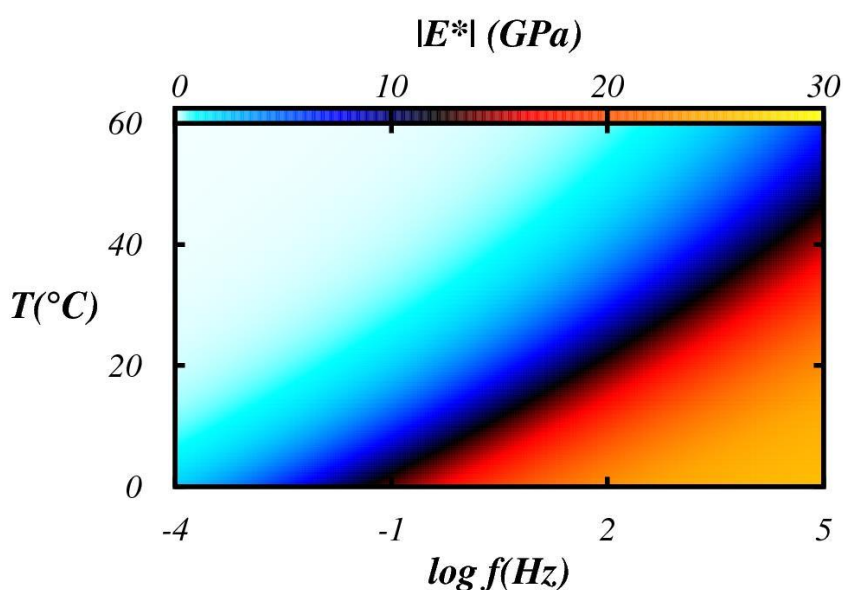
Na figura 6, mostra-se a mesma curva mestra, mas agora utilizando também no eixo vertical a escala logarítmica.

Figura 6 – Curva mestra em escala logarítmica: $\log|E^*|$ e $\log(f_r)$.

(fonte: elaborado pelo autor)

Outras maneiras de observar o comportamento do módulo complexo com relação à variação da temperatura e da frequência são mostradas nas figuras 7 e 8. Na figura 7 (gerada com uma rede de 500 valores distintos de temperatura e 500 valores distintos de frequência, totalizando *2,5 M Pixel*), representa-se o módulo complexo através de cores, em um espaço bidimensional, onde no eixo horizontal está o logaritmo da frequência e no eixo vertical está a temperatura.

Figura 7 – Representação bidimensional do módulo complexo.

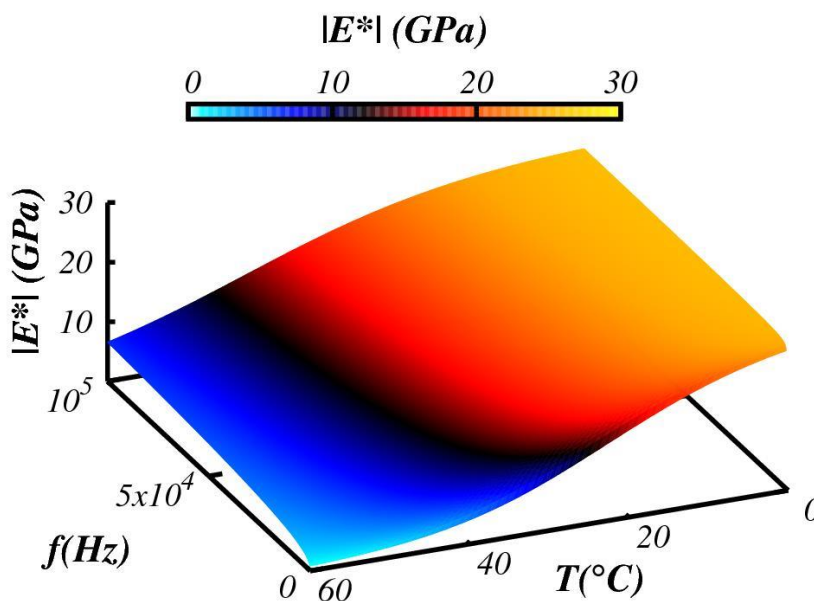


(fonte: elaborado pelo autor)

Enquanto na figura 8, mostra-se o módulo complexo através de cores e de uma superfície em um espaço tridimensional. Na verdade, a figura 7 é uma projeção bidimensional da superfície do módulo complexo nos eixos da temperatura e da frequência.

Nota-se que quanto maior é a frequência, isto é, a taxa de aplicação do carregamento, maior é o valor do módulo complexo. Isto significa que quanto mais lentos forem os veículos, menor é o módulo complexo, o que acarreta em maiores deformações elásticas e permanentes. Observa-se, também, que o aumento da temperatura faz com que o valor do módulo complexo diminua. Este comportamento é característico de materiais viscoelásticos.

Figura 8 – Representação tridimensional do módulo complexo.



(fonte: elaborado pelo autor)

A equação para o fator de deslocamento, por sua vez, é escrita como:

$$a_T = 0,00073T^2 - 0,1699T + 3,1054. \quad (\text{Eq. 8})$$

A temperatura é dada em graus Celsius. Para $T = 20^\circ\text{C}$, o valor do fator de deslocamento é unitário (uma vez que esta temperatura é a temperatura de referência para a curva mestra).

