

BRENO SANTOS ARRIVABENI

**ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL DA MANUTENÇÃO DE
ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS UTILIZANDO O *DIGITAL TWIN***

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Carlos Cardoso Machado

Coorientadora: Raiane R. Machado Gomes

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A777a
2021 Arrivabeni, Breno Santos, 1989-
Análise técnica, econômica e socioambiental da
manutenção de estradas não pavimentadas utilizando o *Digital
Twin* / Breno Santos Arrivabeni. – Viçosa, MG, 2021.
110 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Carlos Cardoso Machado.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 95-104.

1. Estradas - Manutenção e reparos. 2. Highway
Development and Management (Software). I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal.
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.93834


BRENO SANTOS ARRIVABENI

**ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL DA MANUTENÇÃO DE
ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS UTILIZANDO O *DIGITAL TWIN***

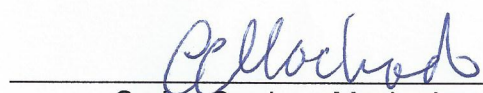
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de janeiro de 2021.

Assentimento:



Breno Santos Arrivabeni
Autor



Carlos Cardoso Machado
Orientador

*A Deus;
aos meus Santos;
à Intervenção Divina!*

*À minha família;
aos meus amigos;
à Viçosa!*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tanto!

À minha família, meu tesouro, pelo amor e carinho inestimáveis.

À Universidade Federal de Viçosa, por todos os anos de aprendizado, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal.

Ao Professor Carlos Machado pela orientação, paciência e, sobretudo, pela confiança em mim depositada.

Aos meus amigos, pelos incentivos e momentos compartilhados.

E a todos que, de alguma forma, colaboraram para que esse caminho fosse percorrido, esse ciclo fosse concluído, esse sonho fosse realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Gratidão!

RESUMO

ARRIVABENI, Breno Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2021. **Análise técnica, econômica e socioambiental da manutenção de estradas não pavimentadas utilizando o *Digital Twin***. Orientador: Carlos Cardoso Machado. Coorientadora: Raiane Ribeiro Machado Gomes.

Devido à indiscutível importância estratégica da infraestrutura rodoviária, a qualidade das estradas torna-se atualmente um objetivo urgente, especialmente em se tratando de estradas florestais. Pelo fato de não possuírem uma camada selante, tais vias tornam-se mais susceptíveis aos efeitos de degradação e inviabilização do tráfego, requerendo maior atenção em sua construção e manutenção. O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho das práticas de manutenção de estradas não pavimentadas no âmbito técnico, econômico e socioambiental, evidenciando as melhores propostas a nível de projeto. Buscou-se também discutir a associação do software HDM-4 (*Highway Development & Management*) ao conceito de *Digital Twin* na gestão de vias em empreendimentos florestais. As análises se basearam na configuração do sistema HDM-4 com dados de entrada de interesse, os quais consideraram características da rede viária estudada, do tipo de veículo utilizado e de padrões de manutenção a serem adotados nas vias alvo. A associação dessas informações permitiu a formação de cenários, os quais consideraram a reposição e a não reposição de cascalho sobre as vias como metodologia de estudo. Os panoramas mais viáveis técnica, econômica e ambientalmente foram selecionados para simulação no software Simio, visando a obtenção de modelos virtuais representativos do projeto físico, característicos do conceito de *Digital Twin*. O cenário mais eficaz ao não se considerar a reposição de cascalho foi o de subleito cascalhoso, situado em clima tropical, com vias planas de 90 km de distância, espessura inicial de 175 mm de cascalho, alta intensidade de tráfego e submetidas a manutenções de alto nível a cada 30 dias. Ao se considerar a reposição, o panorama ideal foi o de subleito cascalhoso, situado em clima temperado, com vias onduladas de 30 km de distância, espessura inicial de 175 mm de cascalho, alta intensidade de tráfego e também submetidas a manutenções de alto nível a cada 30 dias. A adoção da alta manutenção apresentou-se como a mais viável por maximizar a qualidade das vias e proporcionar melhores benefícios líquidos totais, menores índices de emissão de gases, consumo mais baixo de combustível e pneus e suficiente condição do pavimento ao final do projeto. O nível

de manutenção adotado nas estradas, com e sem reposição de cascalho, apresentou impacto direto na frota necessária, sendo exigido às vias submetidas à baixa intervenção um número maior de veículos para suprimento da demanda. A simulação de tempo e movimento se mostrou satisfatória no cenário de interesse, tendo sido possível a definição da escala diária de trabalho, formação de turnos e cumprimento da carga horária exigida, em conformidade com os padrões almejados. A união do software HDM-4 como Sistema de Gerência de Pavimentos ao software Simio como ferramenta de simulação de Gêmeos Digitais, pode perfeitamente fundamentar a tomada de decisões no que tange às rodovias, em especial às estradas não pavimentadas. Trabalhos como este são de grande importância para se definir os efeitos das práticas de manutenção na qualidade das vias e sobretudo na gestão do transporte florestal.

Palavras-chave: Gêmeo Digital. Estrada não pavimentada. HDM-4.

ABSTRACT

ARRIVABENI, Breno Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2021. **Technical, economical and socio-environmental analysis of the unpaved roads maintenance using *Digital Twin***. Adviser: Carlos Cardoso Machado. Co-adviser: Raiane Ribeiro Machado Gomes.

Roads bear undeniable strategic importance to highway infrastructure; thus, their quality is an imperative matter, especially when it comes to forest roads. As they do not have a sealant coating, forest roads are more susceptible to degradation and traffic obstruction, requiring a better construction and maintenance attention. This study aimed to assess the performance of maintenance practices carried out on unpaved roads in technical, economic, and socio-environmental scopes, and to show the best project proposals. Another objective was to discuss the association of the software HDM-4 (*Highway Development & Management*) with the *Digital Twin* concept for managing roads in forest enterprises. The analyses consisted of inputting the HDM-4 system with the data of interest, which considered characteristics of the studied road network, the type of used vehicle, and the maintenance standards to be adopted on the target roads. The association of this information made it possible to envision scenarios that consider either the replacement or non-replacement of gravel materials on the roads as a methodology. The most technically, economically, and environmentally viable panoramas were selected for simulation in the software Simio, aiming at obtaining virtual models representative of the physical project, characteristic of the *Digital Twin* concept. The most effective scenario, disregarding gravel surface materials replacement, was that with under-bed gravel, located in a tropical climate, with flat 90 kilometers long roads, an initial thickness of 175 mm of gravel surface, high traffic volume, and subjected to high-level maintenance at 30-day intervals. When considering the replacement, the ideal scenario was that with under-bed gravel, situated in a temperate climate, with wavy 30 kilometers long roads, an initial thickness of 175 mm of gravel, high traffic intensity, and also submitted to high-level maintenance every 30 days. High-level maintenance was the best option for maximizing the quality of the roads and providing the best total net benefit, lowest gas emission rates, least fuel and tire consumption, and an adequate pavement condition by the end of the project. The maintenance level adopted on the roads (with and without gravel replacement) directly impacted the required transportation fleet, with

the roads that underwent less intervention necessitating more vehicles to supply the demand. Both time and movement simulations proved to be satisfactory for the scenario of interest, making it possible to define daily working routines and shift schedules and fulfill the required workload, in accordance with the proposed standards. The combination of the software HDM-4 (as a Pavement Management System) and Simio (as a *Digital Twin* simulation tool) can be used for decision-making on roads, remarkably the unpaved ones. Studies like the present one is crucial to define the effects of maintenance practices on the quality of roads and overall forest transportation management.

Keywords: *Digital Twin*. Unpaved road. HDM-4.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pavimento rígido em corte longitudinal.	18
Figura 2 - Característica dos materiais de revestimento primário.	19
Figura 3 - Distribuição dos modais de transporte de cargas no Brasil.	21
Figura 4 - Sistema de Gerência de Pavimentos.	28
Figura 5 - Alternativas das estratégias de intervenção de um SGP.	29
Figura 6 - Arquitetura do sistema HDM-4.	32
Figura 7 - Pilares da Indústria 4.0.	34
Figura 8 - Esquema de condução de projetos para simulação SED.	41
Figura 9 - Gerenciamento de dados de entrada em projetos SED.	42
Figura 10 - Modelo Simio com animação 3D.	44
Figura 11 - Classificação TRB (<i>Transportation Research Board</i>).	48
Figura 12 - Modelo de classificação de climas adotado pelo sistema HDM-4.	50
Figura 13 - Classes de geometria inerentes ao sistema HDM-4.	51
Figura 14 - Representação do tritrem e suas composições.	53
Figura 15 - Veículo tritrem para carregamento de madeira.	53
Figura 16 - Calibração de dados veiculares do modal tritrem no software HDM-4.	55
Figura 17 - Variação das condições do pavimento mediante intervenções.	58
Figura 18 - Relação entre espessura do pavimento e CBR do subleito.	59
Figura 19 - Configuração de dados referentes aos tipos de manutenção.	62
Figura 20 - Definição de diferentes panoramas gerados pelo sistema HDM-4.	64
Figura 21 - Custos totais do setor rodoviário considerados pelo HDM-4.	66
Figura 22 - Definição das estruturas básicas de modelagem.	73
Figura 23 - Simulação de tempo e movimento via Simio 3D.	89
Figura 24 - Simulação de tempo e movimento em 3D com imageamento satélite.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peso máximo por eixo do veículo.....	24
Tabela 2 - Cargas máximas para determinados países da Europa.....	26
Tabela 3 - Designações dos grupos de solos adotados.....	46
Tabela 4 - Valores prováveis de CBR para a classificação TRB.....	49
Tabela 5 - Classificação dos veículos de carga.	52
Tabela 6 - Simulação de dados segundo equações de dimensionamento.....	58
Tabela 7 - Cenário mais favorável associado à manutenção de vias sem reposição de cascalho.	76
Tabela 8 - Cenário mais favorável associado à manutenção de vias com reposição de cascalho.	81
Tabela 9 - Estimativa de frota relativa ao cenário sem reposição de cascalho.	85
Tabela 10 - Estimativa de frota relativa ao cenário com reposição de cascalho.	86
Tabela 11 - Dados relativos à simulação do cenário de interesse.	88
Tabela 12 - Resultado da configuração da escala de trabalho referente à frota.	89

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Problema e Justificativa	15
1.3 Objetivo.....	15
1.3.1 Objetivo específico	16
1.4 Hipótese.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Estradas não pavimentadas.....	17
2.2 Transporte Florestal	20
2.2.1 Normas regulamentadoras do transporte florestal.....	22
2.3 Sistema de Gerência de Pavimentos	27
2.3.1 Sistema HDM- 4 (<i>Highway Development and Management</i>).....	30
2.3.1.1 História.....	30
2.3.1.2 Caracterização.....	31
2.4 Indústria 4.0	34
2.4.1 Logística Florestal na Indústria 4.0	35
2.4.2 <i>Digital Twin</i> (Gêmeo Digital)	36
2.5 Simulação	37
2.5.1 Conceito e aplicações.....	37
2.5.2 Softwares modelos de simulação	43
2.5.2.2 Simio.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 Parte I - HDM- 4 (<i>Highway Development and Management</i>).....	46
3.1.1 Calibração do sistema	46
3.1.1.1 Tipo de solo	46
3.1.1.2 Clima.....	49
3.1.1.3 Geometria	50
3.1.1.4 Frota e distância	51
3.1.1.5 Reposição de cascalho.....	55
3.1.1.6 Tipo de manutenção	60
3.1.1.7 Periodicidade	62
3.1.1.8 Intensidade de tráfego	63

3.1.2 Compilação dos dados	64
3.1.2.1 Aspecto Técnico	65
3.1.2.2 Aspecto Econômico	65
3.1.2.3 Aspecto Socioambiental	70
3.2 Parte II – <i>Digital Twin</i> (Software Simio).....	71
3.2.1 Calibração do Sistema.....	72
3.2.1.1 Estruturas do modelo.....	72
3.2.1.2 Caracterização das estruturas	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1 Sem reposição de cascalho	75
4.2 Com reposição de cascalho	80
4.3 Frota.....	84
4.4 Simulação	88
5. CONCLUSÕES	92
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS	95
ANEXOS	105

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Devido à indiscutível importância estratégica da infraestrutura rodoviária, a qualidade das estradas torna-se atualmente um objetivo urgente no desenvolvimento de um país. O transporte rodoviário apresenta-se como uma atividade essencial na cadeia produtiva de qualquer setor, pois permite o fluxo de matéria prima, mão de obra, produtos e serviços, favorecendo todas as etapas produtivas ligadas à logística viária.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019), o Brasil possui 1.720.700 km de rodovias, porém com apenas 213.453 km pavimentados, o que corresponde a 12,4% da malha rodoviária nacional.

Ainda, de acordo com um levantamento realizado pela CNT (2019) a fim de classificar o estado geral das rodovias federais (pavimento, sinalização e geometria), dos 108.863 km de vias avaliadas, apenas 41% encontraram-se em ótimo ou bom estado.

Quanto às vias não pavimentadas, essas correspondem a 78,5% do total de rodovias no país, categorizando portanto a grande maioria. Nessa esfera encontra-se a malha rodoviária florestal, a qual, segundo Machado (2002), estima-se que já ultrapasse a ordem de 700 mil quilômetros de extensão, tendo em vista o número crescente de projetos ligados à expansão de empresas florestais.

Nesse sentido, Machado (2013) define estradas florestais como o conjunto de vias que ligam as áreas rurais às urbanas, sendo comumente denominadas estradas de terra ou de chão. Assim, os cuidados para mantê-las em condições adequadas requerem um maior empenho, visto que são as mais sujeitas aos efeitos de degradação e por se apresentarem como maioria em nosso país.

Como a maior parte do transporte de cargas no Brasil é feita pelo meio rodoviário, este tipo de malha, ao apresentar-se desgastada, ocasiona um aumento significativo no custo de transporte e no número de acidentes. Empresas florestais estimam que o tráfego por estradas de terra e rodovias mal conservadas gera um custo extra de transporte de 25%, dada a maior necessidade de manutenção de caminhões (BRASIL, 2018).

As estradas florestais possuem características que as enquadram em uma

classificação diferenciada das demais, uma vez que apresentam baixo volume de tráfego (geralmente em um único sentido) e são transitadas por veículos pesados e extrapesados, com capacidade de carga de 30 a 40 toneladas e acima de 40 toneladas, respectivamente (LOPES, 2002).

Dessa forma, o pavimento de uma estrada destinada ao transporte florestal difere significativamente do pavimento de uma autoestrada, uma vez que, por não ser rentável, não se têm os mesmos requisitos técnicos de uma estrada com alto volume de tráfego (SANT'ANNA, 2006).

Devido a esse conjunto de características e atrelado ao fato de não possuírem uma camada selante, as estradas florestais requerem atenção em sua construção, além de uma manutenção eficaz, voltada à garantia de sua trafegabilidade frente às grandes distâncias e ao tráfego pesado existente. A deficiência no gerenciamento dessas vias pode ocasionar prejuízos não somente à empresa e ao empreendimento, mas também ao estado e à própria nação (PINTO, 2009).

Nesse sentido, um Sistema de Gerência de Pavimentos que apóie decisões relacionadas principalmente à conservação e reabilitação de redes viárias torna-se viável e essencial. Dentre os existentes no mercado, diferenciam-se os sistemas feitos “sob medida”, denominados “proprietary system”, que são desenvolvidos pelo próprio órgão e adequados especificamente às condições locais e necessidades de cada cliente, e os sistemas conhecidos como “*Comercial Off-the-Shelf*” (COTS), cujo exemplo mais conhecido é o HDM-4 (MARTINS 2015).

Dessa maneira, o HDM-4 (*Highway Development & Management*) apresenta-se como um software modelo de desenvolvimento e gestão de estradas, sendo uma ferramenta desenhada com aplicações voltadas ao planejamento estratégico e avaliação econômica (DNIT, 2017).

Já o *Digital Twin* (Gêmeo Digital) é um modelo digital capaz de fornecer todas as perspectivas e cenários sobre determinado produto, sendo definido como o acoplamento de um sistema de produção com seu equivalente digital (UHLEMANN, LEHMANN e STEINHILPER, 2017). Em resumo, um *Digital Twin* nada mais é que uma réplica virtual de um produto ou serviço físico real. Nesse modelo os softwares são praticamente ferramentas exclusivas, trabalhando com diferentes tecnologias envolvidas tais como a Inteligência Artificial, buscando sempre a tomada das melhores decisões e do ponto ótimo nas operações.

Como as técnicas de otimização são cada vez mais empregadas na solução

de problemas rodoviários, a união de diferentes sistemas de simulação, como os anteriormente citados, podem gerar, em conjunto, soluções ótimas desejadas.

Portanto, trabalhos como este são de grande importância para se definir os efeitos da manutenção de estradas não pavimentadas no processo de transporte florestal como um todo. Viabiliza-se, assim, informações que podem garantir ganhos na qualidade, no desempenho e no custo das operações, fomentando a escolha das decisões mais viáveis do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

1.2 Problema e Justificativa

As rodovias, consideradas patrimônios essenciais à sociedade, ao carecerem de atenção constante e preservação, necessitam de um gerenciamento de manutenção que seja conduzido de forma sistêmica. No caso da presente pesquisa, as ditas rodovias são estradas não pavimentadas localizadas em empreendimentos de base florestal, as quais, quase que em sua totalidade, não possuem camada selante de revestimento, que geralmente é constituída de asfalto ou concreto. Assim sendo, tais vias padecem de sérios riscos de desgaste, entaves e até mesmo inviabilização do tráfego.

Ainda, há no Brasil uma carência de sistemas de gerenciamento e manutenção de estradas não pavimentadas, principalmente relacionada àquelas de cunho florestal. A grande extensão que essa malha representa, atrelada ao baixo volume de tráfego que possuem, fazem com que os investimentos nessas vias sejam baixos ou muitas vezes ausentes, o que gera uma necessidade cada vez maior de soluções que garantam o fluxo contínuo de qualidade.

Dessa forma, estudos voltados a sistemas computacionais dimensionados em função da manutenção dessas vias tornam-se justificáveis, apresentando-se como potentes métodos de avaliação, acompanhamento e tomada de decisão no que tange à malha viária com fins florestais.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho das práticas de manutenção de estradas não pavimentadas no âmbito técnico, econômico e socioambiental, evidenciando as melhores propostas a nível de projeto.

1.3.1 Objetivo específico

Como objetivo específico, espera-se discutir a aplicação do modelo *Highway Development & Management* (HDM-4) em associação com o conceito de *Digital Twin* no gerenciamento de redes não pavimentadas em empreendimentos florestais.

1.4 Hipótese

Sistemas de Gerência de Pavimentos acoplados a softwares de simulação de Gêmeos Digitais tornam-se uma alternativa válida na problemática relacionada à manutenção de vias não pavimentadas, uma vez que favorecem a seleção das intervenções e cenários mais viáveis de acordo com o projeto proposto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estradas não pavimentadas

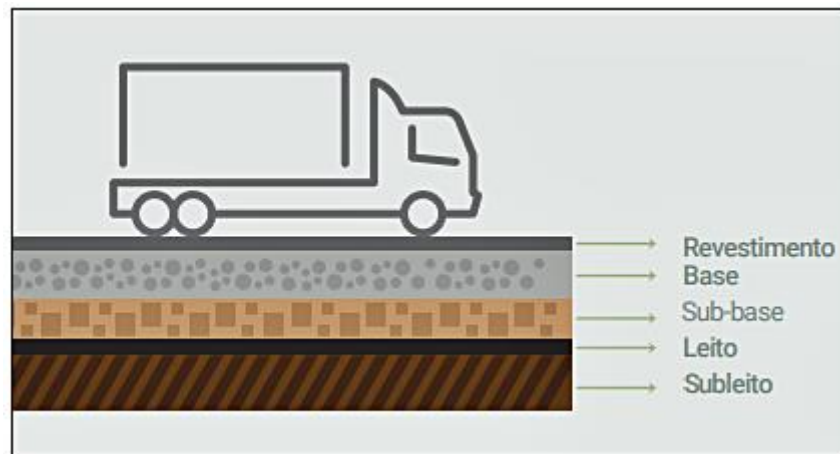
Atualmente no território brasileiro, quase 80% da malha rodoviária é composta de estradas não pavimentadas, sendo uma minoria aquelas com planejamento e pavimentação efetiva. Dentre as estradas pavimentadas, a maioria está sob a jurisdição de governos estaduais, enquanto as estradas não pavimentadas estão sob a jurisdição de governos municipais (CNT, 2019).

Nesse universo, segundo Lopes (2002), esses tipos de superfície são classificados da seguinte forma:

- Estrada pavimentada: é aquela revestida com concreto betuminoso ou concreto, permitindo o tráfego de veículos durante o ano todo;
- Estrada com revestimento primário: é aquela revestida com material granular (saibros, cascalhos, entre outros), o que permite o tráfego de veículos durante o ano todo e;
- Estrada sem revestimento: é aquela que não apresenta qualquer tipo de revestimento, e, portanto, o tráfego de veículos durante a época chuvosa geralmente é dificultado ou pode não ocorrer.

As estradas pavimentadas são constituídas de um pavimento de múltiplas camadas (Figura 1), projetados para minimizar os esforços verticais produzidos pela ação do tráfego e, conseqüentemente, oferecer proteção ao subleito. Dessa maneira, devem distribuir as solicitações de carga e limitar as tensões e deformações garantindo um desempenho adequado da via por um longo período de tempo, garantindo também conforto, economia e segurança ao usuário (CNT, 2019).

Figura 1 - Pavimento rígido em corte longitudinal.



Fonte: Adaptado de CNT (2019).

De modo geral, as estradas não pavimentadas (ou estradas de terra) não apresentam a camada asfáltica que sela a estrutura, sendo normalmente construídas usando-se o solo natural local na camada final (de rolamento).

Nessa categoria distinguem-se as estradas com revestimento primário, que são rodovias revestidas com uma camada de material que tenha uma capacidade de suporte maior do que o solo local natural, capaz de oferecer uma superfície de rolamento trafegável em qualquer época do ano (OLIVEIRA, 2005).

Em tais vias a sub-base destina-se a resistir diretamente aos esforços oriundos do tráfego, o que atrelado ao fato de não serem impermeabilizadas com a capa asfáltica, as coloca como susceptíveis à erosão, um dos principais problemas ligados à trafegabilidade. Por tais motivos é que a compactação das camadas de revestimento primário e subleito são de fundamental importância (BITTENCOURT, 2011).

O revestimento primário é composto por agregados naturais e/ou artificiais, aplicados diretamente sobre o subleito compactado e regularizado em rodovias não pavimentadas (DNIT, 2005). Ainda, o material deve possuir algumas características mínimas, as quais estão dispostas na Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Características dos materiais de revestimento primário.

Descrição	Classificação AASHTO	D máx mm	% Passando			IP	Comportamento como revestimento primário
			n. 10	n. 40	n. 200		
			2,0 mm	0,425 mm	0,075 mm		
Cascalho de origem vulcânica	A-2-6	25	49	38	24	17	Bom
Cascalho quartzoso	A-2-4	24	58	45	24	9	Bom
Cascalho laterítico	A-2-4	22	51	42	26	10	Bom

Fonte: DNIT (2005).

A deterioração de estradas não seladas é governada pelo comportamento do material de revestimento e do subleito da estrada sob as ações combinadas de tráfego, temperatura e pluviosidade (MOROSIUK, 2004). Existem três mecanismos fundamentais de deterioração:

- Desgaste e abrasão do material da superfície sob tráfego;
- Deformação do material da superfície e do subleito sob as tensões induzidas pela carga de tráfego e condição de umidade;
- Erosão da superfície pelo tráfego, água e vento.

Onde o solo do subleito é fraco, Pinto (2009) afirma que a inserção do pavimento é feita a fim de protegê-lo, além de limitar a deformação que se desenvolve sob o tráfego. Morosiuk (2004) reforça a ideia, afirmando que quando os padrões de projeto são inadequados e o subleito ou leito da estrada está sob tensão, a deterioração ocorre predominantemente em áreas de solos fracos.

A espessura e rigidez das camadas dos pavimentos (apenas uma camada necessária para estradas não seladas) precisam ser suficientes para distribuir as cargas aplicadas, de modo que as tensões induzidas no leito da estrada sejam reduzidas a níveis nos quais a deformação permanente do material da estrada seja aceitável (PINTO, 2009). Esses níveis de estresse dependem em grande parte do volume e carga do tráfego, e a resistência ao cisalhamento do material da estrada in situ depende da densidade compactada e do teor de umidade associado às condições climáticas e de drenagem.

Quanto à perda de material granular, a reposição do mesmo é uma operação de manutenção essencial em estradas não pavimentadas, de modo que a frequência necessária, segundo Pinto (2009), é uma importante decisão de planejamento. Nesse sentido, a perda de cascalho é definida como a mudança na espessura do cascalho ao longo de um período de tempo e é usada para estimar quando a espessura do curso de desgaste de cascalho diminuiu para um nível em que a reposição granular torna-se necessária.