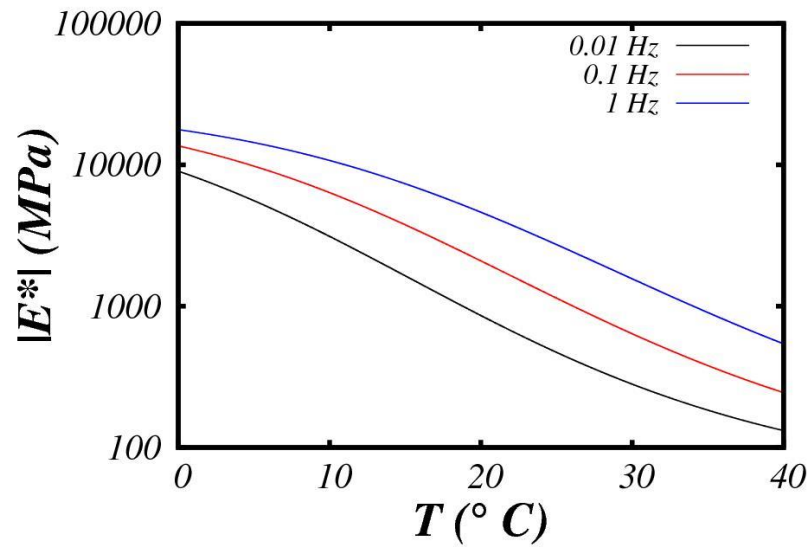
A frequência reduzida, f_r , é obtida através da multiplicação da frequência de carregamento, f , pelo fator de deslocamento:

$$f_r = a_T f. \quad (\text{Eq. 9})$$

Na figura 9 mostra-se a dependência do módulo complexo em relação à temperatura para três valores distintos de frequência: 0,01 Hz, 0,1 Hz e 1 Hz (estas frequências são as frequências de carregamento e **não** as frequências reduzidas).

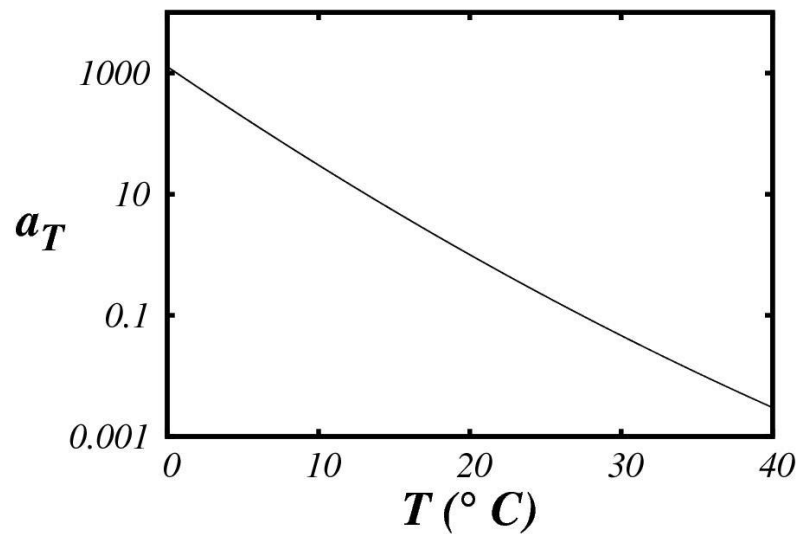
A dependência do fator de deslocamento em relação à temperatura é mostrada na figura 10. Em um gráfico semi-logarítmico, observa-se que o fator de deslocamento decresce com o aumento da temperatura.

Figura 9 – Dependência do módulo complexo em relação à temperatura.



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10 – Dependência do fator de deslocamento em relação à temperatura.



(fonte: elaborado pelo autor)

O relatório forneceu, através de uma representação gráfica, uma curva do ângulo de fase. O ângulo de fase é necessário para avaliar tanto a deformação recuperável quanto a não recuperável. Os pontos fornecidos pelo relatório são mostrados na figura 11, bem como o ajuste feito, representado pela curva sólida de cor azul, que segue a equação:

$$\theta = b_1 \log(f_r)^6 + b_2 \log(f_r)^5 + b_3 \log(f_r)^4 + b_4 \log(f_r)^3 + b_5 \log(f_r)^2 + b_6 \log(f_r) + b_7. \quad (\text{Eq. 10})$$

Os coeficientes do ajuste são mostrados na tabela 4.

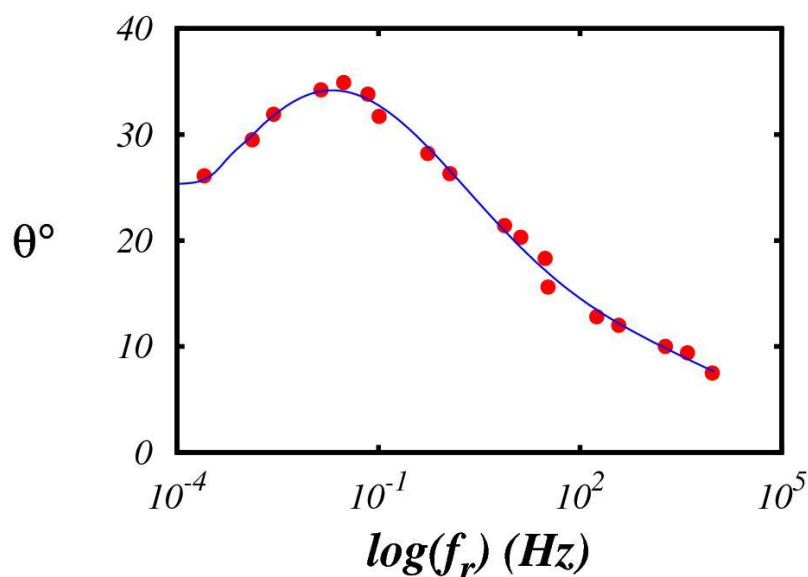
Tabela 4 – Valores dos coeficientes de ajuste

Curva $\theta \times \log(f_r)$						
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
0,0028	-0,0188	-0,0521	0,5937	-0,5422	-6,9026	27,013

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se, na figura 11, que para frequências muito baixas, o ângulo de fase aumenta com o aumento da frequência. Depois de atingir um valor máximo, que ocorre por volta de $f_r = 0,01$, ele decresce com o aumento da frequência. A curva de ajuste é considerada satisfatória ($R^2 = 0,9949$).

Figura 11 – Dependência do ângulo de fase em relação à frequência.



(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, para o coeficiente de Poisson, ν , utiliza-se um modelo (utilizado no *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG*) no qual o coeficiente é dependente do módulo da mistura asfáltica (E_{ac} , dado em *Psi*, que por sua vez, depende da temperatura):

$$\nu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{(a+bE_{ac})}}, \quad (\text{Eq. 11})$$

onde os coeficientes a e b são coeficientes experimentais de ajuste e valem, respectivamente, $a = -1,63$ e $b = 3,84 \times 10^{-6}$ e E_{ac} depende do módulo complexo da mistura.

Considera-se, ainda, que o peso específico da mistura asfáltica seja $\rho \approx 2200 \text{ kg/m}^3$ e que a camada possui uma espessura de 20 cm .

Estes dados são suficientes para completar a caracterização da camada asfáltica.

3.2.2 Caracterização da Camada de Base

Considera-se, como material constituinte da camada de base do pavimento, um material do tipo elástico linear e granular (isto é, com menos de 35% da massa passando pela peneira de $0,075\text{mm}$), classificado como sendo A-1-a, conforme a AASHTO.

O valor do coeficiente de Poisson adotado é $\nu = 0,35$. Desconsideram-se o amortecimento e a presença de água na camada. Assume-se que o peso específico do material constituinte da camada seja $\rho \approx 1940 \text{ kg/m}^3$ e o módulo de elasticidade $E \approx 276 \text{ MPa}$. A espessura utilizada nas simulações é de 30 cm .

3.2.3 Caracterização da Camada de Sub-Base

Considera-se, como material constituinte da camada de sub-base do pavimento, um material do tipo elástico linear, sendo este um macadame.

O valor do coeficiente de Poisson adotado é $\nu = 0,35$. Desconsideram-se o amortecimento e a presença de água na camada. Assume-se que o peso específico do material constituinte da camada seja $\rho \approx 1940 \text{ kg/m}^3$ e o módulo de elasticidade $E \approx 250 \text{ MPa}$. A espessura utilizada nas simulações é de 20 cm .

3.2.4 Caracterização da Camada de Subleito

Considera-se, como material constituinte da camada de base de subleito, um material do tipo elástico linear, sendo este um material argiloso.

O valor do coeficiente de Poisson adotado é $\nu = 0,4$. Desconsideram-se o amortecimento e a presença de água na camada. Assume-se que o peso específico do material constituinte da camada seja $\rho \approx 1700 \text{ kg/m}^3$ e o módulo de elasticidade $E \approx 120 \text{ MPa}$. A espessura utilizada nas simulações é virtualmente infinita.

3.2.5 Resumo das Propriedades das Camadas

De uma forma resumida, as propriedades de cada uma das camadas são mostradas na tabela 5.

Tabela 5 – Resumo das propriedades de cada uma das camadas

Propriedades das Camadas				
Camada	Camada Asfáltica	Base	Sub-base	Subleito
Espessura (cm)	15	25	20	∞
Módulo de Elasticidade/Complexo (MPa)	Módulo Complexo/Curva Mestra	276	250	120
Coefficiente de Poisson	Modelo	0,35	0,35	0,40
Peso Específico (kg/m³)	2200	1940	1940	1700

(fonte: elaborado pelo autor)

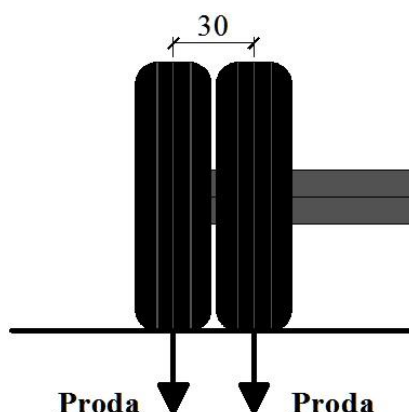
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CARREGAMENTO

A deformação permanente é um fenômeno dependente da história do pavimento. Logo, seria necessário o conhecimento dos valores de todas as cargas passantes no pavimento, bem como a velocidade de aplicação destas cargas (e, em um nível de precisão ainda maior, a distribuição de pressão entre os pneus dos veículos e a camada asfáltica). Deste modo, uma das grandes limitações do trabalho ocorre pela não consideração de um espectro de cargas realista e condizente com as condições de tráfego atuais das rodovias brasileiras. O motivo do negligenciamento do espectro de cargas está conectado à limitação do programa utilizado, que permite a definição de apenas um tipo de veículo passante.

A escolha do tipo de carga passante é feita conforme a caracterização do eixo-padrão rodoviário, expressa no Manual de Estudos de Tráfego do DNER (DEPARTAMENTO

NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1981), onde a carga sobre ele é de $8,2 t$. Considerando que as deformações permanentes sejam simétricas (o que não é verdade – devido à inclinação no perfil transversal das rodovias), o problema pode ser reduzido levando-se em conta apenas o semieixo, composto por duas rodas, distantes de $30 cm$ entre seus planos verticais-longitudinais de simetria, onde a carga em cada roda é de $2,05 t$ ou, aproximadamente, $P_{roda} = 20 kN$. Este esquema é mostrado na figura 12.

Figura 12 – Esquema simplificado do semieixo utilizado.



(fonte: elaborado pelo autor)

A distribuição das pressões de um pneu sobre um pavimento asfáltico é um tema assaz complexo e atual, que tem dado origem a diversos trabalhos e artigos em diversas revistas deste campo de estudo (DE CARVALHO, 2012). A forma como ocorre essa distribuição pode alterar significativamente as deformações permanentes, tanto em forma, quanto em magnitude.

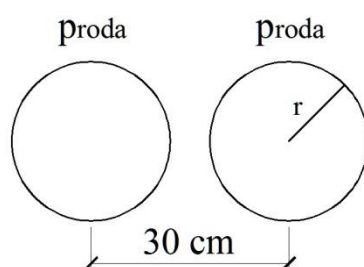
O programa *3D-MOVE* oferece a possibilidade de realizar as simulações com distribuições arbitrárias pelo usuário, bem como, possui um banco de dados com vários tipos de veículos padrões, com distribuições de pressões, número de eixos e rodas e cargas pré-estabelecidas.