Paterson (1987) identificou três fatores principais que afetam a perda de cascalho: intemperismo, tráfego e a influência do nivelamento. As propriedades dos materiais, o alinhamento da estrada e a largura da estrada influenciam os cascalhos gerados por cada um desses fatores.

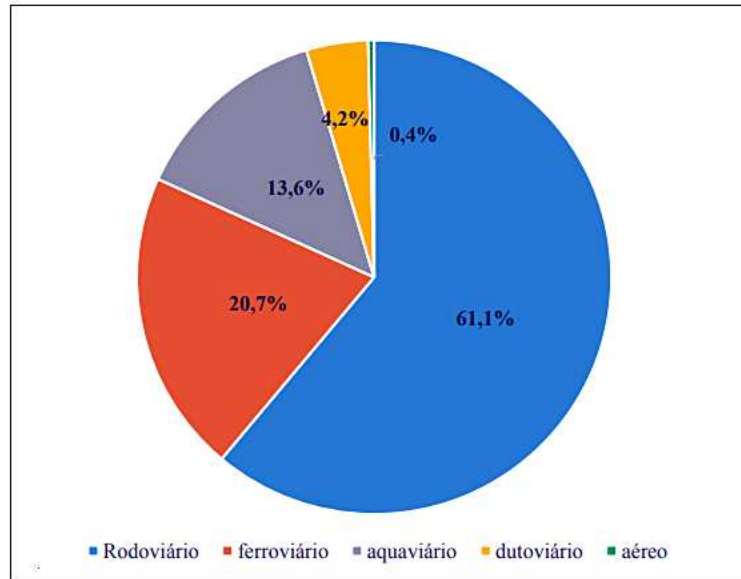
Nesse tocante, a manutenção e o gerenciamento de vias não pavimentadas, como as estradas rurais e florestais, se fazem nitidamente necessários, porém pouca atenção é dada nesse sentido. A fragilidade desse tipo de via associada à má gestão das mesmas pode acarretar problemas econômicos, ambientais e sociais frequentes, prejudicando todo o sistema dependente de tal rede viária.

2.2 Transporte Florestal

Segundo a Confederação Nacional do Transporte, CNT (2019), o desenvolvimento pleno e sustentável de um país está diretamente ligado à sua infraestrutura de transporte, que tem a capacidade de mover uma nação, conectar pessoas e lugares e impulsionar a economia.

Segundo dita Confederação, os modais de transporte de cargas no Brasil apresentam-se divididos da seguinte maneira: rodoviário (61,1%), ferroviário (20,7%), aquaviário (13,6%), dutoviário (4,2%) e aéreo (0,4%), sendo tal divisão ilustrada pela Figura 3 a seguir.

Figura 3 - Distribuição dos modais de transporte de cargas no Brasil.



Fonte: CNT (2019).

Devido à presença das rodovias, o acesso a quase qualquer lugar do país torna-se possível e, por esse motivo, o transporte rodoviário é o preferido na movimentação interna de cargas no Brasil (SILVA, MOREIRA e PANTOJO, 2018).

Ainda, segundo Chesneau, Net e Berg (2012), o transporte rodoviário apresenta-se como a opção mais barata para curtas distâncias, seguido pelo modal hidroviário e ferroviário, o que coloca, portanto, a categoria rodoviária em preferência.

A forte presença de dito modal também se expressa na esfera voltada às florestas. Segundo Machado (2002), estima-se que a extensão da malha rodoviária florestal no Brasil já ultrapasse a ordem de 700 mil quilômetros, tendo em vista o número crescente de projetos ligados à expansão de empresas do ramo.

Sendo assim, a rede rodoviária passa então a exercer o suporte necessário à cadeia produtiva florestal, permitindo a continuidade e o fluxo de atividades como a colheita e o transporte de madeira. Nesse setor, essas duas etapas são as mais importantes economicamente, uma vez que são responsáveis por mais da metade do custo final da madeira colocada no centro consumidor, além dos riscos de perdas envolvidos nessas atividades (MACHADO e LOPES, 2000).

A colheita florestal pode ser definida como um conjunto de operações efetuadas no maciço florestal visando preparar e levar a madeira até o local de transporte, fazendo-se o uso de técnicas e padrões estabelecidos com a finalidade de transformá-la em produto final (MACHADO, 2014).

Já o transporte florestal, de acordo com Oliveira et al. (2013), refere-se à toda movimentação de madeira dos talhões das florestas ou das margens das estradas até o pátio das empresas, sendo que no Brasil esse tipo de movimentação representa 85% de toda madeira transportada.

Dentre os fatores que influenciam diretamente no desempenho e nos custos do transporte florestal, Machado et al. (2009) destacam como principais a distância de transporte e o padrão da rede rodoviária florestal. Segundo os autores, a localização das áreas de produção e dos centros consumidores, bem como a qualidade da superfície da pista de rolamento, são questões que carecem de atenção em todo empreendimento dessa natureza.

No que tange à qualidade das vias, no Brasil não há uma classificação nacional de estradas florestais, além de que nem todas as empresas adotam um sistema de padrões próprios para esse fim. Dessa maneira, a qualidade dessa malha é, ainda, uma questão de bastante inconsistência (LOPES, 2002).

De todas as formas, a má conservação das vias é uma das principais dificuldades estruturais no sistema rodoviário e conseqüentemente refletida nos custos de transporte florestal. Empresas florestais estimam que o tráfego por estradas de terra e rodovias mal conservadas gera um custo extra de transporte de 25%, dada a maior necessidade de manutenção de caminhões (BRASIL, 2018).

Segundo a fonte supracitada, ao se levar em consideração que o transporte no setor florestal é estritamente dependente de uma rede de estradas eficiente, torna-se fundamental aprimorar a infraestrutura e demonstrar como tal ação pode ser vantajosa para o crescimento do negócio florestal e do país.

2.2.1 Normas regulamentadoras do transporte florestal

Uma vez que a predominância do modal rodoviário é uma característica de todo o setor de transportes brasileiro, Silva, Moreira e Pantojo (2018) afirmam ser de grande importância alavancar a discussão acerca da movimentação rodoviária de cargas no país, ajudando a entender a real situação do transporte nacional nos dias atuais.

Tendo como uma de suas principais funções fiscalizar o transporte rodoviário de cargas e passageiros, além do transporte ferroviário no Brasil, a Agência Nacional

de Transportes Terrestres (ANTT) foi criada em 2001 pela Lei nº 10.233. Porém, segundo os autores supracitados, a discussão sobre o transporte de carregamentos no Brasil só foi devidamente embasada através da regulação do mercado de Transporte Rodoviário de Cargas (TRC), que se deu através da Lei nº 11.442/08 e da Resolução ANTT nº 3056/09.

Já o Código Nacional de Trânsito foi instituído pela Lei nº 9.503/1997, no qual configuram as normas de trânsito brasileiras e sob as quais o transporte de cargas se fundamenta, obedecendo a uma série de critérios (BRASIL, 2016).

Um dos principais pontos normativos do código diz respeito às velocidades toleradas. Para tanto, no que tange ao transporte florestal, a normativa distingue vias rurais em rodovias e estradas, sendo as rodovias referentes às vias rurais pavimentadas e as estradas referentes às vias rurais sem pavimentação, isto é, sem asfalto.

Dessa forma, em rodovias rurais, se não houver sinalização regulamentadora, a velocidade máxima permitida para tráfego de veículos é de 90 km h^{-1} e, quando se tratar de estradas rurais, de 60 km h^{-1} . A velocidade mínima, entretanto, não deve ser inferior à metade da velocidade máxima determinada (BRASIL, 2016).

Segundo Machado et al. (2009), no transporte rodoviário os veículos também precisam obter autorizações e seguir determinadas limitações, sejam elas quanto a dimensões, pesos ou tipo de carga dos veículos, uma vez que no processo se utilizam caminhões pesados e extrapesados sobre as vias.

Nesse sentido, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), órgão máximo normativo e consultivo da política nacional de trânsito, ao publicar as Resoluções nº 210/06 e nº 211/06, estabeleceu diretrizes para a circulação de veículos no país. Dentre essas, instituiu limites de pesos e dimensões para a frota de carga, requisitos para a circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVC) e orientações para Autorização Especial de Trânsito (AET), sendo esta última necessária dependendo do volume de carga a ser transportado (MORAIS, 2012).

A Resolução nº 210/06 volta-se à definição dos limites de Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Total Combinado (PBTC) (CONTRAN, 2006). Peso Bruto Total é a combinação do peso do veículo com o peso da carroceria e o peso da carga, consolidando assim o peso máximo que um caminhão pode ter ao trafegar em uma via. Já Peso Bruto Total Combinado é o PBT quando se combinam os eixos mecânicos ao reboque, isto é, a soma do caminhão trator com a de seu reboque com

a carga, formando o peso máximo que o veículo pode transmitir para as pistas de rodagem.

As cargas máximas permitidas por eixo, segundo a Resolução nº 210/06, são apresentadas na Tabela 1. Dita resolução entende por eixo em tandem dois ou mais eixos que formem um conjunto integral de suspensão.

Tabela 1 - Peso máximo por eixo do veículo.

Tipo de eixo	Número de pneus	Peso tolerado (t)
Eixo isolado	2	6,0
Eixo isolado	4	10,0
Conjunto de 2 eixos direcionais	2	12,0
Conjunto de 2 eixos direcionais em tandem	4	17,0
Conjunto de 2 eixos direcionais não em tandem	4	15,0
Conjunto de 3 eixos direcionais em tandem	4	25,5

Fonte: Adaptado de Guimarães et al. (2016).

As resoluções do CONTRAN estabelecem ainda uma porcentagem de tolerância de peso sobre as cargas transportadas. Inicialmente vigorava a tolerância máxima de 7,5% sobre os limites de PBT e PBTC, porém, por meio da Lei nº 13.103/15, ficou estabelecido que essa tolerância passaria a ser de 5% e a tolerância dos limites de carga por eixo seria de 10%, independentemente de o PBT ou PBTC excederem os limites estabelecidos ou não (BOSSO, 2018).

Nos últimos anos, os percentuais de carga tolerados têm sido constantemente alterados, sendo objeto de inúmeras regulamentações pelo Conselho Nacional de Trânsito. Essas tolerâncias influenciam no comportamento dos pavimentos à medida em que representam, assim como o excesso de carga ilegal, um acréscimo de carga que transita sobre a rodovia (FERREIRA JR., 2016).

Quanto à Resolução nº 211/06, esta estabelece os requisitos necessários à circulação de CVC, especificando seus limites de dimensões e peso (CONTRAN, 2006b). Atualmente, a circulação de Combinações de Veículos de Carga com PBTC entre 45 e 57 toneladas são dispensadas da Autorização Especial de Trânsito (AET), salvo requisitos específicos (BOSSO, 2018).

Porém, a resolução institui que combinações veiculares de carga com mais de

duas unidades, incluída a unidade tratora, com peso bruto total acima de 57 toneladas ou com comprimento total acima de 19,80 metros, só poderão circular portando dita AET. Esta autorização pode ser concedida mediante os seguintes requisitos (CONTRAN, 2006b):

- Peso Bruto Total Combinado – PBTC igual ou inferior a 74 toneladas;
- Comprimento superior a 19,80 metros e máximo de 30 metros, quando o PBTC for inferior ou igual a 57 toneladas;
- Comprimento mínimo de 25 metros e máximo de 30 metros, quando o PBTC for superior a 57 toneladas.

Com a AET, veículos podem trafegar em território brasileiro portando um limite máximo de PBTC. Inicialmente, cargas de 57 até 74 toneladas poderiam transitar com AET, porém esse limite superior foi recentemente alterado, passando de 74 para 91 toneladas permitidas (GASPARETO, 2017). Ainda, a Autorização Especial de Trânsito tem validade máxima de 1 ano para os percursos e horários previamente aprovados, e somente é fornecida após vistoria técnica da CVC, efetuada pelos órgãos competentes.

Internacionalmente, regulamentos referentes a limites de peso em veículos de carga também se fazem vigorar. Segundo Prozzi e Kenney (2016), nos Estados Unidos o tamanho e o peso máximo de caminhões são determinados pelo governo federal no intuito de se evitar danos à infraestrutura rodoviária. Os estados podem estabelecer seus próprios limites legais de carga, mas apenas para as rodovias estaduais.

Assim, de acordo os autores supracitados, embora a indústria se beneficie em produtividade com o trânsito de veículos mais pesados, esses benefícios precisam equilibrar os custos de reabilitação e manutenção das rodovias. Nesse sentido, os regulamentos federais limitam os caminhões a um peso bruto máximo de 80.000 libras (aproximadamente 36,2 toneladas), além de não se permitir que a madeira exceda os limites legais de tamanho quando transportada por caminhões.

Já no Canadá, os valores admissíveis de PBT são fundamentados na categoria do veículo e na quantidade de eixos, onde Bosso (2018) afirma que a maior carga admissível é a de 62,5 toneladas, designada para veículos que podem apresentar comprimentos de até 27,5 m.

Na Tabela 2 abaixo apresentam-se as cargas máximas legais em alguns países europeus.

Tabela 2 - Cargas máximas para determinados países da Europa.

Países	Carga Máxima		Carga Máxima PBT/PBTC				
			Caminhão		Rodotrem		Articulado
	Por eixo truck	Por eixo com tração	2 eixos	3 eixos	4 eixos	5 eixos ou mais	5 eixos ou mais
Alemanha	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	40,0	40,0
Bélgica	10,0	12,0	19,0	26,0	39,0	44,0	44,0
Espanha	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	40,0	44,0
França	13,0	13,0	19,0	26,0	38,0	44,0	44,0
Holanda	10,0	11,5	21,5	30,5	40,0	50,0	50,0
Irlanda	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	46,0	46,0
Itália	12,0	12,0	18,0	26,0	40,0	44,0	44,0
Portugal	12,0	12,0	19,0	26,0	37,0	60,0	44,0

Fonte: Adaptado de Bosso (2018).

Voltando-se ao Brasil, quanto à segurança para o transporte de toras, a Resolução nº 246/07 formula uma série de requisitos a serem seguidos. Para toras dispostas verticalmente, por exemplo, as mesmas devem estar obrigatoriamente contidas por (CONTRAN, 2007):

- I. painéis dianteiro e traseiro da carroceria do veículo, exceto para os veículos extensíveis, com toras acima de oito metros de comprimento, para os quais não serão necessários painéis traseiros;
- II. escoras laterais metálicas, perpendiculares ao plano do assoalho da carroceria do veículo (fueiros), sendo necessárias 2 escoras de cada lado, no mínimo, para cada tora ou pacote de toras;
- III. cabos de aço ou cintas de poliéster, com capacidade mínima de ruptura à tração de 3.000 kgf tensionadas por sistema pneumático auto ajustável ou catracas fixadas na carroceria.

Finalmente, em se tratando de segurança rodoviária, segundo a Lei nº 12.619/12 é proibida a remuneração do motorista em função da distância percorrida, do tempo de viagem e/ou da natureza e quantidade de produtos transportados, se essa remuneração comprometer a segurança das vias, da coletividade ou ensejar violação da legislação vigente (BRASIL, 2012).

2.3 Sistema de Gerência de Pavimentos

Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), em seu sentido mais amplo, é um termo utilizado para se referir a todas as atividades envolvidas no planejamento, no projeto, na construção, na manutenção (conservação, restauração, reabilitação) e na avaliação dos pavimentos que fazem parte de uma infraestrutura viária, seja ela rodoviária, aeroportuária ou urbana (ANAC, 2017).

Desse modo, um SGP busca a melhoria contínua dos serviços e da infraestrutura a partir da tomada de decisões, da otimização e de um gerenciamento eficaz, objetivando a melhor aplicação dos recursos públicos e a oferta de um transporte rodoviário seguro, compatível e econômico (DNIT, 2011).

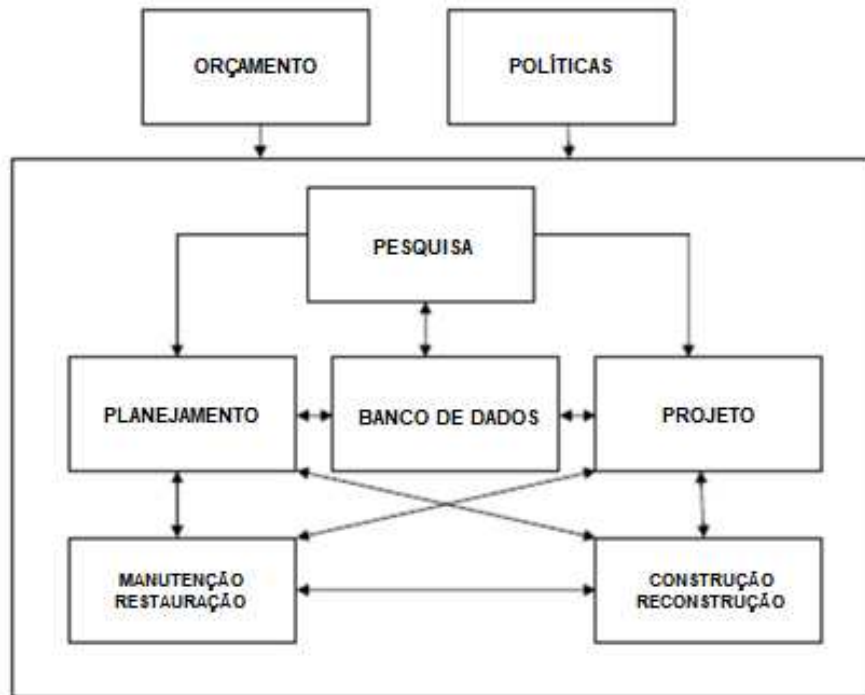
É importante ressaltar que a eficácia de um SGP não tem relação direta com a complexidade ou sofisticação do método de avaliação dos pavimentos. Métodos simples mas metodologicamente bem elaborados e coerentes são preferíveis a sistemas de gerência complexos, pois assim evita-se gastos desnecessários (PÁEZ, 2015).

Para tanto, um Sistema de Gerência de Pavimentos deve apresentar constituintes que interajam mutuamente, podendo ser representados pelos seguintes componentes (AASHTO 2012):

- Banco de dados
- Sistema de pesquisa
- Sistema de planejamento
- Projeto
- Construção e manutenção
- Avaliação e monitoramento.

Como principais fatores externos, dita fonte ainda cita os recursos orçamentários, os dados necessários ao sistema e as diretrizes políticas e administrativas, que em conjunto com os demais complementam o sistema como um todo, evidenciado na Figura 4.

Figura 4 - Sistema de Gerência de Pavimentos.



Fonte: DNIT (2011).

Segundo Alves e Santarem (2015), o desempenho de uma estrada está relacionado com o decréscimo de sua condição ou de sua serventia, uma vez que o pavimento inicia a sua vida em uma condição perfeita até alcançar uma condição ruim. Qualquer redução na intensidade dos serviços de manutenção de vias implica em aumento nos custos de operação dos veículos e na necessidade de investimentos de recuperação cada vez maiores.

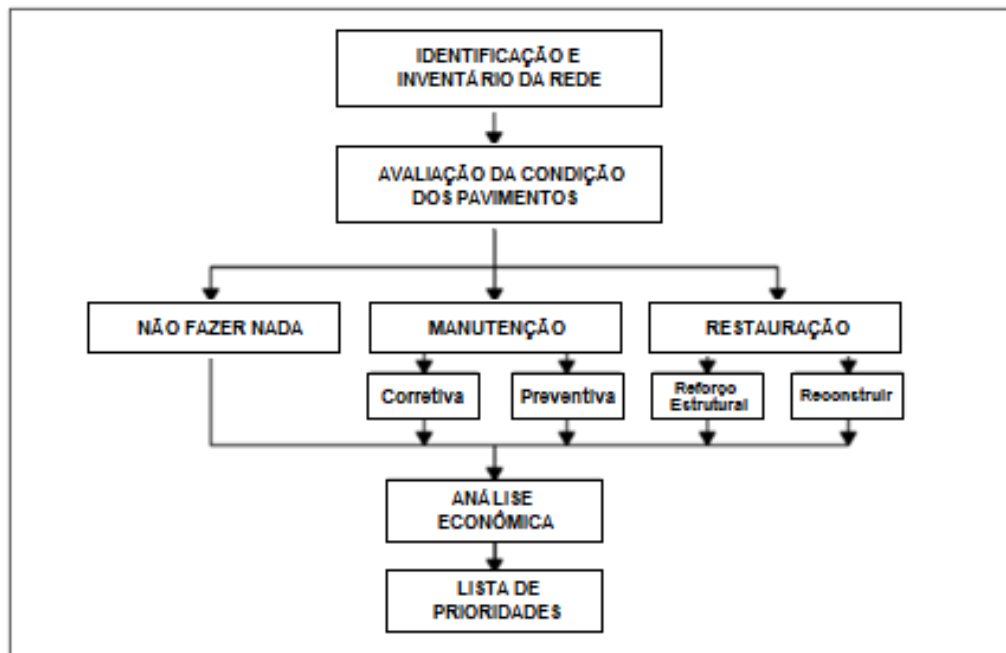
Nesse sentido, a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), ao desenvolver estudos sobre a serventia-desempenho das vias, contribuiu significativamente para a base tecnológica da gerência de pavimentos. Assim, na busca pelo equilíbrio entre custos e benefícios bem como pelo maior desempenho de uma via, os Sistemas de Gerência de Pavimentos atualmente se apresentam como uma das formas mais utilizadas nos países desenvolvidos para

planejar e priorizar as intervenções de manutenção e reabilitação dos pavimentos (ALVES e SANTAREM, 2015).

A tomada de decisões, por sua vez, torna-se efetivamente auxiliada por esses sistemas de gestão, uma vez que eles respondem as principais questões administrativas de uma rede rodoviária: qual tipo de intervenção adotar, em que locais do pavimento é necessário intervir e quando é o melhor momento de realizar a intervenção (AASHTO, 2012).

O fluxograma da Figura 5 exemplifica as diferentes possibilidades de decisão a serem tomadas.

Figura 5 - Alternativas das estratégias de intervenção de um SGP.



Fonte: DNIT (2011).

Atualmente têm-se empregado diversos mecanismos de suporte à tomada de decisão na solução de problemas de engenharia de pavimentos, visto que, de acordo com Martins (2015), os Sistemas de Gerência de Pavimentos são programas computacionais organizados em módulos com possibilidade de integração entre si.

A exemplo, de acordo com Salini (2010), ferramentas como as redes neurais artificiais (*Artificial Neural Network*, ANN) possuem grande potencial para a predição de deterioração em pavimentos; um problema tradicionalmente complexo a se enfrentar mas que pode ter sua solução facilitada por meio da utilização das mesmas.

Por outro lado, segundo Baria (2015), tecnologias de informação espacial tais

como os SIG's são particularmente apropriadas para integrar dados do pavimento, permitindo a apresentação de dados de operação e manutenção usando relacionamento espacial. Esta característica mostra que os SIG's aparecem como uma alternativa válida, podendo auxiliar e melhorar a análise de situações e eventos no processo decisório (IBRAHEEM, 2012).

Porém, segundo Mizusawa (2009), dentre os SGP existentes no mercado, os mais conhecidos são denominados sistemas "*Commercial Off-the-Shelf*", cujo principal exemplo é o HDM-4 (*Highway Development and Management*). Desenvolvido pelo Banco Mundial (BIRD) em parcerias e aceito por diversas entidades internacionais, o autor destaca esse software como possivelmente a ferramenta de gerência de pavimentos mais utilizada internacionalmente, tendo suas diversas versões sido implementadas em mais de cem países do mundo.

Assim, as diferentes faces apresentadas pelos Sistemas de Gerência de Pavimentos, segundo Rocha e Nunes (2019), reúnem informações com o objetivo de desenvolver um processo contínuo e integrado de ações, que obtenham o melhor resultado frente à tomada de decisão na administração de recursos destinados ao setor rodoviário.

2.3.1 Sistema HDM- 4 (*Highway Development and Management*)

2.3.1.1 História

No intuito de dar vida a um modelo que avaliasse projetos rodoviários, em 1969 deu-se início à projeção dos primeiros arranjos do sistema HDM, tendo como idealizadores o Banco Mundial em parceria com o Laboratório de Pesquisa em Transportes e Estradas (TRRL), o Laboratório Central de Pontes e Calçadas (LCPC) Francês e o Instituto Tecnológico do Massachusetts (MIT) (KERALI, 2000).

Embora o modelo tivesse um conceito consistente, havia necessidade de pesquisas adicionais, particularmente para países em desenvolvimento. Para suprir tal carência, o Banco Mundial realizou estudos no Quênia, de 1971 a 1975, voltando-se para os custos de operação de veículos e deterioração de estradas (NUNES, 2012).

Consequente a isso, ainda segundo o autor supracitado e de acordo com Costa (2014), diversos países em desenvolvimento receberam estudos da mesma natureza, inclusive o Brasil, o qual colaborou com a Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos

Rodoviários (PIRC). Em decorrência de tais investidas, em 1981 constituiu-se o HDM-II e em 1989, com a finalização da fase de modelação do software, surgiu o HDM-III.