Para o presente trabalho, considera-se que cada pneu exerce uma distribuição de pressão uniformemente distribuída sobre um círculo perfeito, de modo que a integração desta pressão sobre a área do círculo corresponda, exatamente, à carga sobre cada roda. O valor desta pressão também afeta na forma e na magnitude das deformações permanentes. Maiores

pressões levam a uma redução da área de contato e maiores deformações locais, embora o trilho de roda seja mais estreito.

A pressão escolhida é a pressão de inflação dos pneus, considerada como $p_{roda} = 560 \text{ kPa}$ (o que é um valor usual para esta pressão). Isto leva a um círculo com $r \approx 10,8 \text{ cm}$. Um esquema simplificado das pressões é mostrado na figura 13 (sem escala).

Figura 13 – Esquema simplificado das pressões de contato.



(fonte: elaborado pelo autor)

Feitas estas considerações, iniciam-se as simulações no programa *3D-MOVE*.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se os resultados das simulações considerando diferentes temperaturas da camada asfáltica e diferentes velocidades de carregamento. Dentro desta análise *ceteris paribus*, o carregamento escolhido é o semieixo padrão.

4.1 INTRODUÇÃO AO 3D-MOVE

O 3D-MOVE é um *software* disponibilizado pela *University of Nevada Reno*³. Este software possui como objetivo fornecer repostas do pavimento, como distribuições de tensões, considerando cargas passantes sobre o pavimento das mais diversas formas. O modelo computacional inclui a possibilidade de se estabelecer diferentes distribuições de pressões para o contato dos pneus com o pavimento, bem como inclui efeitos de temperatura e de velocidade de aplicação das cargas, através da definição da curva mestra da mistura asfáltica. O princípio adotado pelo programa é o das camadas finitas.

As respostas do pavimento, em termos de fadiga e deformações permanentes são feitas através de dois tipos de modelos: NCHRP 1-37A (um modelo desenvolvido pelo *National Cooperative Highway Research Program*) e VESYS. Estes modelos são mecanísticos-empíricos e avaliam de uma forma semi-analítica o desempenho dos pavimentos flexíveis. Estes modelos, por exemplo, avaliam a porcentagem da superfície do pavimento com a presença de panelas, baseado nos valores analíticos fornecidos da deformação elástica de cada camada do pavimento. Os modelos foram calibrados com dados de campo e laboratoriais de vários locais dos Estados Unidos da América.

O programa trabalha com uma interface amigável e simples. Primeiramente, seleciona-se o tipo de análise (estática ou dinâmica) e, no caso de análise dinâmica, determina-se a velocidade do veículo em análise.

As etapas seguintes são de fornecimento de dados de entrada para alimentar o programa.

³ *Software* disponível em: www.arc.unr.edu/Software.html.

- Configuração do eixo e distribuição da pressão de contato entre os pneus e o pavimento;
- O tipo de suspensão do veículo e a rugosidade da rodovia (estes fatores influenciam diretamente nas respostas do pavimento – considera-se uma suspensão com quatro molas e uma rodovia com rugosidade suave, isto leva um coeficiente de carga dinâmica, *Dynamic Load Coefficient*, de 0,04 para velocidades de 40 e 60 km/h e 0,07 para velocidades de 80 e 100 km/h);
- Informações do tráfego sobre o pavimento;
- Estrutura do pavimento (número de camadas, espessura e o tipo de material que compõem cada uma das camadas – viscoelástico linear ou elástico linear);
- Propriedades mecânicas de cada uma das camadas;
- Escolha pelo tipo de modelo para a performance do pavimento e atribuição valores limites de aceitação;
- Pontos de análise (em um relatório final são apresentados os valores das tensões e deformações nestes pontos);
- E, por fim, selecionam-se os resultados que se deseja conhecer (tensões e deformações).

O *software* possui limitações importantes, especialmente, quanto às informações de tráfego e a temperatura. O programa permite criar quatro estações ao longo do ano, onde o número de repetições diárias do eixo determinado é fixo, havendo, ainda, a possibilidade de um acréscimo anual na quantidade de eixos passantes (crescimento da demanda). Entretanto, a configuração do eixo é única, não havendo a possibilidade de montar um espectro de cargas. Além disto, a velocidade do eixo também é única. Da mesma forma, não há possibilidade de incluir uma distribuição de velocidades às simulações. Em suma, isto corresponderia ao tráfego de **apenas um tipo de veículo**, com a **mesma carga** e sempre à **mesma velocidade** sobre o pavimento.

A **temperatura**, assim como a velocidade, é **única para toda a análise**. Como a deformação permanente depende do histórico das cargas passantes no pavimento, e, certamente, ao longo da vida útil do pavimento, a temperatura da camada asfáltica sofre variações que não são desprezíveis, esta consideração simplista afasta o resultado das simulações de uma comparação direta com os resultados de campo.

O programa permite que se entre com os resultados de laboratório para a avaliação do módulo dinâmico, assim como para o ângulo de fase, e ele, através destes dados, gera a curva mestra.

A curva mestra fornece o valor do módulo complexo como função da velocidade da carga e da temperatura (a curva gerada é do tipo sigmoide ou através de interpolação).

O modelo de deformação utilizado no presente trabalho é o modelo VESYS, que é um modelo bem estabelecido probabilístico e mecanístico para análise computacional de pavimentos flexíveis. Ele é baseado em modelos elásticos para materiais homogêneos por camadas, com algumas considerações da teoria viscoelastoplástica. Através dele é possível calcular tensões, deformações, deflexões, deformações permanentes, rugosidade e danos causados por fadiga. O VESYS foi calibrado utilizando dados de campo da AASHTO, simuladores de tráfego dos Estados Unidos da América, entre outros.

O modelo de deformação permanente do programa é dado para cada camada e para o sistema, como um todo. A deformação de cada camada é expressa como:

$$R_D = \int_{N_1}^{N_2} U_s^+ \frac{e_t}{e_s} \mu_{sub} N^{-\alpha_{sub}} dN + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{N_1}^{N_2} (U_i^+ - U_i^-) \mu_i N^{-\alpha_i} dN, \quad (\text{Eq. 4.12})$$

onde:

R_D : é a deformação permanente de cada camada;

U_i^+ e U_i^- : são as deflexões no topo e no fundo da camada i devido ao grupo de eixos;

U_s^+ : é a deflexão no topo do subleito;

e_t : é a deformação no topo do subleito devido ao grupo de eixos;

e_s : é a deformação no topo do subleito devido a um eixo apenas;

μ_{sub} e α_{sub} : são parâmetros de deformação do subleito;

μ_i e α_i : são parâmetros de deformação da camada i .

A deformação permanente do sistema trata o sistema como um todo, calculando, para isso, parâmetros de deformação do sistema μ_{sys} e α_{sys} , que são funções da repetição de cargas, determinados por regressão de mínimos quadrados. Assim, a deformação permanente do pavimento é estimada como:

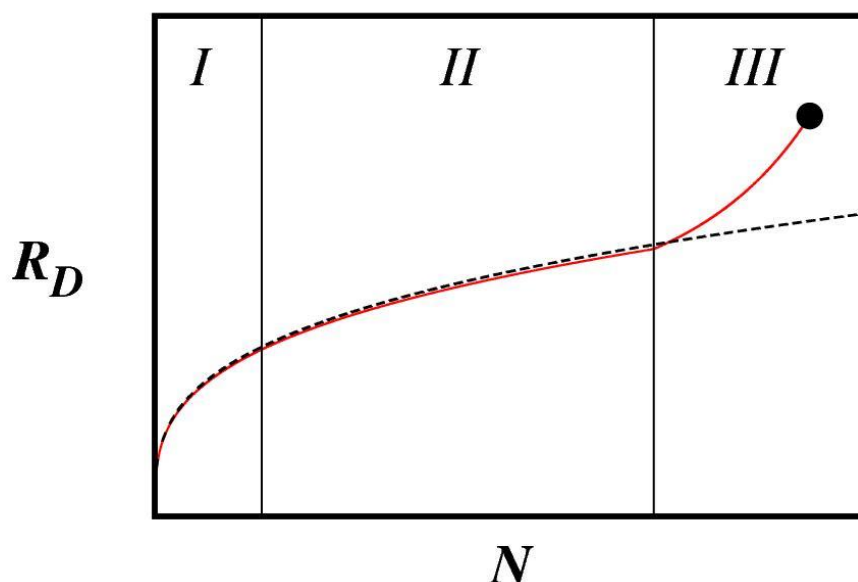
$$R_D = \int_{N_1}^{N_2} U \mu_{sys} N^{-\alpha_{sys}} dN, \quad (\text{Eq. 4.13})$$

onde:

U : é a deflexão na superfície do pavimento.

O *software* é capaz de prever as deformações do pavimento estudado na **fase de pré-compactação**, onde as deformações permanentes, R_D , são grandes para cada passagem de eixo (esta fase corresponde à região I mostrada na figura 14) e na **fase estável**, onde as deformações crescem quase que linearmente com o número de eixos passantes (esta fase corresponde à região II mostrada na figura 14). Entretanto, ele é incapaz de prever as deformações permanentes na **fase instável** (representada pela região III na figura 14). Desta forma, a curva tracejada da figura 14, que corresponde à predição do modelo, afasta-se significativamente da curva vermelha, que corresponde às deformações permanentes que ocorrem no pavimento real. (CHALMERS)

Figura 14 – Evolução das deformações permanentes R_D .



(fonte: adaptado de Chalmers)

A **fase instável** ocorre em pavimentos reais e ela se deve a diversos fatores, entre eles a fadiga do pavimento. Nesta fase, as deformações aumentam significativamente a cada passagem de

eixo, levando rapidamente à inutilização do pavimento (assinalada com um círculo preenchido na figura 14).

4.2 SIMULAÇÕES

Como previamente mencionado, as simulações realizadas neste trabalho são feitas considerando diferentes temperaturas da camada asfáltica e diferentes velocidades de carregamento. Isto é feito do seguinte modo: primeiramente, fixa-se o valor da temperatura da camada asfáltica e da velocidade, variando-se o número de semieixos padrão passantes (rodam-se as simulações no intervalo de 10^7 a 10^8 semi eixos passantes). Em seguida, varia-se a velocidade do carregamento (utilizando 40, 60, 80 e 100 *km/h*). Por fim, varia-se a temperatura da camada (20, 30, 40 e 50°C). Isto perfaz mais de 100 simulações no total. O plano de simulações é resumido na tabela 6. O período em que o tráfego ocorre utilizado na simulação é de três anos.

Tabela 6 – Plano de Simulações

Temperatura (°C)	Velocidade (km/h)	# Semieixos padrão passantes
20	40/60/80/100	$10^7 - 10^8$
30	40/60/80/100	$10^7 - 10^8$
40	40/60/80/100	$10^7 - 10^8$
50	40/60/80/100	$10^7 - 10^8$

(fonte: elaborado pelo autor)

4.3 RESULTADOS

Nesta seção são mostrados os resultados obtidos através das simulações numéricas.