O modelo HDM-III vigorou por duas décadas avaliando técnica e economicamente projetos e estratégias para o setor rodoviário. Porém, Nunes (2012) afirma que apesar dos modelos se mostrarem adequados, havia a necessidade de se aperfeiçoar as ferramentas e de se incluir no sistema novos resultados obtidos ao redor do mundo, atualizando-se e abastecendo-se o banco de dados. Em consequência disso, lançou-se então em 2000 o HDM-4.

2.3.1.2 Caracterização

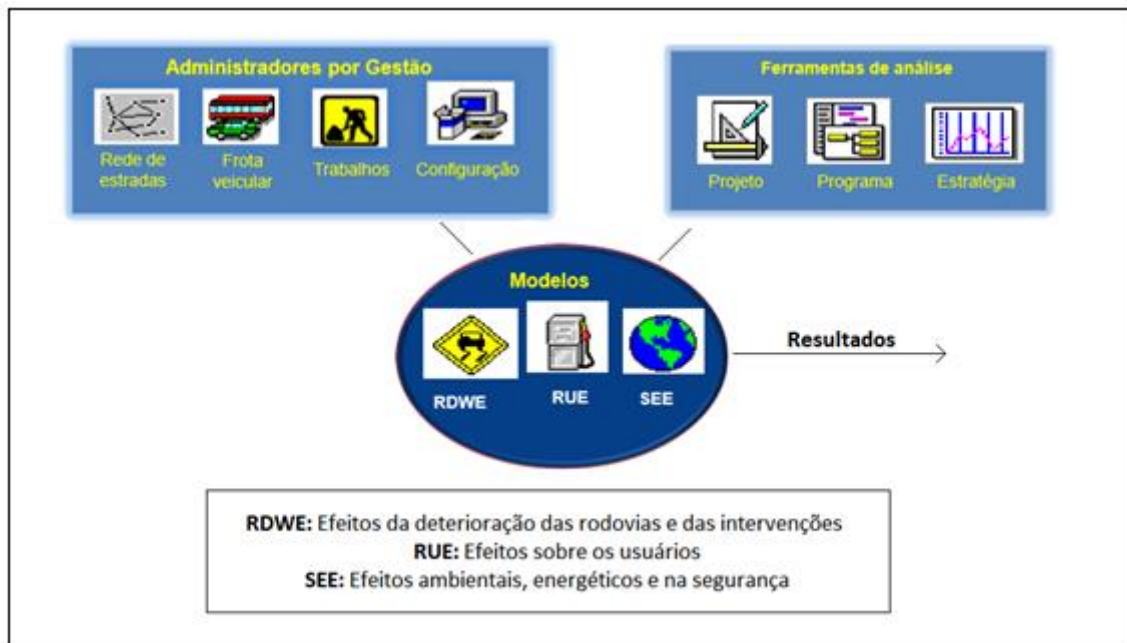
O software HDM-4 é um programa computacional de Gerência de Pavimentos capaz de projetar cenários de intervenções em rodovias pavimentadas e não pavimentadas. Tem como premissa a utilização de modelos de desempenho que avaliam de forma técnica e econômica projetos de rodovias, permitindo analisar diversas alternativas de soluções para a manutenção e reabilitação dos pavimentos (ALVES e SANTAREM, 2015).

A calibração de dito sistema depende muito do órgão e da finalidade desejada. Para a execução de modelos no programa é necessário adquirir e analisar perfeitamente os dados de entrada que são requisitados, para assim se obter as informações desejadas de acordo com a realidade local (ROCHA e NUNES, 2019).

De acordo com o autor supracitado, a estrutura de análise do HDM-4 é baseada no ciclo de vida dos pavimentos, que para os florestais varia em até 20 anos, e só é possível graças ao software ser capaz de reunir uma grande quantidade de informações acerca das características de transporte. Dessa forma, dito autor reforça ainda que para a obtenção de resultados precisos, o programa leva em consideração as condições da rodovia, o tráfego, as condições climáticas, a conservação da pista, investimentos e modelagem econômica (custos de manutenção, custo de operação, etc.), recomendando ao gestor os trechos que devem ser priorizados.

Na configuração do sistema, a interação entre 3 blocos de entrada (Gestão de Dados, Ferramentas de Análise e Modelos) constitui a estrutura funcional do HDM-4. Na Figura 6 evidencia-se dita estrutura.

Figura 6 - Arquitetura do sistema HDM-4.



Fonte: Adaptado de DNIT (2017).

Assim, o sistema HDM-4 permite análises técnicas, econômicas e ambientais sejam elas em nível de rodovia ou de uma rede de rodovias, pela aplicação de três métodos de avaliação (DNIT, 2011):

- I. Análise por projeto;
- II. Análise por programa;
- III. Análise por estratégia.

Quando se deseja analisar a viabilidade da implantação de uma rodovia ou execução de melhorias em rodovia existente, adota-se o método de análise por projeto. Na análise por programa, permite-se gerar programas de serviços de manutenção e melhorias que maximizem o retorno econômico. Já na análise por estratégia, busca-se maximizar o retorno econômico, a melhoria da irregularidade ou minimizar os custos para atingir uma irregularidade pré-fixada, com base nas restrições orçamentárias (DNIT, 2011).

Devido a tais características e pelo emprego do HDM-4 pelo Banco Mundial, diversos países utilizam essa ferramenta nos seus estudos de viabilidade de projetos (MIZUSAWA, 2009). A exemplo, um estudo de caso realizado no Reino Unido por Perrotta et al. (2019), fez uso da análise estratégica fornecida pelo HDM-4 ao lidar

com o *Big Data* disponível em questão. O objetivo do trabalho buscava estimar o consumo de combustível associado a cada tipo de caminhão trafegando sobre as vias alvo, bem como a necessidade de calibração adicional do modelo utilizado.

Outro estudo desenvolvido na Indonésia por Suwanto e Fauziyah (2019), objetivou quantificar os benefícios econômicos de dois projetos alternativos para estradas de cascalho através do HDM-4. O primeiro projeto voltava-se ao recobrimento da via de interesse somente com material cascalhoso e o segundo utilizando-se dito cascalho associado em partes à emulsão asfáltica.

Na China, Demie, Quezon e Feyissa (2020) voltaram-se à calibração do sistema HDM-4 adaptando-o às condições específicas do local de estudo. O objetivo do trabalho foi relacionar os fatores de calibração à análise estrutural e econômica da rugosidade do pavimento ao longo do tempo, caracterizando assim a deterioração do trecho estudado.

Já no Brasil, trabalhos relacionados ao uso do sistema HDM também têm figurado. Ramos, Cavaignac e Gonzalez (2020) objetivaram estudar o grau de eficiência de intervenções realizadas nos últimos 10 anos em vias do Maranhão, relacionando ditos serviços às condições de trafegabilidade.

Ainda, Romeiro Júnior et al. (2020), demonstrando a versatilidade do software HDM-4, embasaram seu estudo na análise da deterioração dos pavimentos em função da regulamentação de veículos de sobrecarga no Brasil. Nesse sentido, os modelos foram aplicados a fim de se obter a deterioração do pavimento considerando diversos cenários de sobrecarga veicular.

Em se tratando de avaliação econômica, ao estudar as concessões rodoviárias no Estado de São Paulo em função das condições do pavimento, Assis (2017) também fez uso do sistema HDM-4. Através do software, pôde-se obter os custos de operação dos veículos para cada trecho distinto do estudo, além de sua análise econômica.

Em seu trabalho, entretanto, Marques e Lopes (2004) chegaram à conclusão que o HDM-4, embora concreto, é um sistema muito complexo e de difícil implantação no Brasil, especialmente em vias de baixo volume de tráfego. Apesar de ser de uso frequente pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), os autores afirmam que sua consolidação exige a disponibilidade de um banco de dados com as características dos trechos, o que nem sempre é mantido pelos demais gestores rodoviários brasileiros.

2.4 Indústria 4.0

De acordo com Rodič (2017), o termo Indústria 4.0 foi proposto pelo governo alemão em 2011, fazendo alusão ao que seria a quarta revolução industrial, na qual observa-se a fusão do mundo digital, físico e biológico em um conjunto de tecnologias, caracterizando um novo conceito de indústria. Tal conceito é baseado em processos inteligentes, os quais almejam o aumento de eficiência a partir da integração de ambientes reais e virtuais, por meio da utilização de tecnologias emergentes (WAN, CAI e ZHOU, 2015).

A propagação dessa manufatura avançada é sustentada por 9 pilares tecnológicos, os quais, segundo Rüßmann et al. (2015), são a base da Indústria 4.0. Ditos pilares são evidenciados na Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Pilares da Indústria 4.0.



Fonte: Adaptado de Melo (2020).

Dentre as bases da nova era industrial, soluções tecnológicas como a Internet das Coisas, o *Big Data* e tecnologias integradas estão cada vez mais em pauta, viabilizando a conexão entre equipamentos, o fluxo de informações e o processamento de dados em grande volume e variedade (SANTOS, 2019).

Tais funcionalidades colaboram para que as fábricas sejam inteligentes o suficiente para ter a capacidade e a autonomia de programar manutenções, antecipar falhas e se adaptar aos requisitos e mudanças não planejadas no processo produtivo (YAMADA e MARTINS, 2019).

2.4.1 Logística Florestal na Indústria 4.0

Segundo Machado et al. (2009), logística pode ser definida como parte do processo da cadeia de suprimentos que planeja, programa e controla, de forma eficiente e eficaz, a expedição, o fluxo e a armazenagem de bens e serviços, assim como o de informações. Resumidamente, é possível chamar de logística florestal o conjunto de sistemas logísticos que compõem a cadeia produtiva florestal.

Nesse sentido, de acordo com LogWeb (2019), um dos principais problemas de logística ligado ao setor de florestas está relacionado às condições das estradas. Segundo a fonte citada, a infraestrutura daquelas que escoam produtos florestais carece de atenção especial devido à maior dificuldade de se trafegar em vias não pavimentadas, especialmente em se tratando de áreas com excesso de chuva, maiores declividades e muitas curvas. Nesses casos, há uma maior necessidade de manutenção dessas vias e, conseqüentemente, de melhor planejamento logístico; planejamento este que Alves (2011) afirma vir sofrendo com a falta de pesquisas.

Dessa forma, com o intuito de otimizar e planejar a cadeia de produção, a adoção do termo “Indústria 4.0” vem sendo utilizada com mais frequência no setor florestal, mesmo que ainda em processo de consolidação (LOGWEB, 2019).

Posto isso, a Indústria 4.0 traz ao setor de transporte florestal uma nova forma de se pensar em manutenção, e segundo Azevedo (2017), torna os processos de planejamento mais assertivos e a tomada de decisões mais rápida. O princípio básico de encadear máquinas, dispositivos inteligentes e sistemas cria redes inteligentes em toda a cadeia de valor (de materiais à produção) que podem se controlar mutuamente. Baseando-se nesse controle é que se insere, então, o conceito de Logística Florestal 4.0.

Segundo a LogWeb (2019), Logística Florestal 4.0 pode ser definida como a reestruturação dos processos logísticos que ocorrem nas operações florestais, adaptando-os à tecnologia digital e de automação. Estas tecnologias são promovidas

por meio do *Big Data*, Inteligência Artificial, *Digital Twin*, *Machine Learning*, Internet das Coisas, dentre outras, voltadas ao uso inteligente e preditivo da informação, auxiliando o setor florestal de forma eficiente.

O *Big Data*, por exemplo, é uma ferramenta com o objetivo de gerar valor quantitativo e qualitativo no manejo de florestas por meio da análise de grande volume de dados. Juntamente com a Inteligência Artificial, ela é pilar da Análise e Gestão Florestal e está ligada ao processo de aprendizagem de máquinas e/ou softwares de análise, baseado nos 5 Vs: Velocidade, Volume, Variedade, Veracidade e Valor (B. FOREST, 2018).

Ademais, a ferramenta permite ao gestor, em um banco de dados de grande porte disponível, o uso de previsões avançadas que possibilitam alcançar transparência e produtividade (LEE, KAO e YANG, 2014), sendo possível obter redução nos custos de combustível, de pneus, alcançar um melhor domínio sobre emissões poluentes e conseqüentemente lograr uma maior eficiência da frota.

Neste contexto observa-se que a Floresta 4.0, além de revolucionar o mercado oferecendo equipamentos de alta produtividade, revela tecnologias que proporcionam ao consumidor informações em tempo real de todas as operações executadas, prometendo ao setor de logística florestal a tomada de decisões de forma cada vez mais rápida, eficiente e assertiva (ABREU, 2019).

2.4.2 *Digital Twin* (Gêmeo Digital)

Outro importante pilar da Indústria 4.0 diz respeito à simulação, isto é, aos sistemas ciber-físicos voltados à virtualização dos processos reais a partir de cópias digitais inteligentes (XU, XU e LI, 2018). É nesse contexto que surge o termo *Digital Twin* como um componente central da Indústria 4.0, uma vez que essa ferramenta explora a interface entre o físico e o virtual, baseando-se no ambiente real através de seus dados e utilizando-se da simulação para apoiar a tomada de decisões (KRITZINGER et al. 2018).

Segundo Kunath e Winkler (2018), *Digital Twin* pode ser entendido como uma cópia virtual representativa de sistemas físicos que é abastecida automaticamente por dados reais, visando a otimização de tais sistemas e o retorno de respostas, instruções ou comandos com certo grau de autonomia. Resumidamente, nada mais é

que o acoplamento do sistema de produção com seu equivalente digital dentro de um processo produtivo, sendo capaz de fornecer todas as perspectivas e cenários sobre determinado produto (UHLEMANN, LEHMANN e STEINHILPER, 2017).

Tendo os softwares como principais ferramentas, Santos (2019) destaca que o conceito de *Digital Twin* reforça os preceitos da Indústria 4.0, uma vez que na busca por maior eficiência sua aplicação vai ao encontro dos princípios da filosofia enxuta, sendo possível reduzir movimentações e transportes desnecessários através da otimização de processos.

O que os Gêmeos Digitais representam é a possibilidade de olhar para o equipamento e ver além do que os sentidos humanos são capazes de descrever. Eles se propõem a trazer informações relevantes sobre o objeto para um ambiente virtual, no qual análises e testes são realizados por algoritmos computacionais que traçam um perfil evolutivo do equipamento, destacando tendências que podem ser maléficas e suas causas, prevenindo situações antes que elas ocorram (QUINALHA, 2018).

Baseado nisso, Silva (2019) afirma que a técnica de aplicação do *Digital Twin* vem emergindo fortemente como um meio de automatizar e melhorar processos de criação, execução e correção de novos produtos e equipamentos. Segundo Quinalha (2018), pequenas e médias empresas serão atingidas por esta tendência, uma vez que softwares de desenvolvimento de produtos já estão incorporando a simulação digital, antecipando seu uso em conjunto com Gêmeos Digitais. Segundo o autor, num futuro próximo, tanto pequenos quanto complexos dispositivos terão um *Digital Twin* associado a pelo menos uma etapa do seu ciclo de vida.

Nesse escopo, concebido como uma entidade virtual promissora no que diz respeito ao gerenciamento do ciclo de vida de ativos, um Gêmeo Digital tem toda sua base fundamentada e sobreposta à simulação avançada (MACCHI et al. 2018).

2.5 Simulação

2.5.1 Conceito e aplicações

Quando se trabalha no contexto de sistemas ciber-físicos, mais precisamente no que se refere ao *Digital Twin*, a simulação ganha espaço no âmbito da Indústria 4.0. Como os Gêmeos Digitais se referem a cópias virtuais com certa inteligência e

que visam, sobretudo, a otimização de decisões, observa-se que a simulação pode ser utilizada como uma alternativa na concepção de tais gêmeos (RODIČ, 2017).

Dessa maneira, simulação pode ser definida como a técnica de resolução de problemas, seguindo as mudanças que ocorrem durante a execução de um modelo dinâmico de um sistema (PALMA, 2001). De acordo com JR e Ingalls (2015), consiste no processo de projetar um modelo de um sistema real e conduzir experiências, inferindo no comportamento do sistema e na avaliação de diferentes estratégias.

Na área de Pesquisa Operacional a simulação é uma das técnicas mais utilizadas, onde destacam-se suas inúmeras aplicações enquanto ferramenta: concepção e análises de sistemas de manufatura, avaliações de sistemas financeiros, concepção e análises de sistemas de transporte, de serviços e militares, dentre outras aplicações (LAW, 2014).

Essa ferramenta tecnológica consegue atender às necessidades crescentes de se lidar com diferentes camadas de decisão dentro dos sistemas empresariais, fato este que reforça os preceitos da indústria moderna (JAHANGIRIAN et al. 2010). Nesse âmbito, técnicas de otimização são cada vez mais empregadas em conjunto com a simulação, tanto para o fornecimento de soluções ótimas quanto para evidenciar restrições, desperdícios e recursos ociosos de determinado sistema produtivo.

Para a realização de simulações, faz-se necessário obter uma representação do sistema real. Essa representação é o que se conceitua como modelo, ou seja, é o corpo de informações sobre o sistema. Segundo Palma (2001), todos os elementos que compõem o real, relevantes para captação da informação desejada, devem ser contidos dentro do modelo. Assim, o sistema terá uma representação fidedigna, garantindo a qualidade das informações obtidas pela simulação.

Como na Indústria 4.0 grandes volumes de dados são coletados continuamente, isso significa que para o processamento avançado é necessário um método alternativo, rápido e flexível, para gerar agendamentos instantâneos em tempo real durante a operação do processo (ZAAYMAN e INNAMORATO, 2017).

Segundo os autores anteriormente citados, é nesse ponto que um modelo de simulação se torna muito mais benéfico do que um modelo matemático. No modelo de simulação, a lógica dentro do sistema é descrita em qualquer nível de detalhe que se deseje. Todo o manuseio complexo de material (veículos guiados automaticamente, transportadores, robôs ou outros dispositivos) que ocorre dentro e

entre os centros de trabalho pode ser modelado. Como se simula o modelo e não se "resolve" o modelo, pode-se incluir o máximo de detalhamento sem que haja um impacto significativo no tempo de execução.

Ainda segundo Zaayman e Innamorato (2017), quando o modelo é executado, ele age de acordo com o comportamento do sistema real, simulando o movimento real de tarefas em uma sequência ordenada pelo tempo. Com isso, ao contrário de um modelo matemático, a simulação também nos permite animar o comportamento do sistema e vê-lo em execução ao longo do tempo.

Assim, conforme Santos (2019), a modelagem é capaz de fornecer respostas para a tomada de decisão a um custo relativamente baixo. Neste caso, devido à complexidade crescente dos sistemas com os quais se tem contato, a simulação se tornou uma ferramenta imprescindível quanto à modelagem dos mesmos.

Porém, ainda de acordo com o autor, no que se refere a trabalhos que utilizam a simulação, o conceito de *Digital Twin* é ainda pouco explorado, havendo apenas abordagens iniciais e pouco aprofundadas sobre os benefícios de sua utilização.

No que tange às suas características, Nance e Sargent (2002) afirmam que a simulação pode ser classificada quanto a seus objetivos e quanto à sua representação de tempo e estado.

No tocante aos objetivos, pode-se citar aqueles voltados à Análise, à Educação e Treinamento, à Avaliação de Sistemas e à Pesquisa. Já quanto à sua temporalidade e espaço, destacam-se a Simulação de Monte Carlo, a qual age sem se considerar o comportamento do sistema no decorrer do tempo, a Simulação Contínua, a qual considera o comportamento temporal, a Simulação a Eventos Discretos (SED), a qual trabalha em intervalos discretos de tempo a partir da ocorrência de eventos e, por fim, a Simulação Baseada em Agentes (SBA), que é composta por agentes individuais, autônomos e interativos (NANCE e SARGENT, 2002; CHWIF e MEDINA, 2015).

Dentre as ferramentas que irão se destacar no ambiente da Indústria 4.0, juntamente com os Sistemas Ciber-físicos por meio do *Digital Twin*, Rodič (2017) ressalta que a Simulação a Eventos Discretos (SED) é peça chave na concepção da indústria do futuro, pois ela é capaz de realizar justamente o papel do *Digital Twin*, tendo importante função na concretização da virtualização.

Segundo Uriarte, Ng e Moris (2018), a SED é a técnica de simulação mais popular de apoio à tomada de decisões em sistemas de manufatura e, conforme mencionado anteriormente, diz respeito à modelagem de sistemas que evoluem

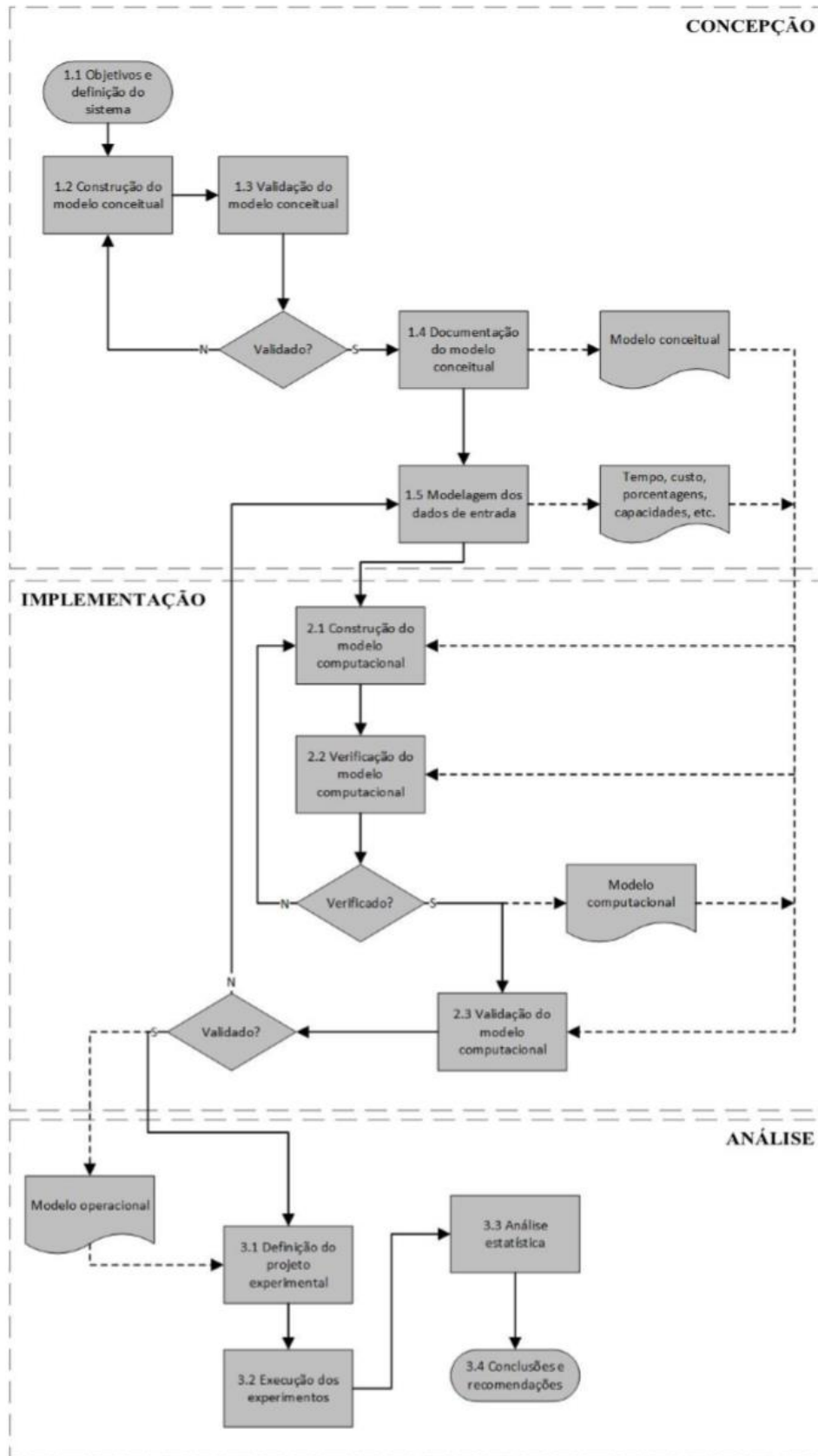
instantaneamente em pontos separados no tempo. Neste caso, de acordo com Law (2014), tais pontos são representados por ocorrências capazes de mudar o estado do sistema representado pelo modelo de simulação.

Nesse contexto, a utilização da simulação na obtenção do *Digital Twin* obedece a algumas fases. De acordo com Montevechi et al. (2010), a primeira fase do projeto de simulação é a concepção. Nela tem-se as seguintes etapas:

- Formulação do problema;
- Construção do modelo conceitual;
- Validação do modelo conceitual;
- Documentação do modelo conceitual;
- Modelagem dos dados de entrada.

A segunda grande fase é chamada de implementação e abrange as etapas de construção, verificação e validação do modelo computacional. Como última fase tem-se a análise, que se refere ao planejamento e execução dos experimentos, onde é realizada a elaboração de possíveis cenários, uso de planejamento de experimentos (DOE) e testes estatísticos (MONTGOMERY e RUNGER, 2018). Finalmente, os resultados dos cenários são analisados obtendo-se conclusões e respostas para o problema definido na etapa de concepção. Na Figura 8 a seguir, apresenta-se a sequência de ações para um SED.