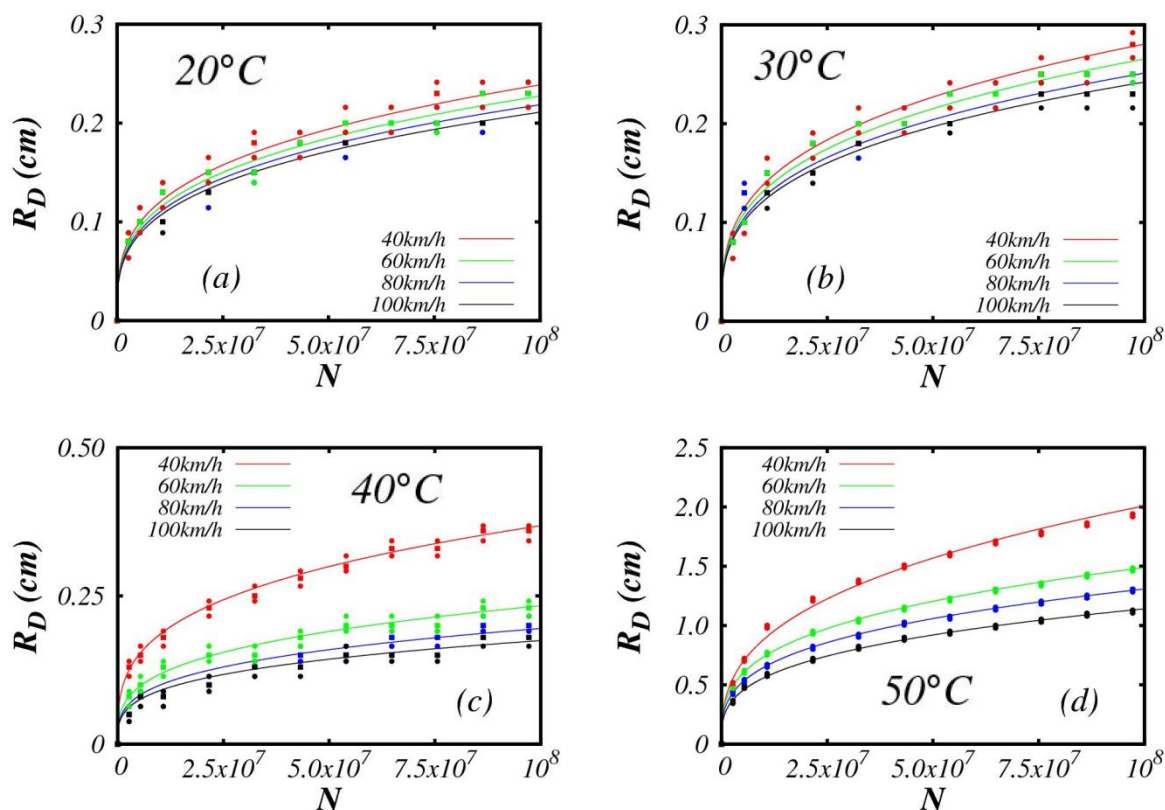
4.3.1 Simulações a Temperatura Constante

Primeiramente, são apresentados os resultados da deformação permanente como função do número N de eixos passantes e da velocidade dos veículos sobre o pavimento. Na figura 15, mostram-se os gráficos da deformação permanentes considerando quatro temperaturas diferentes (20, 30, 40 e 50°C), onde a temperatura correspondente ao painel (a) é de 20°C; ao painel (b) é de 30°C; ao painel (c) é de 40°C; e, finalmente, ao painel (d) é de 50°C. Como

mencionado anteriormente, o *software* fornece apenas as deformações permanentes considerando as fases de pré-compactação e estável.

O eixo vertical dos painéis representa a deformação permanente (em *cm*), enquanto o eixo horizontal representa o número de semieixos padrão passantes. As cores dos painéis indicam a velocidade dos veículos. As curvas sólidas são resultados de um ajuste a uma curva do tipo $R_D = a_1 N^{a_2}$, onde a_1 e a_2 são coeficientes de ajuste. Cada quadrado preenchido representa uma simulação. Os círculos preenchidos correspondem aos limites inferior e superior para cada uma das simulações. Os limites são indicados explicitamente, pois o programa possui um intervalo de precisão (que é de um centésimo de polegada, ou seja, 0,0254 *cm* – logo, o intervalo que representa cada simulação é de cinco milésimos de polegada para mais ou para menos). O número de eixos passantes N é compatível com um pavimento de tráfego intenso.

Figura 15 – Resultado das simulações para as deformações permanentes R_D .



(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se, como comportamento padrão em todos os painéis, que as deformações permanentes crescem à medida que se aumenta o número de semieixos passantes, como esperado.

No caso do painel (a), gerado para a temperatura de 20°C , o valor máximo da deformação (através da curva de ajuste) é de aproximadamente $0,25\text{ cm}$, para uma velocidade de 40 km/h e depois da passagem de 10^8 semieixos. A diferença para as outras velocidades consideradas é tão pequena que, para quase todo o intervalo considerado para N , os resultados obtidos pelas simulações se sobrepuseram. Uma explicação razoável para estes resultados é que o módulo complexo, provavelmente, depende muito pouco da velocidade para esta temperatura. Ainda assim, é possível ver, através das curvas de ajuste, que o aumento da velocidade diminui a deformação permanente na camada asfáltica.

No painel (b), produzido para a temperatura de 30°C , o valor máximo da deformação é de cerca de $0,28\text{ cm}$, para uma velocidade de 40 km/h e depois da passagem de 10^8 semieixos. A separação entre as curvas é um pouco maior do que a do painel (a). Novamente, as deformações permanentes aumentam com a redução da velocidade.

Para a temperatura de 40°C , correspondente ao painel (c), a deformação máxima é de cerca de $0,35\text{ cm}$ para velocidade de 40 km/h e depois da passagem de 10^8 semieixos. Há uma diferença significativa da deformação para esta velocidade com relação às outras (esta diferença é de cerca de 30% para a velocidade de 60 km/h). Isto indica que a dependência com relação à velocidade é, relativamente, maior para esta temperatura.

Por fim, para a temperatura de 50°C , mostrada no painel (d), a deformação máxima é $2,00\text{ cm}$ para a velocidade de 40 km/h e depois da passagem de 10^8 semieixos. As deformações permanentes para o mesmo número de passagens, mas com velocidades diferentes, ultrapassam facilmente o valor de $1,00\text{ cm}$, que é bastante superior em comparação às temperaturas anteriormente analisadas. Isto evidencia a forte dependência do módulo complexo com relação à temperatura, em especial no intervalo entre 40°C e 50°C .