Figura 8 - Esquema de condução de projetos para simulação SED.



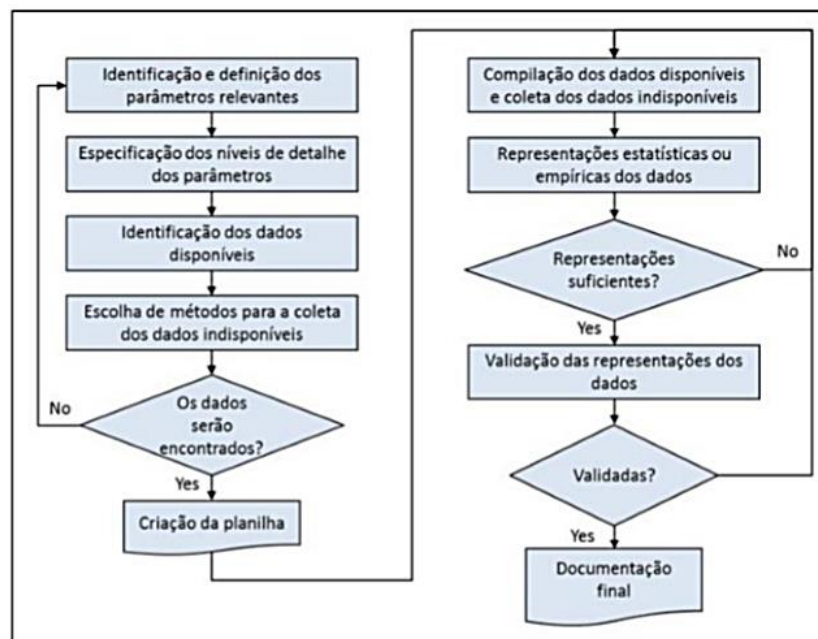
Fonte: Montevechi et al. (2010)

Para Banks et al. (2010), os dados de entrada necessários a qualquer sistema variam conforme os objetivos do estudo, sendo o gerenciamento dos mesmos definido como o processo de preparação de representações relevantes e válidas para serem utilizadas em um modelo de simulação.

Para a modelagem de um setor de serviços, por exemplo, os dados de entrada podem envolver os tempos entre chegadas, tempo de processo, tempo de espera, porcentagens de produtos a serem retrabalhados, entre outros (MARTINS, 2019). O conhecimento desses *inputs* auxilia na identificação prévia de possíveis gargalos em um fluxo de produção, tornando-se algo benéfico, uma vez que tais processos geralmente merecem maior atenção na cadeia (SKOOG e JOHANSSON, 2008).

A Figura 9 a seguir apresenta um método de gerenciamento de dados de entrada em projetos de SED.

Figura 9 - Gerenciamento de dados de entrada em projetos SED.



Fonte: adaptado de Skoogh e Johansson (2008).

Assim, de forma geral, ao ser criado na indústria 4.0 a partir da virtualização e usado na simulação do processo de produção, um *Digital Twin* passa a possibilitar a transmissão automática de grandes volumes de dados sobre o mundo físico para o mundo digital, quase que instantaneamente (DIAS, 2018).

Por isso, ao serem desenvolvidos, caracterizados, verificados, validados e

otimizados a partir da simulação, os Gêmeos Digitais devem se tornar, com o passar dos anos, tão naturais quanto o desenvolvimento de softwares, por exemplo (SCHLUSE e ROSSMANN, 2016).

Porém, de acordo com Uriarte, Ng e Moris (2018), para que ocorra a implementação do *Digital Twin* e demais conceitos da Indústria 4.0, ainda há de se garantir grandes investimentos na aquisição de novas tecnologias.

2.5.2 Softwares modelos de simulação

Tradicionalmente a simulação é aplicada em projetos de design de sistemas, onde o objetivo básico é avaliar alternativas, prever desempenhos e melhorá-los, sejam eles a longo ou a curto prazo. Nesta função, a simulação se tornou uma ferramenta comercial padrão de sucesso (ZAAYMAN e INNAMORATO, 2017).

No universo da manufatura, a principal nova tendência diz respeito às fábricas conectadas digitalmente, que introduzem uma série de requisitos exclusivos que as ferramentas de simulação tradicionais não atendem. É nesse contexto que o uso de softwares de simulação como o FlexSim, Simio, ProModel ou Arena vem tornando-se cada vez mais comum, especialmente na resolução de problemas que são inviáveis de serem solucionados analiticamente (NASCIMENTO, 2019).

2.5.2.2 Simio

Lançado em 2007 pela Simio LLC, o Simio é uma ferramenta de simulação com eventualidade de situações reais, de estrutura fácil, rápida e flexível, que proporciona uma avaliação veloz nas alternativas para reduzir os custos e auxiliar na tomada de decisão (ALMEIDA e PEREIRA, 2016).

É uma estrutura de modelagem de simulação baseada em objetos inteligentes, no entanto também suporta outros paradigmas de modelagem, incluindo orientação de processos e eventos (MARCELINO et al. 2020). Segundo Zaayman e Innamorato (2017), foi desenvolvido desde o início com foco tanto em aplicativos tradicionais quanto em programação avançada, com a ideia básica de que um único modelo do programa possa servir a ambos os propósitos.

Ao se basear em objetos inteligentes, o sistema Simio pode considerar como

objeto qualquer coisa que se encontre em seu sistema, seja ela uma máquina, robô, avião, cliente, caminhão, navio, etc (ZAAYMAN e INNAMORATO, 2017). A partir daí, um modelo é construído combinando objetos que representam os componentes físicos do sistema, buscando se aproximar o melhor possível de um sistema real. Porém, os autores supracitados reforçam que a implementação adequada dos objetos é muito importante para se obter resultados confiáveis no modelo de simulação criado.

Marcelino et al. (2020) ressalta que, além da animação 2D usual, o Simio permite construir e executar modelos dinâmicos animados em 3D de uma ampla gama de sistemas, como fábricas, cadeias de suprimentos, transportes e serviços e também mapear o estado de ociosidade dos equipamentos e os tempos gastos em fluxos. A vantagem da simulação em 3D são os resultados da simulação, que podem ser usados como base para estudos comparativos entre o modelo existente e o proposto (OJSTERSEK e BUCHMEISTER, 2017).

A Figura 10 a seguir demonstra um exemplo de animação 3D via Simio.

Figura 10 - Modelo Simio com animação 3D.



Fonte: Vik et al. (2010).

Ojstersek e Buchmeister (2017) reforçam ainda a possibilidade que o programa possui de transferir dados reais de diferentes sistemas, como por exemplo do Microsoft Office Excel, da área de produção para o ambiente de software Simio, evidenciando a versatilidade do sistema. Além disso, Zaayman e Innamorato (2017) afirmam que uma força adicional de operação do Simio é sua excelente renderização de resultados, com representação visual clara de cronogramas e modelos em tempo real, juntamente com informações de maior valor, na forma de gráficos e painéis

personalizados.

No que tange às representações, os autores anteriormente citados afirmam ainda que o Simio aborda explicitamente a projeção otimista de um cronograma determinístico, explorando as variações de risco associado a dito cronograma. Essa abordagem é conhecida como RPS (Planejamento e Programação com Base em Riscos) e é usada para gerar cronogramas que minimizem riscos e reduzam custos na presença de incertezas.

De forma geral, a velocidade e flexibilidade promovidas pelo Simio para modelagem operacional, satisfaz os requisitos de planejamento das denominadas Fábricas Inteligentes (“*Smart Factories*”) e se mostra adequado para a representação visual de sistemas programados em tempo real da Indústria 4.0 (MARCELINO et al. 2020). Ao ser projetado para oferecer suporte a aplicativos tanto no design quanto na programação do sistema, Zaayman e Innamorato (2017) atestam que o Simio demonstra benefícios que o tornam ideal para um ambiente de fabricação cada vez mais digital.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como metodologia para obtenção dos resultados propostos, o presente projeto foi dividido em duas frentes de trabalho: a primeira relativa ao processamento de dados via software HDM-4 e a segunda referente à simulação de tais dados via software Simio, ligado ao conceito de *Digital Twin*.

3.1 Parte I - HDM- 4 (*Highway Development and Management*)

3.1.1 Calibração do sistema

Na utilização do HDM-4 como ferramenta de gestão de pavimentos, inicialmente o software deve ser configurado com dados de entrada (*inputs*) de interesse. Devem ser definidos a princípio, por exemplo, a rede de rodovias a ser estudada, o tipo de veículo utilizado e os padrões de manutenção e de melhorias a serem adotadas nas vias alvo.

Os *inputs* utilizados neste estudo para a configuração do sistema são descritos a seguir:

3.1.1.1 Tipo de solo

Como parâmetros iniciais, elegeram-se dois tipos de subleitos para composição e representação das estradas de interesse. Dita escolha se baseou na realidade dos solos da área de estudo, os quais são frequentemente utilizados para tráfego florestal por empresas do ramo. Dessa forma, trabalhou-se com um tipo de solo pedregoso (GC) e com um solo argiloso (CH).

A seguir, na Tabela 3, são apresentadas as classificações de ditos solos.

Tabela 3 - Designações dos grupos de solos adotados.

Símbolo do Grupo	Descrição dos símbolos do grupo
GC	Cascalho argiloso com areia
CH	Argilas gordas, de plasticidade média ou alta

Fonte: Adaptado de DNIT (2006).

Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) apresentado pelo DNIT (2006), os solos do grupo GC, cujo símbolo G procede de “gravel” (pedregulho) e C de “clay” (argila), são caracterizados por apresentarem cascalho (pedregulhos argilosos) misturados à areia e à fração fina constituída por argila, sendo tais componentes bem graduados.

Já os solos pertencentes ao grupo CH, cujo símbolo C também provém de “clay” (argila) e H de “high” (alto) se referindo à alta compressibilidade, são essencialmente argilas inorgânicas, geralmente de alta plasticidade (sendo plasticidade definida como a facilidade em ser moldada por pressão externa sem alteração de volume). Dessa forma, quando as argilas apresentam-se muito plásticas, são classificadas como argilas gordas, e quando pouco plásticas, são tidas como argilas magras.

Seguindo-se na caracterização desses grupos no intuito de consolidar os dados de entrada, obteve-se através da literatura a inter-relação entre ditos solos e seus valores CBR. Tais valores são obtidos através do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido como *California Bearing Ratio* (CBR), método este desenvolvido nos Estados Unidos pelo Departamento de Estradas de Rodagem da Califórnia, o qual avalia, através de penetração, a capacidade de suporte dos solos.

Nesse sentido, de acordo com Machado (2013), verifica-se que solos do grupo GC normalmente apresentam CBR entre 20 e 40%, enquanto aqueles do grupo CH detêm valores de menos de 2 a 15%.

Quanto à Classificação TRB (*Transportation Research Board*), esta figura como a mais empregada na classificação de solos para fins rodoviários, dada à sua base histórica de descrição apresentada. Desenvolvida pelo *Highway Research Board* dos Estados Unidos em 1945, tal metodologia designa os solos granulares pelos grupos A-1, A-2 e A-3, com os respectivos subgrupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7, aos quais se atribui comportamento de excelente a bom como camadas do subleito de pavimentos rodoviários. Por outro lado, os solos silto-argilosos estão reunidos nos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7, bem como nos subgrupos A-7-5 e A-7-6, aos quais se atribui comportamento de fraco a pobre como subleito de vias (MACHADO, 2013).

Na Figura 11 apresenta-se a Classificação TRB com os respectivos comportamentos dos subleitos.

Figura 11 - Classificação TRB (*Transportation Research Board*).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira n. 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Granulometria - % passando na peneira											
n. 10	50 máx.										
n. 40	30 máx.	30 máx.	51 mín.								
n. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na peneira n. 40:											
Límite de Liquidez				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A-7-5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Machado (2013).

Tanto os dados referentes aos valores CBR quanto aqueles voltados ao provável comportamento dos subleitos podem ser associados para caracterizar novas classificações. Assim sendo, na Tabela 4 é apresentada a relação entre a Classificação TRB e os valores demandados pelo método CBR.

Tabela 4 - Valores prováveis de CBR para a classificação TRB.

Solos (TRB)	CBR (%)
A-1-a	40 a mais de 80
A-1-b	20 a mais de 80
A-2-4 e A-2-5	25 a mais de 80
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	Menos de 2 a 10
A-6 e A-7	Menos de 2 a 15

Fonte: DNIT (2006).

À vista disso, segundo o DNIT (2006), a correlação mais provável entre a TRB e os solos estudados infere que os pertencentes ao grupo GC classificam-se como A-2-6 e A-2-7, enquanto aqueles do grupo CH se enquadram como sendo A-7-6, definições que colaboram para a determinação das feições geotécnicas desses subleitos.

Assim, os dados apresentados referentes os solos escolhidos, bem como seu detalhamento, tornam-se de grande importância ao sistema HDM-4 uma vez que suas características geotécnicas têm influência direta no padrão de tráfego a ser adotado, no tipo de veículo escolhido, na intensidade de manutenção realizada e nos demais fatores inerentes à qualidade das vias de interesse. Dessa forma, deve-se alimentar o software com um nível de informação tal que se permita obter resultados os mais fidedignos possíveis à realidade local.

3.1.1.2 Clima

Outro parâmetro considerado no sistema diz respeito ao clima predominante no local de estudo. As zonas climáticas são usadas nos modelos do HDM-4 para descrever as condições do clima em diferentes partes da rede viária considerada, afetando diretamente a modelagem de características do pavimento, como por exemplo sua deterioração.

Com base nisso, buscou-se considerar os climas referentes à região sul e sudeste do Brasil, visto que estas são as regiões mais significativas quanto a florestas

plantadas no país, concentrando uma rede de estradas extensa e ativa. Dessa maneira, definiu-se como climas de interesse o Tropical Brasil Central e o Temperado, conforme esquematizado na Figura 12.

Figura 12 - Modelo de classificação de climas adotado pelo sistema HDM-4.



Fonte: IBGE (2002).

3.1.1.3 Geometria

O sistema HDM-4 possui em sua funcionalidade 7 diferentes classes de geometria que variam entre si quanto à declividade. Tais classes são definidas de acordo com o alinhamento vertical e horizontal dos trechos, variando desde formas mais suaves a mais acentuadas.

Na Figura 13 apresentam-se as 7 classes geométricas consideradas no sistema, com seus respectivos dados de curvatura vertical (RF) e horizontal (ADC).

Figura 13 - Classes de geometria inerentes ao sistema HDM-4.

Classes da geometria		RF (m/km)	ADC (graus/km)
A	Reta e plana	1	3
B	Praticamente reta e pouco ondulada	10	15
C	Pouco sinuosa e praticamente plana	3	50
D	Pouco sinuosa e pouco ondulada	15	75
E	Pouco sinuosa e muito ondulada	25	150
F	Sinuosa e pouco ondulada	20	300
G	Sinuosa e muito ondulada	40	500

Fonte: Klein (2005).

Dessa forma, no intuito de tentar representar todas as classes presentes, escolheu-se trabalhar com 3 delas, sendo estas a mais plana, a mais íngreme e a intermediária entre as duas, representadas respectivamente pelas letras A (reta e plana), G (sinuosa e muito ondulada) e D (pouco sinuosa e pouco ondulada) na Figura 13.

3.1.1.4 Frota e distância

Em empreendimentos florestais, o setor de transporte e estradas vem adquirindo cada vez mais importância pelo fato dos custos inerentes a esse setor incidirem significativamente sobre o valor final da madeira. Dessa forma, os estudos de transporte rodoviário florestal devem ser conduzidos no sentido de identificar o tipo de veículo mais adequado para se transportar madeira de determinada região ou empresa (SILVA et al. 2007).

A utilização de veículos com maior capacidade de carga tem sido uma das maneiras de diminuir o custo de transporte. Porém, essa maior capacidade é limitada pela baixa qualidade das estradas, com aclives e declives pronunciados e pelo padrão da superfície de pista de rolamento (FIEDLER, 2012).

Além disso, o número de eixos na composição do veículo e o peso em cada eixo são fatores de preocupação na escolha do modal adequado, uma vez que o transportador busca a otimização da quantidade de madeira transportada por veículo sem, contudo, ultrapassar os limites estabelecidos pela legislação (SEIXAS, 2001).

Nesse sentido, a importância do caminhão como meio de transporte deve-se não só ao volume de carga a ser transportado, mas à versatilidade, tempo e funcionalidade no deslocamento e na ligação entre rotas.

A classificação dos veículos de carga foi proposta por Machado et al. (2009) de acordo com a carga líquida transportada e o rendimento energético, o que se apresenta a seguir na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos veículos de carga.

Veículos	Carga líquida transportada (t)	Rendimento energético (t km l⁻¹)
Leve	Até 10	15
Médio	10 a 20	27
Semipesado	20 a 30	35
Pesado	30 a 40	52
Extrapesado	Acima de 40	60

Fonte: Machado et al. (2009).

Dessa forma, como exemplos de veículos extrapesados têm-se:

- Bitrem – composto por um cavalo mecânico e dois semirreboques;
- Tritrem – composto por um cavalo mecânico e três semirreboques e;
- Rodotrem – composto por um veículo articulado e um reboque.

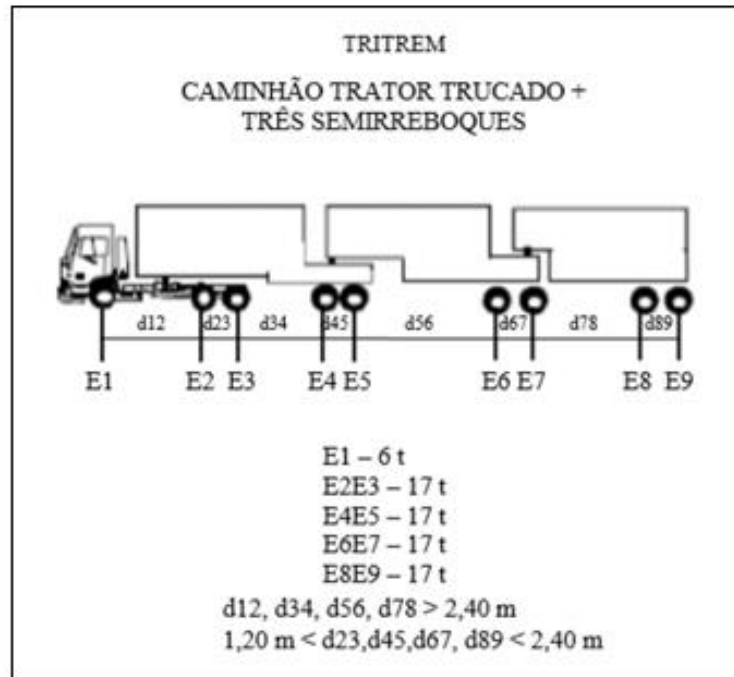
Baseado nessa classificação e nas principais características das empresas florestais da região de estudo, adotou-se o tritrem como veículo de transporte de cargas a ser trabalhado.

Segundo Moraes (2012), o tritrem é uma combinação especial de transporte de madeira, sendo formado por um veículo trator de três eixos e por três semirreboques de dois eixos cada, totalizando nove eixos. A unidade tratora possui “quinta-roda”, sendo as estruturas tracionadas por um cavalo mecânico 6x4, com 340 c.v. de potência.

Este conjunto tem Peso Bruto Total Combinado (PBTC) de 74 t, capacidade de carga líquida de aproximadamente 48,8 t e comprimento máximo de 30 metros, sendo que para a Combinação de Veículos de Carga (CVC) desse modal há necessidade de Autorização Especial de Trânsito (AET) (MORAIS, 2012).

Na Figura 14 representa-se a silhueta virtual de um tritrem com suas composições características. Em seguida, na Figura 15, evidencia-se a imagem real do veículo.

Figura 14 - Representação do tritrem e suas composições.



Fonte: Adaptado de Moraes (2012).

Figura 15 - Veículo tritrem para carregamento de madeira.



Fonte: Fibria (2016).

A escolha do tritrem como modal de transporte se fundamenta em testes realizados em empresas do setor florestal, os quais confirmaram a eficiência do

veículo. Além da redução dos tempos gastos em viagens, o que permite otimizar o sistema de transporte, o tritrem apresenta, com relação ao conjunto de pneumáticos, um custo 64% inferior ao treminhão, veículo similar, e uma vida útil significativamente superior, em torno de 13,5%. Ainda, a capacidade de carga do tritrem é a mesma do treminhão, porém, apresenta uma melhor distribuição por eixo em virtude do sistema de tandens e do maior número de eixos da composição (MACHADO e LOPES, 2000).

Além disso, Alves et al. (2013) confirmam que a utilização do tritrem como veículo para transporte de madeira apresenta os menores custos de m³ transportado por km, o que torna tal veículo uma alternativa economicamente viável.

Ainda, o fato do tritrem ser enquadrado como veículo extrapesado influencia diretamente a qualidade e vida útil das estradas não pavimentadas, uma vez que o tráfego desse tipo de modal tende a causar maiores impactos nas vias devido à sua carga. Dessa forma, o estudo sobre esse tipo de veículo fortalece o entendimento sobre seu desempenho técnico, além de também corroborar as possíveis influências socioambientais na logística de transporte florestal.

Dessa maneira, uma vez a escolha do modal veicular tendo sido feita, procedeu-se à calibração do veículo no software HDM-4, alimentando-se o sistema com suas características de interesse. Para tanto, foram considerados os seguintes dados de entrada:

- Total de horas/ano = 8.760 (24h x 365 dias: considerando que normalmente empresas de base florestal operam nos 7 dias da semana, em 3 turnos diários que totalizam 24 horas);
- Total de horas efetivas = 7.096 (81% de eficiência operacional, sendo 90% disponibilidade mecânica e 90% disponibilidade operacional);
- Volume de madeira por viagem = 54 m³ ou 50 toneladas;
- Densidade da madeira: 0,92 t/m³;
- Velocidade média diretriz (projeto) = 34,29 km/h (40 km/h descarregado e 30 km/h carregado);
- Tempo total de carga e descarga (considerando balança, fila, abastecimento etc.) = 2 h/viagem;
- ESALF (*Equivalent Standard Axle Load Factor*: Fator de carga do eixo equivalente padrão) = $1,8 \times 10^6$.

Na Figura 16 tem-se a representação de uma das etapas de calibração do tritrem no sistema.

Figura 16 - Calibração de dados veiculares do modal tritrem no software HDM-4.

Vehicle Attributes: TRITREM - 30 km

Definition Basic Characteristics Economic Unit Costs

Physical

Passenger Car Space Equiv: 2.6

No. of Wheels: 34

No. of Axles: 9

Tyres

Tyre type: Radial-ply

Base no. of recaps: 1.8

Retread cost: 29 %

Utilisation

Annual km: 113532 km

Working hours: 7096 hrs

Average life: 5 years

Private use: 0 %

Passengers: 1 persons

Work related passenger-trips: 100 %

Loading

ESALF: 5

Operating weight: 74000 kg

Calibration...

Reset Defaults

OK

Cancelar

Passenger Car Space Equivalent factor (PCSE)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à definição das distâncias a serem percorridas pela frota, foram analisadas as principais características das empresas florestais no que diz respeito ao modal de transporte adotado e aos frequentes deslocamentos realizados, sendo possível, assim, elencar as distâncias mais representativas para ação dos veículos.

Dessa forma, elegeu-se trabalhar com rotas de 30, 60 e 90 km, por serem as quilometragens mais comumente adotadas no quadro de colheita e transporte do local de estudo. O uso dessas 3 distâncias busca abranger cenários reais que englobem desde deslocamentos curtos (como próximos à fábrica ou pátio de carregamento) até distâncias mais longas, que demandem maior tempo de condução sobre as vias.

3.1.1.5 Reposição de cascalho

Através da combinação e processamento que o sistema HDM-4 permite, parâmetros como espessura e resistência do material de reposição, exigidos para

determinado projeto viário, podem ser determinados por métodos empíricos.

Uma vez escolhidos, os dados relativos a esses parâmetros foram processados através de uma combinação de equações. A primeira, originária do próprio software (Equação 1), expressa os critérios desenvolvidos pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (*Us Army Corps of Engineers*) para a espessura da cobertura exigida em vias, em função das forças do leito da estrada e dos materiais de revestimento (USACE, 2006).

As demais são representadas por uma constituinte (Equação 2) da equação inicial e por outra baseada na correlação entre o número N do eixo-padrão veicular e o valor CBR do subleito, a qual é utilizada para o dimensionamento do pavimento de estradas rurais e florestais, segundo DNIT (2006) (Equação 3).

$$\text{Log}_{10}HG = 1,4 + 12,3 C1^{-0,466} C2^{-0,142} NE^{0,124} RD^{-0,5} \quad (1)$$

Em que:

HG = espessura do revestimento primário (mm);

C1 = CBR do revestimento primário (%) determinado pela da Equação 2;

C2 = CBR do subleito (%);

NE = carga cumulativa equivalente de 40 kN em uma única roda a 550 kPa de pressão dos pneus. N expresso na potência 10 (1.000.000 = 10⁶; logo, usa-se 6);

RD = profundidade de deformação (mm).