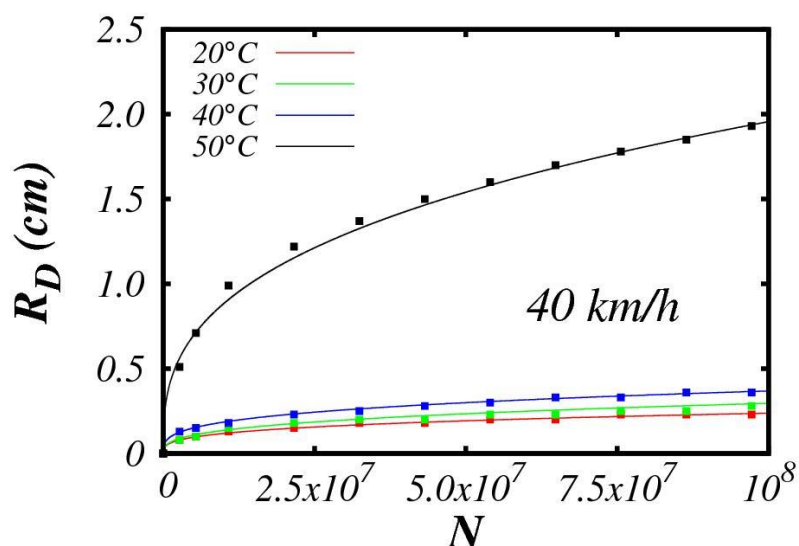
De modo geral, observa-se que as deformações permanentes acontecem de forma mais pronunciada para temperaturas mais elevadas e velocidades menores e, ainda, que elas dependem da intensidade do tráfego (número de semieixos passantes).

4.3.2 Simulações a Velocidade Constante

Nesta subseção, fixa-se o valor da velocidade, em 40 km/h , e são mostradas curvas de deformação permanente para diferentes temperaturas da camada asfáltica.

Como pode ser visto na figura 16, as deformações crescem com o aumento da temperatura e, além disto, o crescimento não é dado de forma linear. Os valores de deformação permanente para a temperatura de 50°C são muito superiores aos obtidos para as demais temperaturas. Isto se deve ao fato de que, nesta região, o módulo complexo da mistura asfáltica é muito menor do que para as demais temperaturas. Em adicional, o ângulo de fase da mistura, para temperaturas próximas a essa, deve aumentar ainda mais as deformações plásticas.

Figura 16 – Resultado das simulações para as deformações permanentes R_D .



(fonte: elaborado pelo autor)

É importante ressaltar, com este estudo, que quando a camada asfáltica atinge um determinado intervalo de temperaturas altas (especialmente temperaturas próximas ao ponto de amolecimento da mistura), o dano causado na camada, em termos de deformações permanentes, é bastante superior ao causado por temperaturas inferiores. Chama-se a atenção para a diferença nos valores de deformação para $N = 10^8$: o valor de R_D é quase cinco vezes maior para a temperatura de 50°C do que para a temperatura de 40°C , enquanto a diferença entre as deformações de 40°C para 20°C é menos do que a metade.

Resumidamente, para este pavimento e sobre as circunstâncias descritas, o efeito causado pela passagem de um semieixo padrão, no que diz respeito às deformações permanentes, a uma temperatura de 50°C é equivalente à passagem de **cinco** semieixos padrão a uma temperatura de 40°C .

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, se determinou as características gerais de um pavimento com revestimento asfáltico: número de camadas; espessura de cada camada; materiais constituintes de cada camada; caracterização de cada material. Todas essas características foram mantidas fixas ao longo do trabalho.

A caracterização da camada asfáltica foi possível graças ao acesso a um relatório fornecido pelo laboratório CENPES, de uma mistura asfáltica. Com a posse deste relatório, determinou-se a curva mestra para a mistura asfáltica através da curva sigmoideal. Como foi mostrado ao longo deste trabalho, o módulo complexo da mistura é uma função da frequência (que por sua vez está relacionada com a velocidade) de aplicação de carga e da temperatura. À medida que a temperatura da mistura aumenta, o seu módulo complexo diminui. Isto faz com que as deformações permanentes, em princípio, sejam maiores para temperaturas mais elevadas. Da mesma forma, à medida que a frequência aumenta (o que corresponde a maiores velocidades), o módulo complexo também aumenta. Assim, para velocidades maiores, as deformações permanentes devem ser menores.

Este comportamento é típico de materiais viscoelásticos, tal como é considerada a mistura asfáltica. Como forma de observar o impacto destas duas variáveis (velocidade e temperatura) sobre as deformações permanentes, de uma forma quantitativa, utilizou-se um *software* fornecido pela *University of Nevada Reno* para simular a vida de um pavimento e, com isto, avaliar as deformações permanentes em função do número de semieixos padrão passantes (o semieixo padrão utilizado é definido ao longo do trabalho).

Geraram-se gráficos mostrando a evolução das deformações permanentes fixando-se a temperatura do pavimento. O objetivo destes gráficos foi de mostrar que as deformações permanentes são função da velocidade dos veículos. Concluiu-se que, como era esperado, para velocidades mais elevadas, a deformação permanente é menor. Para as temperaturas de 40°C e 50°C , a diferença relativa de deformação entre as velocidades de 40 km/h e 60 km/h para 10^8 semieixos passantes foi de cerca de 30%. Para temperaturas inferiores, a diferença relativa das deformações permanentes entre essas velocidades não foi tão grande.

Por fim, mostrou-se um gráfico da evolução das deformações permanentes para uma velocidade fixa (40 km/h), onde cada curva representou uma temperatura diferente. As deformações permanentes mostraram novamente o comportamento esperado. Para maiores temperaturas, houve maiores deformações. Chama-se a atenção para a temperatura de 50°C: para esta temperatura, as deformações permanentes foram **muito** maiores do que para as outras temperaturas. Com isto, conclui-se que temperaturas da mistura asfáltica muito elevadas, provavelmente próximas do ponto de amolecimento, levam a deformações permanentes muito grandes.

Como as deformações permanentes dependem do histórico de deformações do pavimento, uma série de dias com temperaturas muito elevadas pode comprometer a sua vida útil, devido às deformações excessivas.

Portanto, em regiões onde a temperatura da camada asfáltica pode atingir, com frequência, valores próximos ao do ponto de amolecimento do asfalto, faz-se necessário a inclusão da possibilidade de usar outra mistura que se deforme menos neste intervalo de temperatura.