Sendo C1:

$$C1 = \text{Exp}(-\ln((\log_{10}(HG) - 1,4)/(12,3 * C2^{(-0,142)} * NE^{(0,124)} * RD^{(-0,5)})))/0,466) \quad (2)$$

Onde:

$$Ht = 77,67 x N^{0,0482} x CBR^{-0,598} \quad (3)$$

Em que:

Ht = Espessura da camada de revestimento primário (cm);

N = Número de solicitações do eixo-padrão de 8,2 t;

CBR = Valor do CBR (%) do subleito.

Justifica-se tal associação de equações pelo fato de que aquela relacionada ao software (Equação 1), uma vez fornecidos os dados de espessura, frota e deformação, fornecem o valor CBR diretamente e de tal forma que se impossibilita alterar ou inserir pelo sistema valores arbitrários nessa característica.

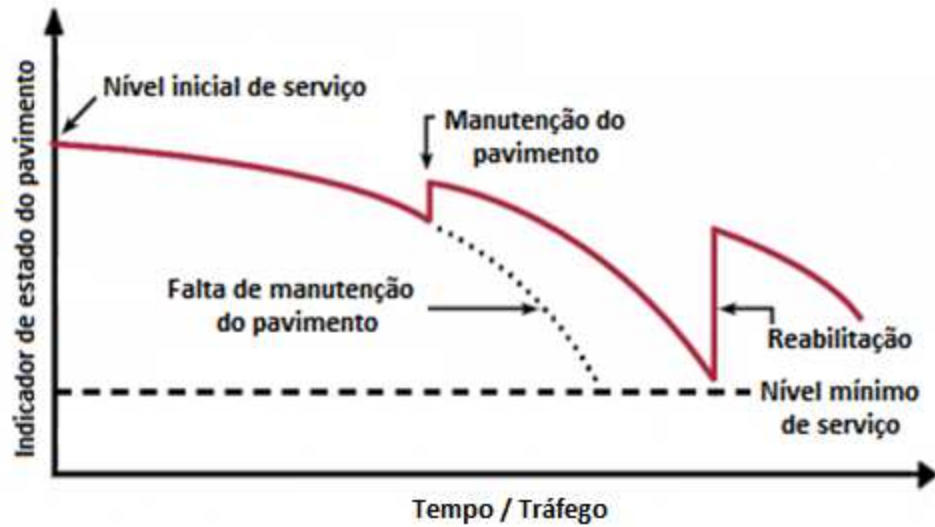
Entretanto, embutindo-se a Equação 3 na equação original do software, através do desmembramento de C1, torna-se possível trabalhar o sistema inserindo valores de CBR para os solos de interesse, o que permitiu dimensionar a espessura mínima de cascalho que o pavimento deve possuir para atender as normas de suporte CBR existentes.

Como o índice CBR exigido para vias pavimentadas é de 80%, uma vez utilizando-se do conjunto de equações, constatou-se que a espessura de revestimento de cascalho (HG) nas vias de interesse deveria ser de pelo menos 70 mm. Tal valor funciona como uma base mínima, abaixo do qual haveria tamanho desgaste de cascalho inicial a ponto de se atingir a camada de subleito, o que conseqüentemente causaria deformações e danos à via, oriundos do não suporte apresentado por esta camada.

Baseado nisso, a entrada de dados referente à camada de revestimento levou em consideração, no presente estudo, a utilização de cascalho tipo A-2-4, grupo de solo que apresenta comportamento de excelente a bom como camada de pavimentos rodoviários. Em seguida, foram considerados para aplicação viária dois montantes de dito cascalho: um com 125 mm de espessura e outro com 175 mm. Tais quantidades foram definidas com base na média entre as classes de espessura 100-150 mm e 150-200 mm respectivamente, comumente adotadas em ramais viários de empresas florestais para manutenção de estradas não pavimentadas.

Assim, cada montante foi simulado à sua vez; primeiramente sendo aplicado como revestimento inicial da via, não havendo reposição independente do desgaste apresentado e, em um segundo momento, sendo repostos todas as vezes em que o montante inicial se apresentasse desgastado abaixo dos 70 mm mínimos. Essa dinâmica de intervenção, que trata da reabilitação gerada pela reposição de cascalho, pode ser denotada na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Variação das condições do pavimento mediante intervenções.



Fonte: Adaptado de Tembe (2017).

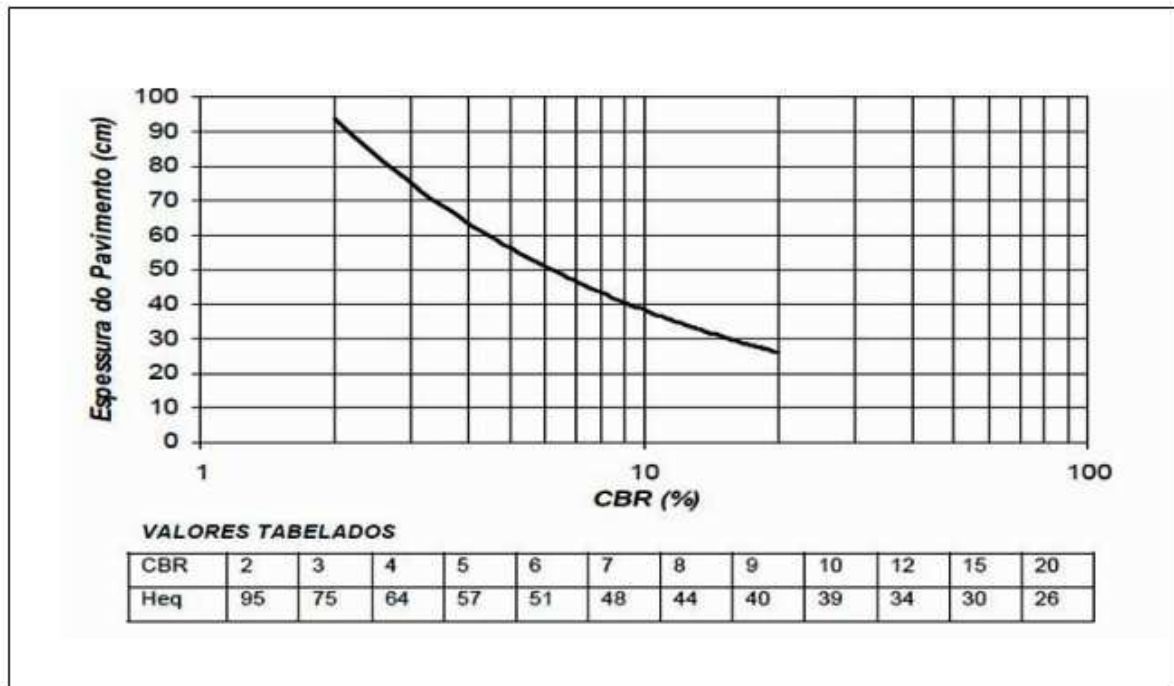
Já na Tabela 6 exemplifica-se a relação entre as espessuras do revestimento primário (HG) e seus respectivos valores de CBR (C1), dimensionados através das equações. Na Figura 18 apresenta-se graficamente a relação logarítmica entre o CBR do subleito e a espessura de dito revestimento.

Tabela 6 - Simulação de dados segundo equações de dimensionamento.

	Input		
HG (mm)	300	200	100
C2 (%)	10	10	10
NE	6	6	6
RD (mm)	5	5	5
C1 (%)	26,42	38,76	92,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Relação entre espessura do pavimento e CBR do subleito.



Fonte: USACE (2006).

Ainda, em posse da classificação TRB, é possível trabalhar a relação de perda de material do subleito e do revestimento primário em função do índice de plasticidade (IP) do solo de interesse, perda essa que impacta diretamente a espessura do revestimento aplicado e infere em sua reposição.

A quantidade anual de perda de material é, desse modo, dada em função da precipitação mensal, do volume de tráfego, da geometria da estrada, de características do cascalho (para estradas de cascalho) e do subleito (para estradas de terra), segundo a Equação 4 a seguir:

$$MLA = K_{gl} 3.65 [3.46 + 0.246 (MMP/1000)(RF) + (KT)(AADT)] \quad (4)$$

Onde:

$$KT = K_{kt} \max [0.022 + 0,969 (HC/57300) + 0.00342 (MMP/1000)(P075) - 0.0092 (MMP/1000)(PI) - 0.101 (MMP/1000)] \quad (5)$$

e

MLA = Perda anual de material, em mm/ano;

KT = Coeficiente de material arrancado induzido por tráfego;

AADT = Tráfego médio anual, em veículo/dia;

MMP = Precipitação média mensal, em mm/mês;

RF = Aumento médio da queda da estrada, em m/km;

HC = Curvatura horizontal média da estrada, em deg/km;

PI = Índice de plasticidade do material, em porcentagem;

K_{gl} = Fator de calibração para perda de material;

K_{kt} = Fator de calibração para o coeficiente de material arrancado induzido pelo tráfego.

A perda de material e conseqüente diminuição do revestimento tornam-se assim parâmetros avaliativos do nível de irregularidade da superfície do pavimento, o qual comumente é representado pelo *International Roughness Index* (IRI). Seus valores, obtidos através de medições do perfil longitudinal da pista, vêm a ser mais uma ferramenta usada pelo HDM-4 no diagnóstico da falta de conservação das rodovias. Segundo Castro et al. (2019), o desgaste relacionado a tal índice pode acarretar aumento do custo operacional dos veículos, o tempo de viagem e o grau de severidade dos acidentes, comprometendo a segurança viária como um todo.

Portanto, uma vez as rodovias tendo sido submetidas aos modelos de deterioração, desgaste e desempenho desenvolvidos, o sistema HDM-4 busca soluções para o retorno das mesmas às condições previamente estabelecidas, garantindo assim o atendimento às exigências do projeto de pavimentação.

3.1.1.6 Tipo de manutenção

As obras de manutenção e reabilitação são as ações necessárias para que um nível de conservação aceitável seja mantido nas vias de interesse. Os padrões de manutenção contidos no sistema HDM-4 consistem em um conjunto de uma ou mais operações na via, sendo essas definidas em função do nível de intervenção pretendido, do tipo almejado e do efeito resultante a ser alcançado (NUNES, 2012).

Geralmente as operações mais usuais adotadas para manutenção de rotina em

pavimentos são atividades de patrolamento, umectação e compactação.

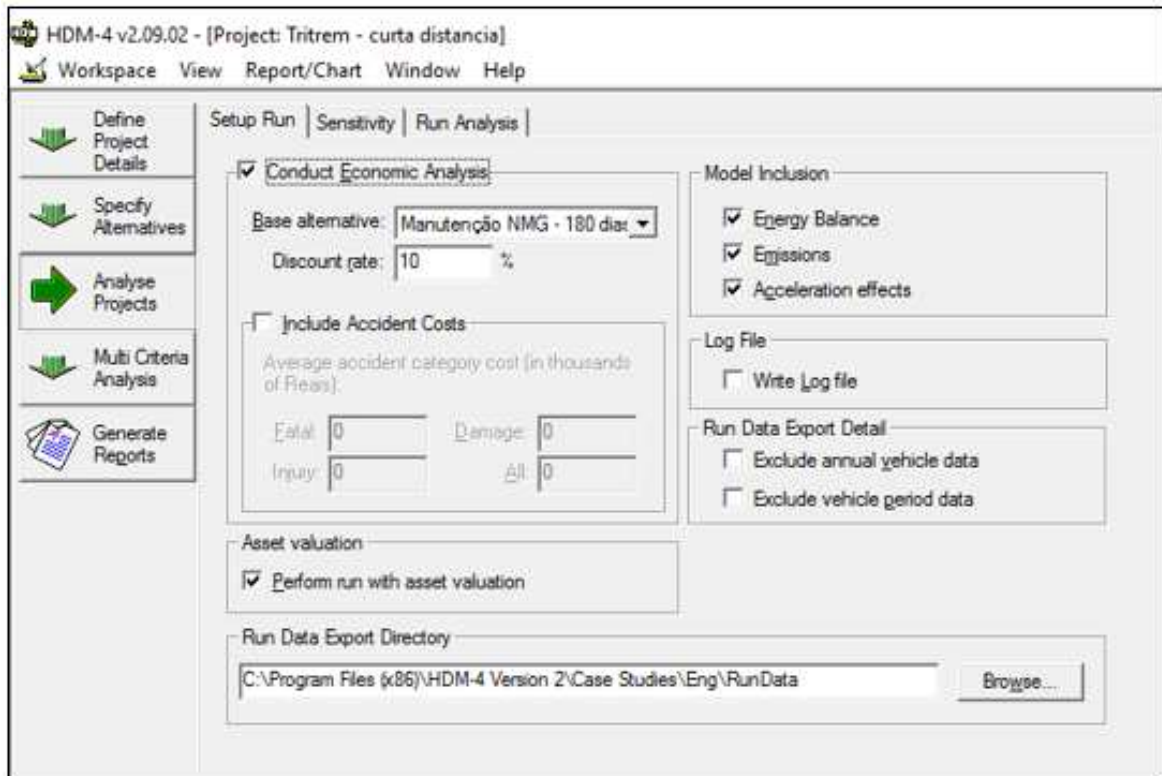
O patrolamento consiste em operação com motoniveladora para nivelamento e limpeza do pavimento, enquanto a umectação se refere à operação para elevar o teor de umidade do solo a níveis ideais para compactação. Por fim, a compactação consiste no trabalho de se reduzir a camada de subleito a níveis mínimos para pista de rolamento.

Nesse sentido, dentre as sugestões de intervenção pré-estabelecidas pelo programa HDM-4, o presente estudo considerou três tipos:

- HMG: Alta manutenção; infere em um tratamento mais completo das estradas, compreendendo as operações de patrolamento, umectação e compactação mecânica;
- LMG: Média manutenção; alude-se a um tratamento intermediário referente apenas à operação de patrolamento;
- NMG: Baixa manutenção; recorre-se a serviços mínimos de melhorias, praticamente não havendo intervenção.

Na Figura 19 a seguir evidencia-se a etapa de calibração de dados de manutenção no sistema HDM-4.

Figura 19 - Configuração de dados referentes aos tipos de manutenção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.7 Periodicidade

A estrutura dos pavimentos, independente de sua natureza, necessita de análises e reparações periódicas. Além de ser necessário definir o tipo de intervenção estrutural a que o pavimento será submetido, é de extrema importância a elaboração de um plano de frequência para tal, visando garantir a segurança e conservação das vias de acordo com a vida útil para a qual elas foram projetadas.

A periodicidade de manutenção pode variar conforme o tipo de intervenção escolhido, o objetivo almejado, as condições do pavimento e o orçamento disponível por parte da administração rodoviária, sendo que as despesas oriundas dos reparos variam conforme o tipo de degradação presente na via.

Dessa maneira, visando-se um horizonte de manutenção próximo ao adotado pelas principais empresas florestais da região de estudo, considerou-se para as análises 3 intervalos de tempo:

- Manutenção a cada 30 dias;

- Manutenção a cada 90 dias e;
- Manutenção a cada 150 dias.

Assim, ao considerar intervenções mensais, trimestrais e, em último caso, a cada 5 meses, fica evidente que ao fim de determinados períodos de tempo torna-se inevitável proceder a trabalhos de manutenção para repor as características satisfatórias dos trechos.

3.1.1.8 Intensidade de tráfego

O baixo volume de tráfego, realizado geralmente em um único sentido da via, é tido como uma das características mais comuns relacionadas às estradas florestais. Nesse sentido, a AASHTO (2012) define como estradas de baixo volume de tráfego aquelas que apresentam uma média de tráfego menor que 400 veículos por dia. Já o MWTC (2016) considera baixo volume quando o número equivalente (N) de operações de um eixo-padrão não exceda 10^6 ao longo da vida útil da via, geralmente estipulada em 10 anos.

De modo geral, entretanto, deve-se ressaltar que não há uma definição objetiva do que sejam estradas de baixo e de alto volume de tráfego, uma vez que há variações entre países, entre regiões de um mesmo país ou até mesmo num estado (NERVIS, 2018).

Nesse universo, a AADT (*Average Annual Daily Traffic*) ou VMDA (Volume Médio Diário Anual) é o parâmetro que define o volume diário médio anual de veículos sobre as vias, isto é, a soma do número total de veículos que trafegam em uma rodovia ou estrada por um ano, dividido por 365 dias. De forma simplificada, nada mais é do que uma medida útil e simples de quão movimentada é uma via.

No presente estudo, no intuito de abranger desde um pequeno volume de tráfego até um fluxo mais constante (a depender da realidade local, que pode demandar maior fluxo para trechos de mesmas características), optou-se por trabalhar com 3 valores de AADT: 40, 80 e 120. Considerando que ditos valores se basearam em contagens direcionais do fluxo sobre as vias (sentido ida e sentido volta), têm-se que a intensidade de tráfego para os mesmos correspondeu, portanto, a 20, 40 e 60 viagens por dia, respectivamente.

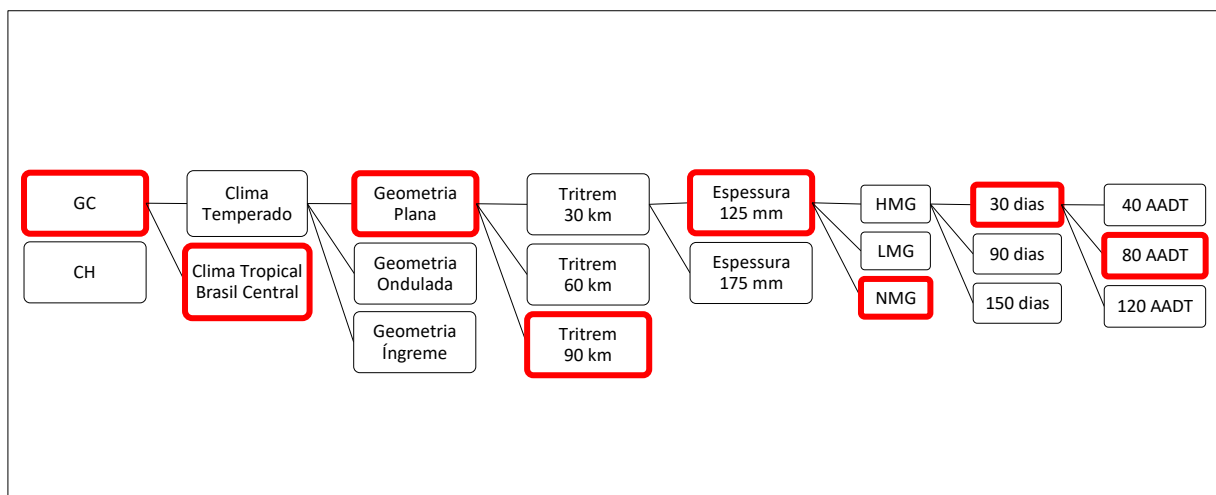
Essa variação quantitativa do tráfego de veículos sobre as vias, associado aos demais fatores embutidos no sistema, auxilia o planejamento de futuras intervenções nos trechos alvo de forma mais completa, eficiente e pontual.

3.1.2 Compilação dos dados

Uma vez definidos e calibrados os parâmetros de entrada no software, foi gerado, através da combinação de todos eles entre si, um extenso banco de dados contendo diferentes cenários de interesse, representando distintas realidades para o presente projeto.

A dinâmica de formação desses cenários é exemplificada no fluxograma da Figura 20.

Figura 20 - Definição de diferentes panoramas gerados pelo sistema HDM-4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após ter sido realizada a formação de cenários, o software HDM-4 procedeu ao processamento e simulação dos dados referentes a cada um deles, no intuito de gerar resultados do ponto de vista técnico, econômico e socioambiental para análise.

Dessa maneira, totalizou-se a criação de 23.328 diferentes panoramas, cada um composto por 6 categorias de interesse agrupadas em suas respectivas áreas, conforme a seguir:

Aspecto Técnico

- Condições do pavimento (desgaste de cascalho)

Aspecto Econômico

- Benefícios totais
- Custo de combustíveis
- Custo de pneus

Aspecto Socioambiental

- Emissões de CO
- Emissões de CO₂

3.1.2.1 Aspecto Técnico

A descrição do aspecto técnico foi embasada na análise da redução de cascalho inicialmente empregado para o recobrimento da via, metodologicamente abordado no tópico 3.1.1.5 deste trabalho, o qual permitiu definir a condição e qualidade do pavimento em função de sua maior ou menor proteção e consequente necessidade de intervenção.

3.1.2.2 Aspecto Econômico

Para a determinação de custos na parte econômica, os modelos que compõem o HDM-4 simularam as condições da estrada para um período de análise pré-estabelecido de 7 anos, considerando o balanço financeiro inerente ao processo. Essa metodologia, baseada em experiências realizadas em países em desenvolvimento ao longo de anos de pesquisas, permitiu ao sistema sua difusão e utilização com sucesso no Brasil nos principais projetos rodoviários (VALEC, 2012).

De modo geral, o sistema HDM-4 trabalha com 5 variações de custos, exemplificados na Figura 21 e descritos em seguida.

Figura 21 - Custos totais do setor rodoviário considerados pelo HDM-4.



Fonte: Adaptado de Costa (2014).

Os custos de construção e manutenção referem-se à parte física e estrutural da rede viária. Assis (2017) reforça a importância da qualidade de uma infraestrutura mantida ou criada, pelo fato de que fatores relacionados a essas ações têm impactos diretos nos custos. A irregularidade do pavimento, textura superficial, inclinação de rampa, geometria da via e condição do pavimento são alguns dos fatores que, através do efeito na estruturação física, no tempo e na velocidade dos veículos, oneram direta ou indiretamente a alíquota final.

Quanto aos custos externos, Bocanegra (2017) associa os mesmos às principais categorias de externalidades resultantes do sistema de transportes, tais como ruídos, vibrações, emissões de gases e à poluição de forma geral, relacionando-os também a acidentes oriundos do projeto.

Já os custos operacionais e os de usuários (utilizadores) encontram-se intimamente ligados segundo Alves e Santarem (2015), que atestam que os custos dos usuários englobam os custos de operação dos veículos. De uma forma mais aprofundada, Pereira (2011) afirma que os custos de operação compreendem as despesas com consumo de combustível, consumo de lubrificantes, desgaste de pneus, trabalhos de manutenção, depreciação e juros relacionados.

Posto isso e considerando ditas categorias econômicas, a compilação de dados gerados nesse estudo restringiu-se àquelas de interesse para a obtenção de

resultados, voltando-se assim à análise dos benefícios totais e dos gastos relativos a combustível e pneus.

Quanto ao diagnóstico dos benefícios citados, Nunes (2012) afirma ser de praxe analisar e hierarquizar os possíveis investimentos a serem realizados selecionando a alternativa mais vantajosa. Nesse sentido, os critérios mais comuns de seleção de projeto adotados pelo HDM-4 são o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Relação Benefício-Custo (B/C).

Para a realização dos cálculos utilizou-se da análise econômica pelo VPL, escolha essa que se fundamentou na fácil elaboração e na forma clara que o método apresenta, revelando em termos monetários os benefícios econômicos que o projeto trará e representando-os pelo seu próprio valor VPL. Além disso, o HDM-4 por ser muito utilizado para análises de viabilidade de projetos, tem destacado tal índice como critério mais importante em decisões de investimentos públicos.

Assim, o VPL de um projeto pode ser definido como o valor presente dos benefícios (retornos de capital esperados) menos o valor presente dos custos (investimentos realizados) (NUNES, 2012). A seguir, na Equação 6 evidencia-se a forma de cálculo do VPL.

$$VPL = \sum_{t=0}^T (B_t - C_t) x (1 + r)^{-t} \quad (6)$$

Em que:

T : período de projeto (anos);

B_t : quantidade de benefícios no ano t ;

C_t : quantidade de custos no ano t ;

r : taxa de desconto.

Dessa forma, se o VPL for negativo o projeto analisado é inviável, pois os custos (ou as despesas) superam os benefícios (ou as receitas). Se o VPL for igual a 0, todas as receitas irão somente anular as despesas e nesse caso identifica-se a Taxa Interna de Retorno (TIR). Se o VPL for maior do que 0, tem-se um projeto economicamente viável, e no caso de vários projetos com VPL's positivos, seleciona-se aquele que apresentar o maior valor (ASSIS, 2017).

Apesar de sua fácil aplicação, a análise de investimentos através do VPL é considerada sofisticada ao considerar o valor do dinheiro no tempo através da taxa de desconto, podendo esta ser definida como sendo a taxa de juros aplicada sobre os valores futuros do projeto. Nesse sentido, juros e depreciação atuam como componentes de custos fixos na quantificação dos benefícios econômicos representados.