O trabalho considerou, para cada simulação, um valor único para as velocidades dos veículos, bem como, uma temperatura única para a camada asfáltica ao longo de todo o período de vida analisado (além é claro de apenas um tipo de carregamento: o semieixo padrão). Embora estas considerações não representem a realidade, uma vez que a temperatura varia ao longo do tempo e há, também, uma distribuição de velocidades para os veículos, as próprias limitações do *software* propiciaram um entendimento claro sobre o impacto da velocidade dos veículos e da temperatura sobre o pavimento.

Com as análises apresentadas, os efeitos da velocidade de aplicação da carga, da intensidade do tráfego (em termos de número de semieixos passantes) e da temperatura foram completamente isolados. Como resultado final, obtiveram-se as deformações permanentes como funções, justamente, destas variáveis. Desta maneira, por exemplo, pôde-se concluir que o aumento da temperatura do pavimento acarreta em deformações permanentes mais pronunciadas e pôde-se concluir, ainda, que se as velocidades dos veículos forem maiores, o dano sobre o pavimento, em termos das deformações permanentes na camada asfáltica, são menores.

Como uma proposta de um trabalho futuro, seria interessante comparar as deformações permanentes da camada asfáltica para diferentes misturas asfálticas (mantendo as outras camadas do pavimento inalteradas), dentro de um intervalo de temperaturas compatível com o local de execução do pavimento. Os resultados obtidos pelo programa podem ser úteis na tomada de decisão pela mistura asfáltica a ser utilizada.

As deformações permanentes são dependentes do histórico de deformações, e tráfego, do pavimento. Um exercício interessante seria gerar curvas para a deformação permanente para diferentes temperaturas e diferentes velocidades – mostrando a evolução das deformações com relação ao número N . Com base nestas curvas, poder-se-ia fazer o ajuste de cada uma delas. Com as curvas de ajuste, poder-se-ia simular o comportamento do pavimento de uma forma mais realista.

A ideia envolvida é gerar uma evolução temporal das deformações. Por exemplo, separar-se-ia o dia em períodos de uma hora. Neste período, assume-se que a temperatura do pavimento é constante (aqui, um modelo relacionando a temperatura ambiente, intensidade de radiação solar e a temperatura da mistura asfáltica exposta a essas condicionantes deveria ser explorado, assim como um modelo estatístico para descrever a temperatura ao longo do dia) e que um certo número de veículos tenha passado pelo pavimento (outro modelo estatístico faz-se necessário para estimar o número de veículos que passam pela via no período desejado).

Com as curvas de ajuste, o valor da deformação permanente acumulada antes do intervalo de tempo desejado, o número N passantes e a temperatura no período, seria possível projetar a deformação permanente no fim deste período.

Certamente, o resultado obtido com estas considerações seria mais próximo da realidade. Entretanto, embora que essa análise seja aprimorada *ad infinitum*, a natureza não é e jamais será completamente capturada pelo entendimento humano. A presença de água, má drenagem, má compactação local das camadas inferiores ou outros efeitos é de difícil previsão e pode modificar significativamente os valores medidos *in situ*.

Exprime-se aqui a importância de haver um acompanhamento e monitoramento adequado sobre as condições das vias, como forma de gerar dados para posterior comparação com simulações numéricas e modelos empíricos. Tanto as simulações quanto os modelos

empíricos podem ser de grande valia no dimensionamento de pavimentos com a finalidade de aumentar o seu tempo de vida.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. W. **Mechanistic-Empirical Modelling of Flexible Pavement Performance: Verifications Using APT Measurements**. 2014. 76 p. Dissertação (Doutorado em Ciências) – Department of Transport Science, Division of Highway and Railway Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2014.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, D. C., 1986.
- BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. 363 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1. ed. (3. reimpr.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2006 (reimpr. 2010).
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2014: relatório gerencial**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relGeral.aspx?origem=2>>. Acesso em: 08 jun. 2015.
- DE CARVALHO, R. L. E. **Prediction of permanent deformation in asphalt concrete**. 2012. 262 p. Dissertação (Doutorado em Filosofia) – Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park, 2012.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER: manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 1981. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/M%C9TODO%20DE%20ROJETO%20DE%20PAVIMENTOS%20FLEX%CDVEIS.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2015.
- _____. **DNER-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME043-95.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2015.
- _____. **DNER-ME 049/94: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME049-94.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT: manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2015.
- KALISKE, M.; ROTHERT, H. Formulation and implementation of three-dimensional viscoelasticity at small and finite strains. **Computational Mechanics**, v. 19, p. 228-239, 1997.

MAINA, J. W.; ANOCHIE-BOATENG, J.; MATSUI, K. Application of visco-elastic models to flexible pavement analysis. In: Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 10, 2011, KwaZulu-Natal, South Africa, **Electronic Proceedings...** CAPSA'11: 2011. Não paginado. Disponível em: <<http://www.capsa-events.co.za/paperdir/approved/80-1040.pdf>>⁴.

MAINARDI, F.; SPADA, G. Creep, Relaxation and Viscosity Properties for Basic Fractional Models in Rheology. **The European Physical Journal: Special Topics**, v. 193, p. 133-160, 2011.

PINTO, S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. 1991. 478 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/28-doutorado/45-1991?Itemid=>. Acesso em: 08 jun. 2015.

ROHLFES JÚNIOR, J. A. Estudo do comportamento de um solo residual melhorado através de técnicas mecânicas e físico-químicas e sua aplicação à análise de fundações superficiais. 1996. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2225/000227959.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

XU, Q. **Development of a computational method for inverting dynamic moduli of multilayer systems with applications to flexible pavements under FWD tests**. 2014, 223 p. Dissertação (Doutorado em Filosofia) – Faculty of the Graduated School of The University of Texas at Austin, University of Texas, Austin, 2014.

YAO, B.; CHENG, C.; WANG, X.; CHENG, G.; LIU, S. Y. Modelling the Rheological Properties of Epoxy Asphalt Concrete. **Journal of Harbin Institute of Technology**, v. 20, n. 6, p. 106-111, 2013.

⁴ O link não se encontra mais disponível.