Quanto aos juros, seu custo foi obtido através da metodologia inerente ao próprio sistema, considerando a aplicação de uma taxa ao investimento e levando-se em conta o preço do veículo de substituição. Ainda, teve-se em vista o fator de juros e a vida útil da máquina, esta última associada à velocidade e às horas trabalhadas. A fórmula simplificada para cálculo é evidenciada na Equação 7:

$$J = \frac{(Ca \times i \times f)}{Vu} \quad (7)$$

em que:

J = custo de juros, dado em reais por hora efetiva (R\$/1000 km-veíc);

Ca = custo de aquisição da máquina (R\$);

i = taxa anual de juros (%);

f = fator de correção;

Vu = vida útil da máquina (1000 km-veíc).

Quanto à depreciação do veículo, a mesma foi calculada pela subtração do valor de aquisição de seu valor residual, isto é, do valor do veículo ao final de sua vida útil, o qual o sistema adota como uma porcentagem do preço do veículo novo (exceto pneus). Ao dividir o valor depreciável pela vida útil estimada, obteve-se a quota de depreciação a ser deduzida anualmente, segundo a seguinte forma simplificada na Equação 8:

$$D = \frac{(Ca - Vr)}{Vu} \quad (8)$$

em que:

D = custo de depreciação, dada em reais por hora efetiva (R\$/1000 km-veíc);
 Ca = custo de aquisição da máquina (R\$);
 Vr = valor residual (R\$);
 Vu = vida útil (1000 km-veíc).

No quesito custos variáveis, Klein (2005) afirma que o consumo de combustível é dado em função de diversos fatores, tais como potência total requerida pelo motor, tipo de veículo, distância e sentido da viagem (subida e descida), afetando diretamente o custo do mesmo. Desse modo, a determinação dos gastos com combustível feita pelo HDM-4, considerando fatores do próprio sistema, baseou-se de modo geral na Equação 9:

$$Comb = Cmm \times Pu \quad (9)$$

em que:

Comb = custo com combustível por hora efetiva (R\$/1000 km-veíc);
 Cmm = consumo médio horário da máquina (l/1000 km-veíc);
 Pu = preço por litro de combustível (R\$/l).

Já o custo de pneus relaciona-se diretamente com seu desgaste, sendo este, segundo o autor supracitado, manifestado de forma proporcional em função das forças que atuam em cada roda do veículo (forças radial, lateral e normal). A irregularidade do pavimento, o tipo de pneu e o tipo de tráfego são, portanto, fatores preponderantes no consumo e despesa desse bem. E assim como para combustível, o software agrega referências próprias para seu cálculo, baseando-se na Equação 10 a seguir:

$$CP = \frac{(N \times Vp)}{H} \quad (10)$$

em que:

CP = custo de pneus por hora efetiva (R\$/1000 km-veíc);

N = número de pneus da máquina;

V_p = valor de aquisição do pneu (R\$);

H = vida útil do pneu (1000 km-veíc).

Uma vez expostos ditos inventários, além da obtenção de valores individuais para os custos alvo, o sistema pôde projetar o valor de capital a ser poupado para cada cenário, definindo um benefício líquido específico para cada panorama de interesse. Dessa forma, a simulação econômica produzida se fundamentou na junção das despesas de operação, manutenção, construção, despesas externas e de usuários, as quais compuseram as despesas totais para a sociedade, originando-se do inter-relacionamento entre custos fixos e custos variáveis.

3.1.2.3 Aspecto Socioambiental

Segundo Bonsu (2016), o consumo de combustível e as emissões veiculares do tráfego são as principais restrições ao desenvolvimento ambiental sustentável. Tais fatores têm aumentado significativamente nos últimos anos devido ao rápido crescimento do tráfego mundial, resultando em um aumento de problemas associados tais como câncer, doenças respiratórias, aquecimento global, etc.

No Brasil, em 2019, o setor de transportes foi responsável por cerca de 45,4% do total de emissões dos gases de efeito estufa (GEE), isso correspondendo a 190,5 milhões de toneladas de CO₂ liberadas (BRASIL, 2019). Nesses lançamentos, segundo o Ministério de Minas e Energia, o CO₂ figura como grande vilão por ser responsável por cerca de 98% da composição dos gases emitidos.

Nesse sentido, no que tange ao monitoramento do lançamento de gases, o HDM-4 produz em seus relatórios de saída estimativas de CO₂, HC, CO, NO_x, SO₂ e material particulado, liberados em função do tráfego esperado com a implantação da obra rodoviária alvo. Essa gama de elementos abarcados pelo sistema permite, além de um panorama geral, dar um enfoque específico ao objeto de estudo.

Posto isso, o presente trabalho considerou como GEE de interesse o CO e o CO₂, devido à sua notoriedade e relevância ao tema, tornando possível a quantificação e avaliação de diferenças líquidas desses poluentes para cada opção de investimento.

A seguir são apresentadas as Equações 11 e 12, utilizadas para cálculo das

emissões de monóxido de carbono e dióxido de carbono, respectivamente.

$$EOE_{CO} = a_{CO}FC \quad (11)$$

onde:

EOE_{CO} - Emissões de monóxido de carbono fora do motor (g/veh-km);

a_{CO} - proporção de emissões fora do motor por grama de combustível consumido para emissão de CO (gCO/gfuel);

FC - Consumo de combustível.

$$TPE_{CO_2} = 44.011 \left[\left(\frac{FC}{12.011 + 1.088a_{CO_2}} - \frac{TPE_{CO}}{28.011} - \frac{TPE_{HC}}{13.018} - \frac{TPE_{PM}}{12.011} \right) \right] \quad (12)$$

onde:

TPE_{CO_2} - Emissões de dióxido de carbono do tubo de escape (g/veh-km);

FC - Consumo de combustível;

a_{CO_2} - parâmetro de modelo dependente de combustível que representa a razão de hidrogênio para átomos de carbono no combustível;

TPE_{CO} - Emissões de monóxido de carbono do tubo de escape em g/veh-km;

TPE_{HC} - Emissões de hidrocarbonetos do tubo de escape em g/veh-km;

TPE_{PM} - Emissões de material particulado do tubo de escape em g/veh-km.

Assim, a utilização do software HDM-4 como ferramenta de SGP na compilação dos resultados técnicos, econômicos e socioambientais, vem neste estudo fundamentar a posterior fase de simulação dos mesmos, que ao se apoiar no conceito de *Digital Twin*, permitirá a avaliação das melhores alternativas de gestão das vias dentre os diversos panoramas construídos.

3.2 Parte II – *Digital Twin* (Software Simio)

3.2.1 Calibração do Sistema

Na segunda parte, os dados gerados via HDM-4 foram associados e integralizados através do sistema Simio, projetando o formato físico no plano digital. A obtenção dessas “cópias” virtuais representativas do projeto físico, tem por intuito auxiliar tanto a tomada de decisões quanto a gestão das operações de transporte florestal em vias não pavimentadas.

Nesse sentido, para atingir tal projeção o presente estudo fez uso da versão acadêmica do software Simio, a qual volta-se à aprendizagem e familiarização do usuário ao sistema, permitindo a construção e simulação de modelos menores e menos complexos constituídos por até 30 objetos em sua estrutura.

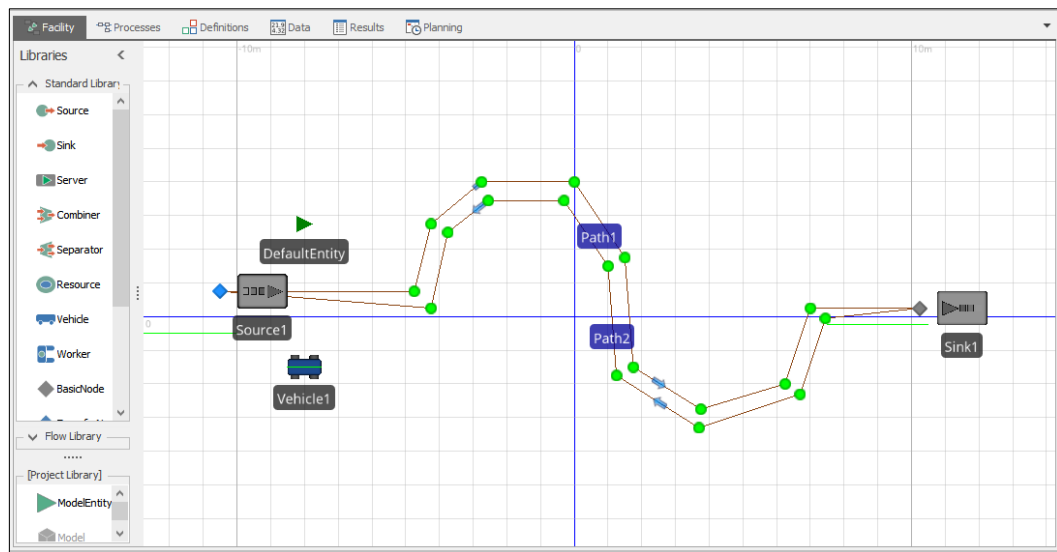
3.2.1.1 Estruturas do modelo

De modo geral, o projeto de simulação baseou-se em um cenário realista de demanda florestal composto por carregamento, transporte e descarregamento de madeira, desde um pátio de estocagem até uma fábrica alvo, sendo realizada por uma frota específica de caminhões trafegando sobre vias não pavimentadas de interesse.

Como estruturas básicas da modelagem no software, primeiramente definiu-se o pátio de carregamento de madeira como ponto inicial do modelo, o qual foi representado por uma fonte (*Source*). Já a fábrica que demanda tal madeira foi definida como ponto final do modelo, tendo sido representada por uma saída (*Sink*). Um trajeto composto por duas vias unilaterais contrárias (*Paths*) foi construído unindo fonte e saída, isto é, pátio e fábrica, simulando a rota não pavimentada percorrida pela frota em estudo.

Uma vez tendo sido definidas tais estruturas fixas, procedeu-se à modelagem dos objetos dinâmicos do sistema. A madeira, objeto de demanda a ser transportado, foi representada como entidade (*DefaultEntity*), enquanto o tritrem, objeto de transporte da mesma, foi representado como veículo (*Vehicle*), conforme a Figura 22. Após criados, a entidade madeira passou a ser gerada pela fonte e combinada ao veículo para a subsequente locomoção.

Figura 22 - Definição das estruturas básicas de modelagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.2 Caracterização das estruturas

Na logística empregada nesse sistema, a simulação de transporte de madeira se concentrou no modo comportamental dos caminhões, de maneira que cada um, obedecendo a um tempo pré-determinado de carregamento e descarregamento, realizou todo o trajeto do pátio à fábrica e retornou à origem para repetir o processo.

Uma vez de volta ao pátio fonte, os veículos retornantes direcionaram-se ao final da fila de caminhões que esperavam para serem carregados, obedecendo-se à sequência, de forma que toda a frota de veículos trabalhou em ciclos de viagens. Uma legenda índice foi gerada para numerar a frota e diferenciar os caminhões, assim como também foi criado um temporizador para acompanhamento das atividades e correta execução dos tempos de processamento.

A definição de valores numéricos referentes ao elementos do modelo, tais como distância da rota, tempo de carregamento e descarregamento e AADT específica, foram inseridas na simulação baseados nos melhores cenários resultantes da etapa HDM-4. Concomitantemente, estabeleceu-se que os caminhões, uma vez carregados, fariam o percurso de ida a uma velocidade constante de 35 km/h, e de volta, já descarregados, a 60 km/h, velocidade máxima essa permitida para tais veículos em vias não pavimentadas.

De posse desses valores, permitiu-se configurar o tamanho da frota exigida para o número de viagens necessárias, em função do tempo de trajeto. Ainda, através do *Work Schedule* inerente ao próprio sistema Simio, geriu-se intervalos de almoço e trocas de turno relativos às equipes de trabalho, de forma que a quantidade de horas trabalhadas por dia atendessem à quantidade de horas efetivas a serem trabalhadas.

No Simio, a lógica e animação do modelo são construídas em um processo de modelagem muito intuitivo, refletindo o estado de mudança dos objetos. Além da animação 2D, o software também fornece a 3D como parte natural do processo de modelagem (MARCELINO et al. 2020).

Assim sendo, todos os símbolos tridimensionais representativos de objetos foram provenientes da biblioteca padrão fornecida pelo próprio software. Além disso, as ferramentas de visualização do sistema também permitiram a exportação do plano de fundo de dados do Google Earth, simulando estradas, pátios e ambientes reais para o alcance da otimização do modelo.

Dessa maneira, a configuração dos elementos virtuais possibilitou ao projeto a dinâmica de tempo e movimento em 3D, permitindo acompanhar o comportamento esperado dos caminhões tanto dentro de tempos estabelecidos quanto sobre rotas de interesse.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse dos 23.328 cenários gerados via HDM-4 e através de uma extensa filtragem dos mesmos, chegou-se à seleção daqueles de maior interesse ao estudo. Ditos cenários foram escolhidos como mais promissores baseando-se nos índices econômicos representados pelos melhores benefícios totais gerados, isto é, por valores indicativos de quanto se deixa de gastar naquela opção, tendo-se em vista o maior Valor Presente Líquido associado.

Dessa forma foram obtidos dois cenários tidos como ideais, fazendo-se referência à manutenção de estradas com reposição de cascalho e sem reposição.

4.1 Sem reposição de cascalho

A Tabela 7 a seguir evidencia o melhor cenário gerado no quesito não reposição de material, para um horizonte de projeto de 7 anos.

Tabela 7 - Cenário mais favorável associado à manutenção de vias sem reposição de cascalho.

Cenário							
Solo	Clima	Geometria	Distância (km)	Espessura do cascalho (mm)	Tipo de intervenção	Periodicidade (dias)	Tráfego (AADT)
GC	Tropical	Plana	90	175	HMG	30	120
Tipo de Intervenção							
Categorias			Alta (HMG)	Média (LMG)	Baixa (NMG)		
Benefícios Líquidos Totais			1.380,1	1.367,3	0	Milhões de reais	
Emissões de CO			229,73	234,63	356,05	Toneladas	
Emissões de CO₂			71.511,04	73.030,01	110.825,93	Toneladas	
Consumo de Combustível			6.925,47	7.072,57	10.732,93	Litros por veículo/1000 Km	
Gasto com Pneus			1,54	1,59	2,19	Nº pneus novos por veículo/1000 km	
Condição do Pavimento			124	124	124	mm (perda de cascalho)	

De acordo com o exposto, para estradas nas quais não se objetivou realizar a reposição de cascalho, o melhor cenário a ser adotado foi o seguinte: o de solo cascalhoso, situado em clima tropical, possuindo vias de geometria plana com 90 km de distância, onde se aplicam 175 mm de cascalho para recobrimento inicial da via e se faz uma manutenção de alto nível a cada 30 dias, sendo tal trecho caracterizado por uma alta intensidade de tráfego.

Dada à sua conformidade, uma geometria plana apresenta facilidades quanto a tratos reparatórios e uma maior estabilidade natural, proporcionando, segundo Silva (2009), menores níveis de severidade e de defeitos. A menor concentração de escoamento superficial sobre essa geometria favorece a redução de processos erosivos e de perda de cobertura (MOREIRA, 2018), implicando geralmente em uma necessidade de reposição mais tardia e na diminuição de despesas econômicas nessa opção.

Ademais, nota-se que o cenário apresentou melhor retorno econômico com a adoção da alta manutenção (HMG) nas vias, tendo esse tipo de intervenção representado uma maior economia de recursos, com ganhos na ordem de 1.380,1 milhões de reais para todo o horizonte de projeto.

Apesar da média manutenção (LMG) implicar em um tratamento menos completo do trecho, exigindo para tal menos recursos e um menor investimento, seu VPL associado se mostrou inferior à alta manutenção. Comparado a esta, sua adoção representou um gasto adicional de 12,8 milhões de reais ao final do projeto, tornando-se, então, economicamente menos atrativa. Isso se explica pela qualidade final da via estar estritamente ligada à intensidade da manutenção adotada, fazendo com que a economia de se investir em um menor nível de reparação não se sobreponha aos reflexos trazidos por uma via de menor qualidade.

A baixa manutenção (NMG) nesse caso caracterizou-se por praticamente não haver alterado o estado natural da via e, devido a esse comportamento de quase não intervenção, o ganho econômico pela adoção desse tipo de manutenção foi nulo.

Quanto às emissões de gases, as estimativas mostraram que seriam liberadas pelo tráfego quase 230 toneladas de CO e mais de 71.500 toneladas de CO₂ no decorrer dos 7 anos de projeto, adotando-se a alta manutenção. Tais valores sofreriam acréscimos caso se optasse pela média e baixa intervenções, o que pode ser explicado pelo menor desempenho dos veículos sobre vias menos tratadas.

Buracos, trincas, ondulações e erosões são alguns dos fatores que levam ao aumento do consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões atmosféricas. Segundo a CNT (2019), ao trafegar por pistas de baixa qualidade, o motorista tem maior dificuldade em manter a velocidade constante, precisando frear e acelerar com mais frequência, o que acarreta o aumento de tais parâmetros.

Em se tratando de gás carbônico, optar pela média manutenção em relação à alta implicaria em liberar 1.518,97 toneladas a mais de CO₂ na atmosfera, enquanto ao se optar pela baixa esse excesso seria ainda maior, de 39.314,89 toneladas. Esse gás em altas quantidades no ar torna-se prejudicial, sendo um dos responsáveis pelo aquecimento global, mas, em contrapartida, é também matéria prima para a fotossíntese das árvores. Por isso, para reparar o prejuízo ambiental resultante das deficiências do pavimento, estimou-se quantas árvores deveriam ser plantadas para compensar tais emissões adicionais.

Segundo um estudo sobre o reflorestamento da Mata Atlântica (ESALQ-USP, 2013), cada árvore pode absorver aproximadamente 163,14 kg de CO₂ ao longo dos seus primeiros 20 anos de vida. Desse modo, seria necessário o plantio de 9.311 árvores pela média manutenção e de 240.989 árvores pela baixa para equilibrar as emissões advindas do excesso de diesel consumido no projeto em questão.

Nesse sentido, a quantidade de gases emitidos se torna reflexo direto da quantidade de combustível gasto, por ambos estarem intimamente relacionados à qualidade das vias. E levando-se em consideração que no Brasil a frota de automóveis cresceu 80,8% nos últimos 11 anos (CNT, 2019), uma má qualidade das pistas só tem a contribuir para o agravamento de tais quantidades.

À luz disso, notou-se pelos resultados expostos que o consumo de combustível apresentou estimativa crescente similar às emissões, aumentando à proporção que se reduziu a intensidade de manutenção dos trechos. Na alta intervenção, o consumo apresentou-se superior a 6.900 litros por veículo/1000 km, aumentando em 147,1 litros esse valor ao se optar pela média intervenção e em mais de 3.800 litros ao se optar pela baixa manutenção.

Considerando que o preço médio do óleo diesel repassado ao consumidor em 2019 segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020) foi de R\$ 3,589 por litro, pode-se afirmar que, para o cenário apresentado, o consumo excessivo desse combustível representou um prejuízo financeiro de 527,94

reais com a adoção da média manutenção e de 13.664,97 reais com a adoção da baixa, ambos calculados por veículo/1000 km.

Dessa forma, a maior qualidade da via proporcionada pela aplicação da alta intervenção figurou como preponderante no menor valor de consumo de combustível. Francisconi Junior (2017) afirma que rotas com melhores condições de infraestrutura resultam em benefícios tanto econômicos quanto ambientais no que tange a esse consumo. Assim sendo, obras de melhoria, intervenções e mudança significativa na frota de veículos são ações que influenciam na redução de GEE ao proporcionarem melhor qualidade de tráfego sobre a via e conseqüentemente menor consumo de combustível.

Quanto ao gasto estimado com pneus, este seguiu o mesmo padrão crescente apresentado pelos parâmetros anteriores, apresentando-se menor na alta manutenção e aumentando no sentido da média para a baixa. Tal comportamento está vinculado à forma com que pneus, combustível e emissões se associam entre si, numa dinâmica única e interligada.

O pneu é um componente essencial do veículo, pois ele é o único responsável por fazer a interface entre este e o pavimento, interface essa na qual os veículos acabam consumindo combustível para vencer as forças contrárias ao seu deslocamento. Uma dessas forças é a resistência ao rolamento, definida como uma manifestação de perda de energia devido às deformações sofridas pela superfície de contato do pneu com o pavimento (LEANDRO, 2018).

Nesse sentido, o autor supracitado afirma que a textura do pavimento é a característica que mais influencia na resistência ao rolamento, impactando diretamente o consumo de pneus, combustível e a emissão de gases poluentes, sendo significativa, portanto, do ponto de vista econômico e ambiental.

Assim, uma pista com baixo padrão de reparação, apresentando uma textura mais irregular e desuniforme, vem a fundamentar o maior número de pneus gastos associados. No caso do cenário apresentado, com a adoção da baixa manutenção de vias tais gastos se mostraram superiores a 2 pneus novos por veículo/1000 km rodados.

Quanto ao quesito condição do pavimento, o mesmo foi caracterizado em função da perda da camada inicial de cascalho sobre a via. Freitas (2019) afirma que o material cascalhoso é comumente utilizado para obras em vias não pavimentadas,

sendo parte dele empregado como camada de sacrifício, uma vez que por efeito do tráfego de veículos e do tempo, certa quantidade perde-se da estrada.

No cenário apresentado, essa perda se mostrou a mesma para os três níveis de manutenção, indicando que o desgaste desse material não foi influenciado pelo tipo de intervenção, já que nesses serviços reparatórios, realizados em ciclos periódicos de 30 dias, não se incluiu a reposição de cascalho, somente obras e melhorias de outras naturezas. Assim, tanto o material que foi sendo desgastado quanto o que restou ao final do horizonte de projeto foram provenientes da quantidade inicial aplicada no primeiro ano.

Porém, é importante destacar que a redução de cascalho para ambas as manutenções, revelada em 124 mm deduzidos do montante inicial, implicou que os veículos não chegaram a atingir diretamente o subleito da via por falta de camada de revestimento, o que garantiu um nível mínimo de cobertura até o sétimo ano. De acordo com a CNT (2019), deformações e problemas na plataforma de rolamento estão geralmente associadas a esse desgaste do revestimento, combinado à falta de suporte, ao tráfego intenso e ao excesso de carga de veículos pesados sobre a via.

4.2 Com reposição de cascalho

A seguir, a Tabela 8 destaca o melhor cenário dentre os analisados considerando-se a reposição de material para um horizonte de projeto de 7 anos.

Tabela 8 - Cenário mais favorável associado à manutenção de vias com reposição de cascalho.

Cenário							
Solo	Clima	Geometria	Distância (km)	Espessura do cascalho (mm)	Tipo de intervenção	Periodicidade (dias)	Tráfego (AADT)
GC	Temperado	Ondulada	30	175	HMG	30	120
Tipo de Intervenção							
Categorias			Alta (HMG)	Média (LMG)	Baixa (NMG)		
<i>Benefícios Líquidos Totais</i>			406	406	0	<i>Milhões de reais</i>	
<i>Emissões de CO</i>			73,66	75,17	122,22	<i>Toneladas</i>	
<i>Emissões de CO₂</i>			22.922,83	23.390,18	38.041,23	<i>Toneladas</i>	
<i>Consumo de Combustível</i>			6.659,88	6.795,65	11.052,31	<i>Litros por veículo/1000 Km</i>	
<i>Gasto com Pneus</i>			1,75	1,76	2,58	<i>Nº pneus novos por veículo/1000 km</i>	
<i>Condição do Pavimento</i>			57	57	57	<i>mm (perda de cascalho último ano)</i>	

Nas vias as quais considerou-se fazer a reposição de cascalho, estipulou-se que esta seria realizada assim que a espessura do mesmo atingisse 70 mm. Dessa forma, o cenário que apresentou melhor benefício líquido, além de haver apresentado necessidade de reposição apenas no último ano de projeto foi o seguinte: o de solo cascalhoso, situado em clima temperado, possuindo vias de geometria ondulada com 30 km de distância, onde se aplicam 175 mm de espessura de cascalho para recobrimento inicial da via e se faz uma manutenção de alto nível a cada 30 dias, sendo tal trecho caracterizado por uma alta intensidade de tráfego.

Dentre as 3 geometrias de vias, a ondulada e íngreme são as que tendem a perder cascalho mais facilmente e atingir primeiro o mínimo para reposição, figurando a geometria plana na necessidade, geralmente, de uma reposição mais tardia. Tal fato é reforçado por Cabette (2018), que afirma que taxas de perda de cascalho superficial em camadas de revestimento aumentam significativamente em gradientes maiores e sob áreas de chuvas intensas, levando à maior necessidade de reposição antes que camadas inferiores sejam expostas.

Assim, nas vias em que o gatilho para recobrimento tende a ser atingido primeiro, uma intervenção antecipada acaba poupando um desgaste mais acentuado e que conseqüentemente cobriria um maior período do horizonte de projeto, implicando na recuperação da qualidade do trecho e em possíveis favorecimentos no benefício econômico final.

Nesse sentido, inclusive, o sistema HDM-4 entende que as vantagens da via ondulada podem se sobressair às da íngreme pelo fato de, mesmo após reposição, esta última ainda representar gastos e esforços advindos de sua conformidade e características que, ao longo do projeto, reduzam os benefícios econômicos trazidos pelo revestimento. Em outras palavras, na geometria ondulada a reposição e manutenção compensam os esforços e reflexos desfavoráveis do tipo de via, ao ponto que seu benefício financeiro seja superior às desvantagens e se sobressaia às demais categorias geométricas.

Voltando-se à intensidade das intervenções, evidenciou-se que o melhor retorno econômico se mostrou o mesmo tanto para a alta quanto para a média manutenção, ficando na ordem de 406 milhões de reais. Isso poderia implicar que não seria necessário optar por uma intervenção alta, a qual conseqüentemente requer

maior mão de obra e custos, quando uma média intervenção proporcionaria o mesmo resultado financeiro e se colocaria como uma alternativa mais atraente.

Porém, deve-se levar em conta que uma manutenção mediana implica em uma via com qualidade final menor se comparada à alta manutenção, tendo impactos diretos no desempenho dos veículos e nos rendimentos por categoria, o que foi refletido nos maiores gastos com pneus e combustível. Dessa forma, apesar de terem apresentado o mesmo valor em benefícios líquidos, a opção pela alta intervenção ainda assim se mostrou mais vantajosa devido principalmente ao viés ambiental.

No parâmetro emissão de gases, a manutenção HMG manifestou os menores índices, o que implica dizer que optando-se por essa intervenção seriam poupadas de serem liberadas na atmosfera 467,35 toneladas a mais de CO₂ em relação à média manutenção e evitadas 15.118,40 toneladas extras em relação à baixa. Em se tratando de CO, as quantidades não emitidas seguiriam o mesmo padrão crescente.

Com isso, e seguindo o raciocínio apresentado no cenário anterior quanto à neutralização das emissões adicionais de CO₂, estimou-se a quantidade de árvores necessárias para que tal compensação fosse alcançada. O cálculo revelou que deveriam ser plantadas 2.865 árvores pela média manutenção, enquanto a baixa intervenção exigiria um total de 92.672 desses indivíduos para o correto balanço das emissões advindas do excesso de diesel.

Atrelado às emissões, a estimativa de consumo de combustível também foi menor com a adoção da alta manutenção, apresentando aumento conforme se optou pela média e baixa intervenções respectivamente. Em comparação, a diferença de combustível consumido da manutenção HMG para a LMG foi de quase 136 litros, sendo que da HMG para a NMG esse aumento ficou próximo dos 4400 litros.

Da mesma forma que para o cenário sem reposição, baseando-se no preço do diesel segundo a ANP (2020), pode-se afirmar que para o atual cenário o consumo excessivo, e desnecessário, desse combustível representou um prejuízo financeiro perceptível, sendo de 487,28 reais por veículo/1000 km com a adoção da média manutenção e de 15.764,43 reais, na mesma unidade, com a adoção da baixa.

O mesmo comportamento crescente pôde observado quanto ao gasto com pneus: com a alta intervenção estimou-se um consumo de 1,75 pneus novos por veículo/1000 km, valor esse que sofreu aumento com adoção da média e da baixa

manutenções respectivamente, refletindo assim os efeitos da qualidade da via nos gastos desse elemento.

Quanto à condição do pavimento, os resultados evidenciaram que o cenário proposto só veio a atingir o nível de 70 mm de cascalho necessários à reposição no último ano de projeto, o que configura um parâmetro positivo quanto à temporalidade de tal reposição.

Para os três níveis de manutenção, após ser repostos, a redução do cascalho foi a mesma, de 57 mm, implicando dizer que assim como no cenário anterior a perda de revestimento não está ligada ao tipo de intervenção adotada. Como os diferentes tipos de manutenção não consideraram a reposição de cascalho em suas atividades, as intervenções ao longo do horizonte de projeto aconteceram da mesma forma tanto para o cenário sem quanto para o com reposição. Neste último, porém, a reaplicação foi realizada quando o nível gatilho para o mesmo foi atingido, o que ocorreu somente no último ano, tornando-a assim um fator alheio ao tipo de obra assistencial adotada.

Na sessão Anexos são apresentados exemplos dos relatórios de saída produzidos pelo programa HDM-4 para este estudo, contendo informações mais detalhadas acerca dos parâmetros avaliados que deram suporte à escolha dos cenários mais favoráveis.

4.3 Frota

Dando continuidade aos resultados, estimativas relacionadas à frota necessária em cada um dos cenários de interesse foram geradas utilizando-se os próprios dados fornecidos pelo HDM-4. Parâmetros como a velocidade máxima alcançada pelo veículo em função do tipo de manutenção e do tipo de pista foram considerados pelo sistema interno do software na modelagem dos cálculos.

A seguir, as Tabelas 9 e 10 evidenciam a dinâmica de frota exigida para cada cenário em função do tipo de intervenção aplicada.

Tabela 9 - Estimativa de frota relativa ao cenário sem reposição de cascalho.

Cenário								
<i>Solo</i>	<i>Clima</i>	<i>Geometria</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Espessura do cascalho (mm)</i>	<i>Tipo de intervenção</i>	<i>Periodicidade (dias)</i>	<i>Tráfego (AADT)</i>	
GC	Tropical	Plana	90	175	HMG	30	120	
<i>Tipo intervenção</i>	<i>Geometria</i>	<i>Periodicidade</i>	<i>Tempo carga/descarga (min)</i>	<i>Tempo viagem (h)</i>	<i>AADT</i>	<i>Nº viagens/dia programado</i>	<i>Nº viagens/dia realizável</i>	<i>Frota necessária</i>
HMG	A	30	30	3,1	120	60	6,2	9,7
	A	30	45	3,6	120	60	5,3	11,2
	A	30	60	4,1	120	60	4,7	12,8
LMG	A	30	30	3,2	120	60	6,1	9,8
	A	30	45	3,7	120	60	5,3	11,3
	A	30	60	4,2	120	60	4,7	12,9
NMG	A	30	30	7,0	120	60	2,8	21,5
	A	30	45	7,5	120	60	2,6	23,1
	A	30	60	8,0	120	60	2,4	24,6

Tabela 10 - Estimativa de frota relativa ao cenário com reposição de cascalho.

Cenário								
<i>Solo</i>	<i>Clima</i>	<i>Geometria</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Espessura do cascalho (mm)</i>	<i>Tipo de intervenção</i>	<i>Periodicidade (dias)</i>	<i>Tráfego (AADT)</i>	
GC	Temperado	Ondulada	30	175	HMG	30	120	
<i>Tipo intervenção</i>	<i>Geometria</i>	<i>Periodicidade</i>	<i>Tempo carga/descarga (min)</i>	<i>Tempo viagem (h)</i>	<i>AADT</i>	<i>Nº viagens/dia programado</i>	<i>Nº viagens/dia realizável</i>	<i>Frota necessária</i>
HMG	D	30	30	1,9	120	60	10,3	5,8
	D	30	45	2,4	120	60	8,2	7,3
	D	30	60	2,9	120	60	6,8	8,9
LMG	D	30	30	1,9	120	60	10,3	5,8
	D	30	45	2,4	120	60	8,1	7,4
	D	30	60	2,9	120	60	6,7	8,9
NMG	D	30	30	2,9	120	60	6,8	8,9
	D	30	45	3,4	120	60	5,8	10,4
	D	30	60	3,9	120	60	5,0	12,0

Como pôde se observar em ambos os cenários, a adoção da alta e da média manutenção refletiram praticamente o mesmo tamanho de frota, ficando mais evidente a disparidade de veículos necessários na comparação entre a alta e a baixa intervenção.

No cenário sem reposição de cascalho, visando atender as 60 viagens diárias, a frota demandada em NMG para os três intervalos de tempo de carga e descarga foi de praticamente 12 caminhões a mais em relação à manutenção HMG. No cenário com reposição esse excedente foi de pelo menos 3 veículos.

Notou-se que de HMG para NMG a frota necessária aumentou conforme o número de viagens realizáveis diminuiu, o que pode ser explicado pela redução de velocidade na pista ocasionada pela diminuição da manutenção e da qualidade das mesmas. Em outras palavras, para um mesmo número de viagens ou mesmo volume de madeira a ser transportado, a adoção de uma baixa manutenção nas vias, em ambos os cenários, implicou em um gasto de capital com frota extra que não seria exigida caso se optasse pela alta manutenção.

Ainda, cada viagem realizável adicional garantida através de reabilitações mais completas, implica na possibilidade de transporte de um volume extra de madeira que, sem o aumento da frota, não seria possível adotando-se um nível baixo de manutenção.

Assim, tendo-se em vista que a média de viagens extras possibilitadas pela manutenção HMG em relação à NMG foi de pelo menos 2,5 e que o volume de madeira transportado por viagem foi de 54 m³ (pré-definido no sistema na fase de *input* de dados), pôde se dimensionar o ganho financeiro atrelado a dito volume.

Para tanto, considerando-se que o preço do eucalipto para a região sudeste, principal produtora no país, apresentou nos últimos anos valores médios de R\$ 36,00/m³ (VALADARES, LANDAU e MAIA, 2020), estimou-se que o adicional em volume de madeira transportado pode render aproximadamente 4900 reais a mais por dia de serviço. Tal benefício, ao ser extrapolado para um horizonte de projeto de 7 anos, permite a possibilidade de uma projeção de ganhos acima de 12 milhões de reais, advindos como efeito de uma manutenção periódica satisfatória.

De forma geral, a melhor qualidade da via refletida na melhor trafegabilidade, maior velocidade dos veículos, menores tempos de viagem e na possibilidade de um maior número de viagens realizadas, conseqüentemente implicou em um número

reduzido de frota demandada adotando-se a alta manutenção, evidenciando este tipo de intervenção como detentora dos maiores ganhos em logística de transporte.

4.4 Simulação

No que tange à simulação através do software Simio, os resultados aludiram à replicação das características de interesse de um dos cenários tidos como ideais, baseando-se na dinâmica de tempo e movimento realizada pela frota exigida. À escolha, o modelo desenvolvido utilizou-se dos resultados obtidos pelo cenário com reposição de cascalho, atentando-se, porém, ao ajuste dos limites de velocidade permitidos para vias não pavimentadas. A seguir, na Tabela 11, observa-se a adequação do panorama modelo para a simulação proposta.

Tabela 11 - Dados relativos à simulação do cenário de interesse.

Distância (km)	Tempo carga/descarga (min)	Tempo viagem (h)	AADT	Nº viagens/dia programado	Nº viagens/dia realizável	Frota necessária
30	30	2,3	120	60	8,2	7,2

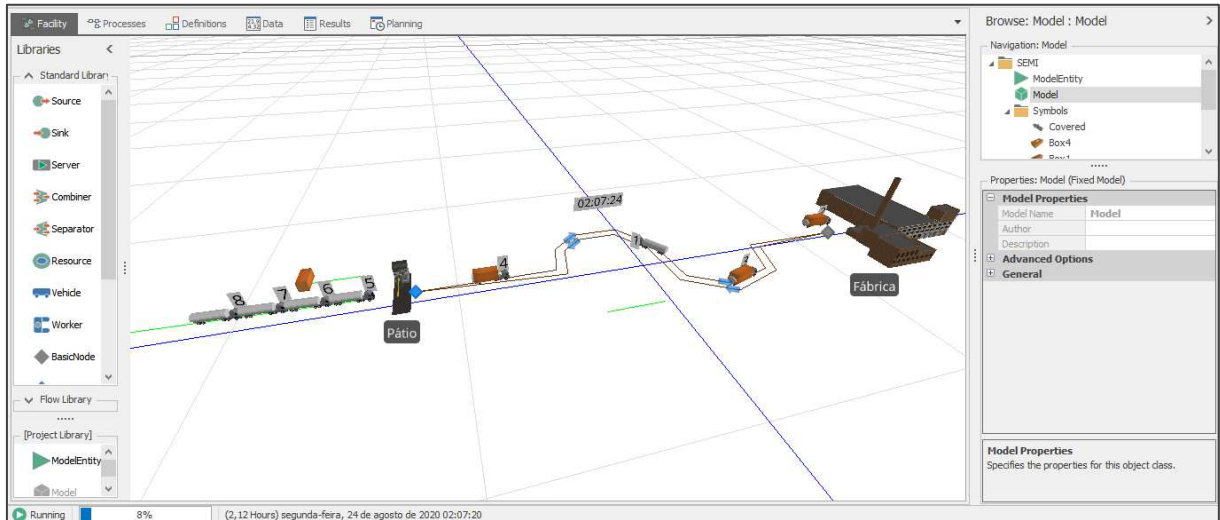
Segundo a base exportada para modelagem, validou-se a distância de rota em 30 km obedecendo-se a um tempo de carga e descarga de 30 minutos por veículo. As velocidades exercidas pela frota, as quais já haviam sido anteriormente estipuladas, figuraram em 35 km/h na ida para o veículo carregado e em 60 km/h na volta para ele descarregado, obedecendo-se de forma geral ao limite máximo de 60 km/h para tráfego em vias rurais não pavimentadas. Assim, os tempos de processamento em pátio somados ao tempo de trajeto à fábrica resultaram em uma duração da viagem por veículo estimada em 2,3 horas.

À continuidade, para atender a demanda de 60 viagens diárias, característica da alta intensidade de tráfego sobre a via, estimou-se que cada caminhão deveria realizar um mínimo de 8 viagens por dia, sendo necessários para tanto pelo menos 8 veículos compondo a frota.

A junção de todos esses elementos pode ser observada na Figura 23 a seguir, a qual demonstra o resultado visual 3D do processo simulatório em execução. Nele

evidencia-se pátio de carregamento, trajeto, fábrica destino, bem como o tamanho da frota necessária e o monitoramento *timer* para correto controle de tempo e movimento.

Figura 23 - Simulação de tempo e movimento via Simio 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do número mínimo de viagens, da quantidade exigida de veículos e baseado na dinâmica dos caminhões dentro do sistema, foi possível a configuração do *Work Schedule* do modelo, com a geração da escala diária de trabalho baseada na formação de turnos e no cumprimento da jornada laboral exigida. A síntese dessas informações é apresentada na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 - Resultado da configuração da escala de trabalho referente à frota.

	Tipo de jornada	Horário	Nº de horas
Turnos diários por caminhão	Efetiva	00h-04h	4
	Almoço	04h-05h	1
	Efetiva	05h-08h	3
	Efetiva	08h-12h	4
	Almoço	12h-13h	1
	Efetiva	13h-16h	3
	Efetiva	16h-20h	4
	Almoço	20h-21h	1
	Efetiva	21h-00h	3

Como evidenciado, cada veículo foi condicionado a trabalhar diariamente em 3 turnos de 8 horas, sendo cada um deles subdividido em um período inicial de 4 horas, um intervalo de uma hora de almoço e por um período final de 3 horas. Essas últimas são constituídas ainda por intervalos de trocas de turno, configuradas para durarem 20 minutos, nas quais substituem-se os motoristas por caminhão.

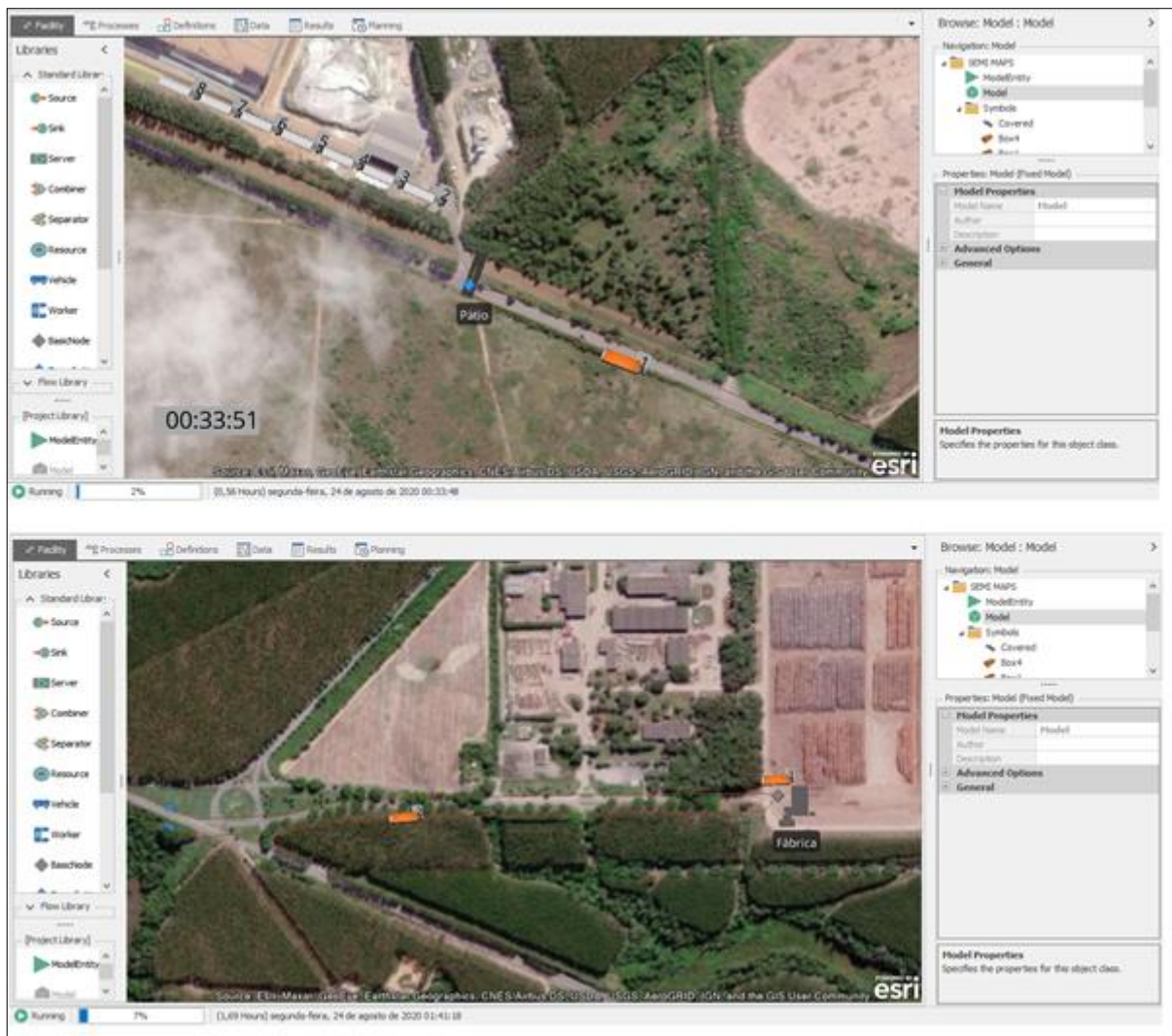
Para a sistemática da frota estudada, levou-se em consideração como já abordado metodologicamente, o cálculo das horas efetivas trabalhadas por veículo. Estas foram equivalentes a 81% do total de horas por ano, porcentagem relativa à eficiência operacional que implicou em 7096 horas efetivas anuais, correspondendo em outras palavras a 19,44 horas efetivas diárias.

Dessa forma, com *Work Schedule* veicular totalizando 21 horas diárias de trabalho (sendo 20 horas referentes a labor efetivo e uma a trocas de turno realizadas em 3 intervalos de 20 minutos), o modelo proposto apresentou-se satisfatório no atendimento às 19,44 horas exigidas por caminhão.

Ainda, tendo-se em vista a existência de 3 turnos diários por veículo e a estimativa de um motorista por turno, para uma frota composta por 8 caminhões seriam necessários 24 motoristas para cumprimento da escala diária de trabalho proposta. Tal dimensionamento permite aos transportadores uma melhor otimização de pessoal recrutado, minimizando possíveis problemas ligados ao gerenciamento de tripulação.

Por fim, com a conformação de tempo e movimento tendo sido realizada, finalizou-se o processo de simulação adicionando-se imagens satélites ao modelo Simio 3D. Estas fizeram referência à geolocalização de uma fábrica consumidora de madeira localizada no Espírito Santo, no caso a Aracruz Celulose, a exemplo de um modelo real contendo estruturas, vias e pátio de estocagem. A seguir, representações da simulação final rodada podem ser vistas na Figura 24.

Figura 24 - Simulação de tempo e movimento em 3D com imageamento satélite.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONCLUSÕES

A união do software HDM-4 como sistema de gerência de pavimento ao software Simio como ferramenta de simulação de Gêmeos Digitais, pode perfeitamente fundamentar a tomada de decisões no que tange às rodovias, em especial no que diz respeito às estradas não pavimentadas.

Essas potentes ferramentas virtuais possibilitaram uma visão mais detalhada de um sistema de gestão rodoviária ao permitirem de forma eficiente a análise técnica, econômica e socioambiental de alternativas de manutenção de vias, assim como a obtenção de soluções tecnológicas reais.

O cenário que figurou como mais eficaz ao não se considerar a reposição de cascalho foi o de subleito cascalhoso, situado em clima tropical, com vias planas de 90 km de distância, espessura inicial de 175 mm de cascalho, alta intensidade de tráfego e submetidas a manutenções de alto nível a cada 30 dias.

Ao se considerar a reposição de material, o panorama ideal se mostrou sendo o de subleito cascalhoso, situado em clima temperado, com vias onduladas de 30 km de distância, espessura inicial de 175 mm de cascalho, alta intensidade de tráfego e submetidas a manutenções de alto nível a cada 30 dias.

A opção pela alta manutenção apresenta-se como a mais viável dentre as demais, proporcionando melhores benefícios líquidos totais, menores índices de emissão de gases, consumo mais baixo tanto de combustível quanto de pneus e suficiente condição do pavimento ao final do horizonte de projeto.

O consumo de combustível poupado com a adoção da alta intervenção em vias sem reposição de cascalho apresentou-se na ordem de 527,94 reais por veículo/1000 km, em relação à média manutenção, e de 13.664,97 reais em relação à baixa. Em vias com reposição, essa economia foi de 487,28 reais e de 15.764,43 reais, respectivamente.

Os índices de emissões de gases com adoção da alta manutenção foram menores devido ao menor consumo de combustível. Para vias sem reposição de cascalho, a opção pela média intervenção em relação à alta implicou num excesso de emissões tal que, seria necessário o plantio 9.311 árvores para equilibrá-lo, sendo que a opção pela baixa exigiria o plantio de 240.989 desses indivíduos. Em vias com reposição, esse quantitativo exigido foi de 2.865 árvores para a média manutenção,

passando a 92.672 com a adoção da baixa.

O nível de manutenção adotado nas estradas apresentou impacto direto na frota necessária, sendo exigido às vias submetidas à baixa intervenção, em relação à alta, pelo menos 3 veículos a mais para os trechos com reposição de cascalho e aproximadamente 12 veículos excedentes naqueles sem reposição, visando o suprimento da demanda.

A média diária de viagens extras proporcionada pela alta manutenção foi de 2,5 em relação à baixa, dada em função da melhor qualidade final das vias, o que possibilitou a estimativa de transporte de volumes adicionais de madeira com rendimentos extras próximos a 4900 reais por dia de serviço, chegando a mais de 12 milhões de reais ao final do horizonte de projeto.

A simulação de tempo e movimento se mostrou satisfatória ao projetar o formato físico no plano digital no cenário de interesse, tendo sido possível a definição da escala diária de trabalho, a formação de turnos e o cumprimento da carga horária exigida em conformidade com os padrões reais almejados.

Na condição de infraestrutura, torna-se essencial um processo criterioso de avaliação técnica, econômica e socioambiental direcionado às vias não pavimentadas, o qual colabore para que elas deixem o cenário de precariedade a que são associadas e reforce os efeitos das práticas de manutenção na qualidade das vias e na gestão do transporte florestal.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros e complementares, no intuito de enriquecer o aqui apresentado, temos:

- Possibilidade de seleção de trechos experimentais para aplicação e validação em campo de parâmetros de interesse gerados, fundamentando a tomada de decisão na dinâmica entre ambiente físico e virtual.

REFERÊNCIAS

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials. **Guide to Pavement Management**. 2 ed. Washington D.C. 2012.

ABREU, A. D.; LANA, J. A. S.; RIBEIRO, R. N. **Aplicação dos conceitos da Floresta 4.0 nas atividades de colheita florestal de madeira**. In: Congresso Brasileiro de Instrumentação, Sistemas e Automação. Campinas. Anais eletrônicos, Galoá. 2019.

ALMEIDA, M.; PEREIRA, J. L. **Modelos de Simulação de Processos por Junção de Componentes**. In: Atas da Conferência da Associação Portuguesa de Sistemas de Informação. 2016.

ALVES, K. R.; SANTAREM, L. M. S. **Análise técnica-econômica com aplicação do HDM-4 na gestão da manutenção rodoviária**. In: 44^a RAPv - Reunião Anual de Pavimentação e 18^o ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Foz do Iguaçu, PR. 2015.

ALVES R. T. **Análise técnica e de custos do transporte florestal rodoviário**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro. 75 p. 2011.

ALVES, R. T.; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. N.; LOPES, E. S.; CARMO, F. C. A. **Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares**. Revista Árvore, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 897-904, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Manual de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários – SGPA**. 1^a edição, Junho, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Anuário Estatístico 2020**. Série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5809-anuario-estatistico-2020>>. Acesso em: 24 nov. 2020.

ASSIS, R. K. M. **Avaliação econômica de concessões rodoviárias no Estado de São Paulo utilizando os custos operacionais decorrentes da condição do pavimento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo. 129 p. 2017.

AZEVEDO, M. T. **Transformação digital da Indústria: Indústria 4.0 e a Rede de Água Inteligente no Brasil**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP. Universidade de São Paulo, São Paulo. 177 p. 2017.

B. FOREST. **Inteligência nos processos florestais**. Edição 43, ano 05, 2018. Disponível em: <<https://issuu.com/malinovskiflorestal/docs/b.forest-44-issuu/18>> Acesso em: 4 nov. 2019.

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event Simulation**. 5. ed. New Jersey: P. Prentice-Hall, 2010.

BARIA, I. **Sistema de Gerência de Pavimentos Aplicado à Via Permanente Metroferroviária Auxiliado por um sistema de Informações Geográficas**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 269 p. 2015.

BITTENCOURT, B. H K. **Estradas com revestimento primário: Definição das deflexões admissíveis para o controle de compactação através de medidas de deslocamentos elásticos das camadas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BOCANEGRA, B. B. **Metodologia para valoração ambiental em estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEA) de empreendimentos de infraestrutura de transportes rodoviários**. Dissertação de Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente. Universidade de Brasília, Brasília. 150 p. 2017.

BONSU, E. O. **Estimation of vehicular emissions and fuel consumption on road links using HDM-IV in Ghana - A case study on the George Walker Bush Motorway (14.1km) Accra**. Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, College of Engineering. Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana. 134p. 2016.

BOSSO, M. **Uso da tecnologia *Weigh-in-motion* para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 150 p. 2018.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 - Alterada pela Lei nº 13.281, de 2016. **Institui o código de trânsito brasileiro**. 2016. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503.htm >. Acesso em: 21 nov. 2019.

_____. Lei nº 12.619, de 30 de abril de 2012. **Dispõe sobre o exercício da profissão de Motorista para regular e disciplinar a jornada de trabalho e o tempo de direção do Motorista profissional; e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF. Pg. 5, 2012.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas**. MAPA. 52 p. Brasília, 2018.

_____. Ministério de Minas e Energia – MME. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2019. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-2020> > Acesso em 22 nov. 2020

CABETTE, M. M. **Caracterização geotécnica de estradas não pavimentadas de baixo volume de tráfego: Estudo de Caso**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Construção. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal. 250 p. 2018.

CASTRO, C. C. O.; SOUSA, E.S.; OLIVEIRA, V.C.; ALMEIDA, L.C.; OLIVEIRA, F.H.L. **Análise das condições de superfície do pavimento por meio do VSA e do IRI obtido com o aplicativo SmartIRI: estudo de caso aplicado à rodovia CE-401.** In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. 2019. Balneário Camboriú – SC, p.1421-1430. 2019.

CHESNEAU, J. B.; NET, E. L.; BERG, S. **A transport tool to evaluate sustainability impacts of transport processes within the Forest Wood Chain.** European Journal of Forest Research. v.131, n.1, p. 73-80, 2012.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos.** 4. ed. São Paulo: Elsevier, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2019** – Brasília: CNT: SEST SENAT, 236 p. 2019. Disponível em: < <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial> >. Acesso em 21 nov. 2019.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO - CONTRAN. Resolução nº 210/06 de 13/11/2006. **Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências.** Brasília, 2006. 7p. Disponível em: < <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/resolucoes-contran>>. Acesso em: 2 jun. 2019.

_____. Resolução nº 211/06 de 13/11/2006. **Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC, a que se referem aos artigos 97, 99 e 314 do Código de Trânsito Brasileiro.** Brasília, 2006b. 7p. Disponível em: < <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/resolucoes-contran>>. Acesso em: 2 jun. 2019.

_____. Resolução nº 246, de 27 de julho de 2007. **Fixa de requisitos técnicos de segurança para o transporte de toras de madeira bruta por veículo rodoviário de carga.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2007. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/resolucoes-contran>>. Acesso em: 2 jun. 2019.

COSTA, P. J. S. **Manutenção de pavimentos rodoviários - utilização do sistema HDM-4.** Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 126 p. 2014.

DEMIE, M., QUEZON, E., & FEYISSA, A. **Application of HDM-4 Model in the Structural, Functional, and Economic Variations using Road Maintenance Alternatives: A Case Study at Selected Road Sections in Addis Ababa City.** Xi'an Dianzi Keji Daxue Xuebao/Journal of Xidian University, Volume 14, Issue 9, 2020. <https://doi.org/10.37896/jxu14.9/084>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Calibração e aferição do modelo HDM-4 para as condições da rede de rodovias do Brasil.** 1ª Semana do Planejamento. 2017. Disponível em: < <http://www.dnit.gov.br/1a-semana-do-planejamento> > Acesso em: 07 nov. 2019.

_____. **Manual de Conservação Rodoviária**. Publicação IPR – 710. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: IPR. 564 p. 2005.

_____. **Manual de Gerência de Pavimentos**. IPR 745. Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2011.

_____. **Manual de Pavimentação**. IPR 719. 3ª Edição. Rio de Janeiro. 2006.

DIAS, V. F. P. D. S. **Proposta de conceptualização de uma ferramenta de apoio ao desenvolvimento de modelos de negócio na indústria 4.0**. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Portugal. 64 p. 2018.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ - ESALQ-USP. **Reflorestamento da Mata Atlântica absorve 1,2 milhão de toneladas de CO₂**. 2013. Disponível em: < http://www.esalq.usp.br/acom/clipping/arquivos/16-03-2013_Reflorestamento_da_Mata_Atlantica_absorve_1_2_milhoes_e_toneladas_de_CO2_UOL.pdf >. Acesso em: 24 nov. 2020.

FIBRIA. **Logística Florestal**. Relatoweb, 2016. Disponível em: < <https://relatoweb.com.br/fibria/2016/pt/logistica-florestal.html> > Acesso em: 4 nov 2019.

FERREIRA JR, G. A. **Redução de vida útil de um pavimento considerando o espectro de cargas num cenário de tráfego com excesso de peso**. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre, 2016.

FIEDLER, N. C. **Colheita e transporte em áreas declivosas**. Revista Opiniões. São Paulo, v. 27, 2012.

FRANCISCONI JUNIOR, J. P.; REIS, M. M.; AMORIM, J. C. C.; HENKES, J. A. **Contribuição do programa de infraestrutura logística de Santa Catarina na redução das emissões de gases de efeito estufa**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 694-710. 2017. ISSN 2238-8753. Acesso em: 16 nov. 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v5e22016694-710>.

FREITAS, B. T. **Avaliação e caracterização geotécnica de uma estrada de baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal. 151 p. 2019.

GASPARETO, D. S. **Análise de sistema automatizado de pesagem veicular com plataformas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 114 p. 2017.

GUIMARÃES, P. P.; ARCE, J. D.; FIEDLER, N. C.; ROBERT, R. C. G. **O transporte rodoviário florestal**. Enciclopédia Biosfera. v.13 n.24; pg. 780-794. Centro Científico Conhecer, 2016. DOI: [10.18677/EnciBio_2016B_073](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2016B_073).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de climas zonais do Brasil**. Rio de Janeiro, IBGE, 2002. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos.html> >. Acesso em: dez. 2019.

IBRAHEEM, A. T. **Applying Geographic Information System (GIS) for Maintenance Strategy Selection**. Engineering, v. 04, n. 01, p. 44–54. 2012.

JAHANGIRIAN, M.; ELDABI, T.; NASEER, A.; STERGIOULAS, L. K.; YOUNG, T. **Simulation in manufacturing and business: A review**. European Journal of Operational Research, v. 203, n. 1, p. 1-13, 2010.

JR., K. P. W.; INGALLS, R. G. **Introduction to simulation**. In: Winter Simulation Conference. [S.l.]: IEEE/ACM. p. 1741–1755. 2015.

KERALI, H.G.R. Volume one: Overview of HDM-4. **The Highway Development and Management Series Collection**. ISOHDM Technical Secretariat, School of Civil Engineering, The University of Birmingham, 2000.

KLEIN, F. C. **Análise da influência de características geométricas de rodovias nos custos dos usuários utilizando o programa HDM-4**. Dissertação de Mestrado em Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 134 p. 2005. doi:10.11606/D.18.2005.tde-11122006-161658.

KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G.; HENJES, J.; SIHN, W. **DigitalTwin in manufacturing: A categorical review and classification**. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018.

KUNATH, M.; WINKLER, H. **Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process**. Procedia CIRP, v. 72, p. 225-231, 2018.

LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 5. ed. Boston: McGraw-Hill Science, 2014.

LEANDRO, R. X.; **Influência da textura dos pavimentos e diferentes tipos de pneus na resistência ao rolamento**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 72 p. 2018.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. **Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and Big Data environment**. Procedia CIRP, vol. 16, p 3-8, 2014.

LOGWEB. **Logística florestal: Uma integração entre a produção florestal e a distribuição do produto final**. 2019. Disponível em: <<http://www.logweb.com.br/logistica-florestal-uma-integracao-entre-producao-florestal-e-distribuicao-do-produto-final/> > Acesso em: 4 nov. 2019.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu: características físico-mecânicas**. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, São Paulo. 158 p. 2002.

MACCHI, M.; RODA, I.; NEGRI, E.; FUMAGALLI, L. **Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management**. IFAC-PapersOnLine, 51:790–795. 2018.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Editora UFV, Viçosa. 468 pg. 2002.

_____. **Colheita Florestal**. Editora UFV, 3ª ed. Viçosa. 543 pg. 2014.

_____. **Construção e conservação de estradas rurais e florestais**. Viçosa, UFV, 2013.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S. **Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal**. Revista CERNE Lavras, v. 6, n. 2, p. 124-129, 2000.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. S.; BIRRO, M. H. B.; MACHADO, R. R. **Transporte rodoviário florestal**. Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa; 2º Edição, 217 pg. 2009.

MARCELINO, A. R. A.; COSTA, D. C.; MARTINS, M. H.; ALMEIDA, M. A. F. **Simulação em 3D de uma linha de embalagem de carretéis MIG/MAG usando o software Simio / 3D simulation of a MIG / MAG spool packaging line using Simio software**. Brazilian Journal of Business, Curitiba, v. 2, n. 2, p.1328-1342, abr./jun. 2020.

MARQUES, I. A. O.; LOPES, L. A. S. **Metodologia para gerenciamento de rodovias de baixo volume de tráfego**. XVIII ANPET. Florianópolis, 2004.

MARTINS, L. D. **Levantamento da Utilização de Sistemas de Gerência de Pavimentos no Brasil e Estudo de Caso**. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/ COPPE, Rio de Janeiro. 173 p. 2015.

MARTINS, P. C. **Aplicação da simulação a eventos discretos em conjunto com a pesquisa-ação para um projeto de melhoria em uma empresa de base tecnológica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais. 127 p. 2019.

MELO, R. **A Indústria 4.0 e seus impactos**. Trabalho de conclusão de curso, Bacharelado em Ciências e Tecnologia, Centro Multidisciplinar de Angicos. Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFRSA. 14 p. 2020.

MIZUSAWA, D. **Road Management Commercial Off-The-Shelf Systems Catalog**. V.2. 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. **Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company**. Winter Simulation Conference,

Proceedings...Baltimore, MD, USA, 2010.

MORAIS, M. G. A. **Colheita e transporte de madeira: terceirização x verticalização das operações**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo. 167 p. 2012.

MOREIRA, A. N. H. **Modelo geolocalizado para conservação de estradas não pavimentadas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 93 p. 2018.

MOROSIUK G.; RILEY, M and ODOKI J.B. **Modelling road deterioration and works effects**. Highway development and management series. Volume 6, World Road Association (PIARC). 2004.

MWTC. **Low Volume Road Manual**. Dar es Salaam. 2016.

NANCE, R. E.; SARGENT, R. G. **Perspectives on the Evolution of Simulation**. Operations Research, v. 50, p. 161–172, 2002.

NASCIMENTO, L. M. **Modelagem e análise de um sistema de armazenagem de produtos perecíveis utilizando simulação de eventos discretos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Pernambuco. 62 p. 2019.

NERVIS, L. O. **Proposta de metodologia simplificada para o dimensionamento de pavimentos com revestimento primário**. Revista Transportes, v. 26, n. 1. 2018. DOI:10.14295/transportes.v26i1.1352.

NUNES, D. F. **Procedimento para Análise de Sensibilidade do Programa HDM-4**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo. 198 p. 2012.

OJSTERSEK, R.; BUCHMEISTER, B. **Use of simulation software environments for the purpose of production optimization**. Annals of DAAAM & Proceedings, 28. 2017.

OLIVEIRA, M. J. G. **Classificação para orientar a manutenção de vias não pavimentadas**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Joinville: 2005.

OLIVEIRA, R. J.; GLERIANI, J. M.; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S.; CORDEIRO, S. A. **Análise da trafegabilidade em estradas florestais utilizando métodos computacionais**. Revista Árvore, Viçosa- MG, v. 37, n.2, p.355-360, 2013.

PÁEZ, E. M. A. **Índice de Condição do Pavimento (ICP) para Aplicação em Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo. 151 p. 2015.

PALMA, J. G. **Metamodelo para a modelagem e simulação de sistemas a eventos**

discretos, baseado em redes de Petri e realidade virtual: uma aplicação em sistema de manufatura. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo. 165 p. 2001.

PATERSON, W. D. O. **The highway and maintenance standards models (HDM-III), Volume III, Road deterioration and maintenance effects: Models for planning and management.** Washington, D.C: Transportation Department, World Bank. 1987.

PEREIRA, A. C. **Análise de Investimentos em Infraestrutura de Transportes.** 1ª ed. Natal: IFRN, 2011.

PERROTTA, F., PARRY, T., NEVES, L. C., BUCKLAND, T., BENBOW, E., & MESGARPOUR, M. **Verification of the HDM-4 fuel consumption model using a Big data approach: A UK case study.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, 67, 109–118. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.001>

PINTO, P. R. R. **Contribuição à modelagem de um sistema de gerenciamento da manutenção de rodovias não pavimentadas em empreendimentos de exploração florestal.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 158 p. 2009.

PROZZI, J.; KENNEY, M.E. **Moving Texas Exports: Examining the Role of Transportation in the Timber, Wood, and Wood Product Export Supply Chain.** College Station, TX United States. 15 p. 2016.

QUINALHA, E. **Gêmeos digitais, o futuro da indústria 4.0: estudo de caso.** Trabalho de Conclusão de Curso, Especialização em Redes de Computadores e Teleinformática. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 60 f. 2018.

RAMOS, M. M.; CAVAINAC, A. L. O.; GONZALEZ, J. M. M. **Análise de viabilidade da manutenção de estradas com software para gerenciamento de piso: aplicação do HDM-4 na Rodovia BR 010/MA.** Brazilian Journal of Production Engineering. Bjpe, 6(3), 75 - 87. 2020.

ROCHA, J. P.; NUNES, L. L. L. **Implantação de sistema de gerência de pavimentos: trecho da BR-135.** Enciclopédia Biosfera - Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.16 n.29; p. 2360. 2019.

RODIČ, B. **Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm.** Organizacija, v. 50, p. 193-207, 2017.

ROMEIRO JÚNIOR, C. L. S.; BRITO, L. A. T.; HELLER, L. F.; SCHREINERT, G. G.; NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; MERIGHI, C. **Impact on pavement deterioration due to overload vehicle regulation in Brazil.** Transportation Research Procedia, Volume 45, Pages 842-849, ISSN 2352-1465, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.085>.

RÜßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in**

manufacturing industries. Boston Consulting Group, v. 9, 2015.

SALINI, R. **INTELLIPave - Uma Abordagem Baseada em Inteligência Artificial para a Modelagem de Pavimentos Asfálticos**. Department of Computer Science, Univ. of Minho. Ph.D. thesis. Braga, 2010.

SANT'ANNA, G. L. **Estradas florestais: caracterização geotécnica e comportamento mecânico de solos e misturas solo-grits, cargas de tráfego e seus efeitos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 147 p. 2006.

SANTOS, C. H. **Utilização da simulação para tomada de decisões no contexto da indústria 4.0: Uma aplicação inserida no conceito de gêmeo digital**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 107 p. 2019.

SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. **From Simulation to Experimentable Digital Twins**. In: IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). Proceedings. Scotland: 2016.

SEIXAS, F. **Novas tecnologias no transporte rodoviário de madeira**. In: Simpósio brasileiro sobre colheita e transporte florestal, 5., 2001, Porto Seguro. Anais...Viçosa, MG: Sociedade de Investigação Florestal, p.1-27, 2001.

SILVA, L. L.; MOREIRA, N. H.; PANTOJO, P. C. **A real situação do transporte de cargas no Brasil**. 9ª FATECLOG - O papel do gestor na logística internacional. FATEC, Santos, São Paulo, Brasil, 2018.

SILVA, M. L.; OLIVEIRA, R. J.; VALVERDE, S. R.; MACHADO, C. C.; PIRES, V. A. V. **Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos**. Revista Árvore, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007. Doi: 10.1590/S0100-67622007000600012

SILVA, R. B. **Gêmeo Digital**. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Londrina, 2019.

SILVA, T. **Estudo de estradas não pavimentadas da malha viária do município de Viçosa – MG**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 119 p. 2009.

SKOOGH, A.; JOHANSSON, B. **A methodology for input data management in discrete event simulation projects**. Winter Simulation Conference, Proceedings... Miami, FL, USA, 2008.

SUWARTO, F.; FAUZIYAH, S. **Financial economic cost on gravel road maintenance: study using HDM4**. The 2nd International Conference on Green Civil and Environmental Engineering. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Volume 669, Indonésia, 2019. doi:10.1088/1757-899X/669/1/012033.

TEMBE, F. B. **Contribuição geotécnica para estradas de baixo volume de tráfego**.

Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal. 137 p. 2017.

UHLEMANN, T. H.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. **The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0**. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 335–340, 2017.

URIARTE, A. G.; NG, A. H.; MORIS, M. U. **Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0**. *Procedia Manufacturing*, v. 25, p. 586–593, 2018.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **Building Information Modeling (BIM) - a Road Map for Implementation to Support MILCON Transformation and Civil Works Projects within the U.S. Army Corps of Engineers**. 2006.

VALADARES, G. M.; LANDAU, E. C.; MAIA, N. M. L. **Evolução da produção de eucalipto (*Eucalyptus spp.* e outros gêneros, *Myrtaceae*)**. In: LANDAU, E. C.; GUIMARAES, D. P. (Ed.). *Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem animal e da silvicultura*. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 3, cap. 44, p. 1435-1500. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1122712>. Acesso em: 16 out. 2020.

VALEC. **Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EF-151)**. Ministério dos Transportes. Engenharia, Construções e Ferrovias S/A. Relatório Final, Vol. 2, Recife, PE. 2012.

VIK, P.; DIAS, L.; PEREIRA, G.; JOS, O.; ABREU, R. **Using simio for the specification of an integrated automated weighing solution in a cement plant**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Baltimore, Maryland, 2010.

WAN, J.; CAI, H.; ZHOU, K. **Industrie 4.0: Enabling Technologies**. In: *2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*. Proceedings. Harbin, China, 2015

XU, L. D. A.; XU, E. L.; LI, L. **Industry 4.0: state of the art and future trends**. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 1-22, 2018.

YAMADA, V. Y.; MARTINS, L. M. **Indústria 4.0: um comparativo da indústria brasileira perante o mundo**. *Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa*, [S.l.], v. 34, n. esp., p. 95-109, 2019. ISSN 2596-2809. Disponível em: <<http://periodicos.unifil.br/index.php/Revistatest/article/view/1011>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

ZAAYMAN G.; INNAMORATO A. **The application of SIMIO scheduling in Industry 4.0**. In: *Winter simulation conference*, pp 4425–4434. 2017.

ANEXOS

Exemplos de relatórios de saída gerados pelo sistema HDM-4 para um mesmo cenário.

ANEXO A - Comparison of Cost Streams - Comparação de fluxos de custos.

H D M - 4 Comparison of Cost Streams (Discounted)

Section: 125-CH-Geom1-30km-Temperado
Alternative: Manutenção HMG - 30 dias
Sensitivity: AADT = 120

Sect ID: 125CHG130T Road Class: Principal
 Length: 30,00 km Width: 7,00 m Rise+Fall: 1,00 m/km Curvature: 3,00 deg/km

Year	Increase in Road Agency Costs			Savings in Road User Costs							Net Social / Exogenous Benefits	Total Net Benefits	
	Capital Works	Recurrent Works	Special Works	Normal (+ Diverted) Traffic			Generated Traffic			Accident Cost Reduction			
				MT VOC	MT Time	NMT Time & Operation	MT VOC	MT Time	NMT Time & Operation				
2019	0.000	1.825	0.000	40.364	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	38.539
2020	0.000	1.629	0.000	51.998	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	50.369
2021	0.000	1.455	0.000	63.843	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	62.388
2022	0.107	1.299	0.000	71.866	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	70.461
2023	0.000	1.160	0.000	0.464	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.696
2024	0.000	1.036	0.000	2.921	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.885
2025	0.000	0.925	0.000	6.531	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.607
Total:	0.107	9.328	0.000	237.988	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	228.553

ANEXO B - Emissions Summary - Resumo de emissões.

HD M- 4 Emissions Summary

Section: 125-CH-Geom1-30km-Temperado
Alternative: Manutenção HMG - 30 dias
Sensitivity: AADT = 120

Sect ID: 125CHG130T Road Class: Principal
 Length: 30,00m Width: 7,00m Rise+Fall: 1,00m/km Curvature: 3,00 deg/km

Year	Annual Emission Quantities in tonnes						
	Hydrocarbon HC	Carbon monoxide CO	Nitrous oxide NOx	Sulphur dioxide SO2	Carbon dioxide CO2	Particulates Par	Lead Pb
2019	9,04	11,21	35,46	2,24	3.488,43	11,30	0,00
2020	8,86	10,99	34,78	2,20	3.421,48	11,08	0,00
2021	8,88	11,01	34,84	2,20	3.427,51	11,10	0,00
2022	8,88	11,01	34,84	2,20	3.427,51	11,10	0,00
2023	9,45	11,71	37,07	2,34	3.646,24	11,81	0,00
2024	9,44	11,70	37,03	2,34	3.642,57	11,80	0,00
2025	9,44	11,70	37,02	2,34	3.642,17	11,80	0,00

ANEXO C - Pavement Conditions Summary - Resumo das condições do pavimento.

HDM-4 Pavement Condition Summary

Section: 125-CH-Geom1-30km-Temperado
Alternative: Manutenção HMG - 30 dias
Sensitivity: AADT = 120
Surface Class: Unsealed
Length: 30,00km

Road Class: Principal
Width: 7,00m

Year	MT AADT	ESAL millions /ELANE	IRI bef. m/km	IRI Avg. m/km	Average Annual Values												
					All Str. Cracks %	Rave- ling %	Edge Break sq.m	Rut Depth mm	No. of Pot- holes	Struct. No.	Gravel Thick. mm	Avg. Faulting mm	Spalled Joints %	No. of Failures per km	Cracked Slabs %	Det. Cracks No/km	
2019	120	0,13		4,55								110					
2020	120	0,13		3,94								96					
2021	120	0,13		3,99								81					
2022	120	0,13		3,99								96					
2023	120	0,13		5,16								110					
2024	120	0,13		5,30								96					
2025	120	0,13		5,31								81					

ANEXO D - Fuel consumption per 1000 veh-km - Consumo de combustível por 1000 veh-km.

H D M - 4 MT Fuel Consumption per 1000 veh-km

Section: 125-CH-Geom1-30km-Temperado
Alternative: Manutenção HMG - 30 dias
Sensitivity: AADT = 120

Sect ID: 125CHG130T

Length: 30,00 km Width: 7,00 m

Road Class: Principal

Rise+Fall: 1,00 m/km

Curvature: 3,00 deg/km

		Period 1
TRITREM - 30 km	2019	1.013,51
	2020	994,06
	2021	995,81
	2022	995,81
	2023	1.059,36
	2024	1.058,29
	2025	1.058,18
	Total	7.175,02
Sect-Alt Total		7.175,02

(N.B. fuel consumption quantities are in litres per 1000 vehicle-kilometres)

ANEXO E - Tyre consumption per 1000 veh-km - Consumo de pneus por 1000 veh-km.

H D M - 4 MT Tyre Consumption per 1000 veh-km

Section: 125-CH-Geom1-30km-Temperado
Alternative: Manutenção HMG - 30 dias
Sensitivity: AADT = 120

Sect ID: 125CHG130T

Road Class: Principal

Length: 30,00 km

Width: 7,00 m

Rise+Fall: 1,00 m/km

Curvature: 3,00 deg/km

		Period 1
TRITREM - 30 km	2019	0,22
	2020	0,22
	2021	0,22
	2022	0,22
	2023	0,23
	2024	0,23
	2025	0,23
	Total	1,57
Sect-Alt Total		1,57

(N.B. tyre consumption figures are expressed in terms of the number of equivalent new tyres per 1000 vehicle-kilometres)